

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 20, выпуск 4, 2023

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

Учредитель

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

Издатель

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

Адрес учредителя

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

Адрес издателя

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

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

Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

Журнал включен в перечень

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 08.12.2023.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 31,87.

Тираж 300 экз. Заказ. Цена свободная.

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

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY,
volume 20, issue 4, 2023

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

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Publisher

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

Founder's address

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

Publisher's address

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

Mass media registration certificate number

ПН N ФС2-7499 dd. 06.04.2005
issued by the Federal service for the monitoring
of legislation compliance in the sphere of mass
communications and the preservation of cultural heritage,
North West Federal district division

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

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

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

The journal has the Peer-review division

The journal is distributed

Index Direct Mail Agency "Kniga-Service" 33315

JOURNAL STAFF

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, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

А. С. Лейерман

Еще одна тайна большого цепного моста, или Qui est le Capitaine Brun? 791

Ю. А. Канцибер, А. Б. Пономарев, В. И. Штыков

Основные расчетные гидрологические характеристики систем
очистки поверхностного стока в северо-западной зоне России 801

И. М. Печенцов

Переработка отходов металлургической промышленности
для стабилизации и укрепления проблемных грунтов 811

А. Б. Завьялов

Прогнозирование переизлученного шума и вибрации,
создаваемых вблизи железнодорожных линий 820

Е. Г. Асманкин, Е. М. Зубкова, В. В. Смыгалин, А. Н. Хлебородов, С. О. Шкуратов

Совершенствование транспортировки АХОВ на автомобильном транспорте 828

Н. Д. Лапшин, В. А. Миленьких, С. В. Дульнева, Е. Г. Асманкин, Т. А. Сильянова

К вопросам транспортировки гептила железнодорожным транспортом 835

С. Г. Ермаков, Н. А. Шедько

Применение нейросетевых технологий на примере отечественной программной
платформы DeerTalk в образовательном процессе ПГУПС на кафедре
«Информационные и вычислительные системы» 843

Л. Ф. Казанская, А. А. Сметанин

Механические характеристики реставрационных растворов при использовании
в их составах метакраинов 853

В. А. Ходаковский, М. А. Шварц, Ф. М. Шварц

Проектирование состава высокопрочного самоуплотняющегося бетона
с использованием нейронной сети 860

Синь Вэньшао, А. Ф. Колос, А. В. Петряев

Изучение параметров деформации оттаивающих грунтов
на основе дисперсионного анализа и метода анализа иерархий 868

П. А. Пегин, Д. С. Филимонов

Особенности проектирования и строительства зданий
в сейсмоопасных районах с многолетнемерзлыми грунтами 878

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

И. Г. Киселев, М. Ю. Кудрин, С. Б. Комиссаров, Д. Я. Монастырский

Результаты моделирования смешанной конвекции для оценки целесообразности
использования тепловых пушек в обогреве сварочного поста локомотивного депо 891

А. Л. Пенкин, А. А. Воробьев, А. А. Соболев, С. А. Метлякова, Д. Р. Ведерникова

Исследование процесса впуска в газовых двигателях
с внешним смесеобразованием 902

А. В. Татаренко, Е. В. Казакевич, А. А. Привалов, С. А. Лопатин	
Основные требования к средствам связи и информационной поддержке медицинской эвакуации железнодорожным транспортом	909
А. А. Привалов, Е. В. Казакевич, И. А. Глухов	
Модель процесса информационного обмена между абонентами сети ПРС с общим каналом связи	921
Ю. Н. Зуев, С. В. Чижов, Ю. В. Авдей, А. А. Антонюк	
Конструктивно-технологический аспект возведения сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста через реку Ветлугу	931
Л. А. Лосин, Н. В. Булычева	
Сравнительный анализ транспортного спроса и предложения в моделях транспортных систем городских агломераций	943
А. П. Бадецкий, О. А. Медведь, Я. В. Кукушкина	
Методика применения переменных нормативов при разработке плана формирования поездов.....	954
Т. М. Шманев	
Обслуживание пассажиров на основе принципа «сухие ноги». Цикл статей. Часть 1	967
М. В. Шевлюгин, А. А. Куликов, Д. В. Семенова	
Снижение экономических потерь в контактной сети и воздушных линиях, электрифицированных на переменном токе	975
А. А. Зарифьян, А. М. Евстафьев	
Показатели качества потребления энергии в коллекторном и асинхронном тяговых приводах электровозов переменного тока	987
А. В. Агунов, И. А. Терехин, Д. И. Фесак, Е. Г. Абишов, И. А. Баранов	
Анализ устройств автономного непрерывного мониторинга, оповещения и устранения опасного уровня газов в аккумуляторных помещениях	999
Е. Е. Мирошниченко	
Перспективы применения вентильно-индукторного двигателя в системе тяги высокоскоростного электропоезда	1004
А. Г. Отока, О. В. Холодилов	
Оценка работоспособности магнитных индикаторов при магнитопорошковом контроле деталей подвижного состава железных дорог.....	1016



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

А. Л. Пенкин, Е. А. Руппель, А. А. Воробьев, А. А. Соболев, И. Ю. Новосельский	
О влиянии топливного биоэтанола на эксплуатационные свойства транспортных двигателей....	1027
И. К. Андрончев, А. И. Соляник	
Нейронная сеть и чат-бот «Валера» для подготовки специалистов высшей квалификации....	1034

CONTENTS

→ GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

A. S. Leyerman

Another Mystery of the Big Chain Bridge, or Qui est le Capitaine Brun? 798

Yu. A. Kantsiber, A. B. Ponomarev, V. I. Shtykov

Basic Calculated Hydrological Characteristics of Surface Runoff Treatment Systems
in the North-Western Region of Russia 809

I. M. Pechentsov

Processing of Waste from the Metallurgical Industry for Stabilization
and Reinforcement of Problematic Soils 818

A. B. Zavyalov

Prediction of Re-Radiated Noise and Vibration Generated in the Vicinity of Railroad Lines 825

Ye. G. Asmankin, Ye. M. Zubkova, V. V. Smygalin, A. N. Khleborodov, S. O. Shkuratov

The Improvement of Hazardous Chemicals Transportation Methods by Motor Vehicles 833

N. D. Lapshin, V. A. Milenkikh, S. V. Dulneva, Ye. G. Asmankin, T. A. Sil'yanova

To Matters of Heptyl Transportation by Rail 841

S. G. Ermakov, N. A. Shedko

The Use of Neural Network Technologies Using the Example
of the Domestic Software Platform DeepTalk in the Educational Process
of PGUPS at the Department "Information and Computing Systems" 851

L. F. Kazanskaya, A. A. Smetanin

Mechanical Characteristics of Restoration Solutions
When Metacaolines Are Used in Their Compositions 858

V. A. Khodakovsky, M. A. Shvarts, F. M. Shvarts

Designing the Composition of High-Strength Self-Compacting Concrete Using Neural Network 866

Xin Wenshao, A. F. Kolos, A. V. Petryaev

Experimental Studies of Deformation Parameters of Thawing Soils Based on ANOVA and AHP 876

P. A. Pegin, D. S. Filimonov

Features of Design and Construction of Buildings in Seismically Hazardous Areas with Permafrost Soils... 887

→ PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM

I. G. Kiselev, M. Yu. Kudrin, S. B. Komissarov, D. Ya. Monastyrsky

Results of Mixed Convection Modeling to Assess the Feasibility
of Using Jet Heaters by the Heating of Locomotive Depot Welding Stations..... 900

A. L. Penkin, A. A. Vorob'yov, A. A. Sobolev, S. A. Metlyakova, D. R. Vedernikova

A Study of the Intake Process in Gas Engines with External Mixing of Fuel 907

A. V. Tatarenko, Ye. V. Kazakevich, A. A. Privalov, S. A. Lopatin Basic Requirements for Means of Communication and Information Support for Medical Evacuation by Rail	918
A. A. Privalov, Ye. V. Kazakevich, I. A. Glukhov A Model of the Process of Information Exchange Between Subscribers of the PRC Network with a Common Communication Channel	929
Yu. N. Zuev, S. V. Chizhov, Yu. V. Avdey, A. A. Antoniuk Structural-Technological Aspect of Erection of Steel Reinforced Concrete Span Structure of the Road Bridge Over the Vetluga River	941
L. A. Losin, N. V. Bulycheva Comparative Analysis of Transport Demand and Offer in Models of Transport Systems of Urban Agglomerations.....	952
A. P. Badetsky, O. A. Medved', Ya. V. Kukushkina Methodology for the Application of Variable Standards by the Development of a Train Formation Plan	964
T. M. Shmanev Passenger Service Based on the Principle of "Clean Feet". A Series of Articles. Part 1	972
M. V. Shevlyugin, A. A. Kulikov, D. V. Semenova Reduction of Economic Losses in the Contact Network and Overhead Lines Electrified with Alternating Current	983
A. A. Zarifyan, A. M. Evstafyev Energy Consumption Quality Indicators in Collector and Asynchronous Traction Drives of AC Electric Locomotives	997
A. V. Agunov, I. A. Terekhin, D. I. Fesak, E. G. Abishov, I. A. Baranov Analysis of Devices for Autonomous Continuous Monitoring, Alerting and Elimination of Dangerous Gas Levels in Battery Rooms	1002
E. E. Miroshnichenko Prospective Applying of a Switched Reluctance Motor in the Traction System of a High-Speed Electric Train	1014
A. G. Otoka, O. V. Kholodilov Evaluation of the Performance of Magnetic Indicators for Magnetic Powder Control of Railway Rolling Stock Parts	1025



HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

A. L. Penkin, Ye. A. Ruppel, A. A. Vorob'yov, A. A. Sobolev, I. Yu. Novoselsky On the Influence of Fuel Bioethanol on the Operational Properties of Transport Engines	1032
I. K. Andronchev, A. I. Solyanik Neural Network and Chatbot "Valera" for Advanced Specialist Training	1038



УДК 378.929:624.5

Еще одна тайна большого цепного моста, или *Qui est le Capitaine Brun?*

А. С. Лейерман

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

Для цитирования: Лейерман А. С. Еще одна тайна большого цепного моста, или *Qui est le Capitaine Brun?* // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 791–800. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-791-800

Аннотация

Целью данного исследования является выявление новых данных, касающихся истории Института Корпуса инженеров путей сообщения в период 20–30-х годов XIX века; изучение биографического аспекта истории модельной мастерской ИКИПС на примере малоизученных фактов биографии Егора (Георгия) Францевича Брюна, с 1829 г. заведовавшего мастерской института. **Методом** исследования послужили сбор и анализ исторических данных с использованием опубликованных изданий, справочной литературы, архивных источников и музейного фонда. **В результате** исследования установлена точная дата поступления модели Египетского цепного моста в Институт Корпуса инженеров путей сообщения; восстановлено имя автора одной из старейших моделей в экспозиции Центрального музея железнодорожного транспорта РФ, наглядно демонстрирующей конструкцию первых металлических цепных мостов и отражающей начало развития новых направлений в мостостроении России XIX века; воссоздана биография инженера Е. Ф. Брюна периода 1820–1830-х гг. **Практическая значимость:** Материалы публикуются впервые и могут быть полезны как для дальнейших исследований специалистов по истории первого транспортного вуза России, так и для широкого круга заинтересованных читателей.

Ключевые слова: Мастерские ИКИПС, Цепной мост, Георгий Брюн, Египетский мост, модель моста.

Долгое время биография Егора (Георгия) Францевича Брюна, заведовавшего модельной мастерской ИКИПС с 1829 г., представляла для нас сплошные загадки. Вопросов для дальнейшего исследования осталось еще много, но 25 октября 2023 г. удалось сделать одно небольшое, но важное открытие, пролившее свет на историю модельной мастерской института и биографию Е. Ф. Брюна.

20 ноября 1809 г. император Александр I подписал Манифест об организации Института Кор-

пуса инженеров путей сообщения. При институте была открыта «особая зала», где предписано было хранение моделей всех важных в России и других землях сооружений, существующих или только предназначенных, равно как и машин, при гидравлических работах употребляемых. С 1813 г. в «особую залу» начали поступать первые модели. В том числе и модели, изготовленные самим Бетанкуром — первым инспектором института, который в совершенстве владел сто-



Рис. 1. Египетский мост через реку Фонтанку в Санкт-Петербурге. Металлический однопролетный мост цепной конструкции построен на пересечении Петергофского пр. (Лермонтовский пр.) с рекой Фонтанкой в 1826 г. Проект составлен инженером В. А. Христиановичем при консультации В. фон Треттера. Фото А. Ф. Лоренса, 1860-е гг.



Рис. 2. Чугунные скульптуры сфинксов, располагавшихся по сторонам от порталов, отливались на заводе К. Н. Берда по модели скульптора П. П. Соколова.

лярным, слесарным и токарным мастерством. Но в этом исследовании мы обратим внимание на другой период славной истории института — это период 1820–1830-х гг.

В 1822 г. Александр I назначил Главноуправляющим путями сообщения герцога Александра-Фридриха Виртембергского, участника войны 1812 г., который занимал этот пост до 22 июня 1833 г.

19 декабря 1823 г. было утверждено новое Положение Института Корпуса инженеров путей сообщения. Институт состоял под начальством Главноуправляющего путями сообщения. С этого года институт вместе с «особой залой» переводится в новое здание на Обуховском (ныне Московском) проспекте, д. 9.

«По положению, библиотека и кабинеты модельной и естественных наук должны быть составлены так, чтобы служить пособием не

только профессорам и воспитанникам Института, но вообще всем чинам ведомства путей сообщения.

Мастерские, до тех пор, по незначительности своей, не удовлетворявшие требованиям практического образования, были присоединены к главному мастерским, учрежденным при кондукторской школе. В них обучающиеся офицеры и воспитанники занимались практическим приложением преподаваемых предметов» [1, с. 44].

«4-го февраля 1824 года Генерал-Лейтенант Бетанкур, удрученный болезнями, уволен от занятий по Институту, а 14-го июля того же 1824 года, он скончался, оставив в ведомстве путей сообщения память о себе, как ревностном деятеле, обладавшем глубокими и обширными познаниями, умевшем ценить достоинства и способности воспитанных им молодых русских инженеров» [1, с. 46].

В числе первых воспитанников, получивших полный курс наук в Институте инженеров путей сообщения под руководством Августина Августиновича Бетанкура, — Брюн де Сент-Ипполит Георгий (1800–1856).

Его отец — кораблестроитель (родом из Франции), инспектор Главной контрольной экспедиции Адмиралтейств-коллегии генерал-майор Франц Яковлевич Брюн де Сент-Ипполит (1764–1820) и старший брат отца генерал-лейтенант флота Яков Яковлевич Брюн де Сент-Катарина (1759–1835), почетный член Адмиралтейского департамента (1809 г.), возглавлявший первый Корпус корабельных инженеров в России, внесший значительный вклад в развитие отечественного кораблестроения на Балтике, переехали в Санкт-Петербург и поступили на русскую службу в далеком 1799 г. по предложению Императора Павла I.

Брюн де Сент-Ипполит Георгий — Егор Францевич Брюн родился в Петербурге в 1800 г. Сведения о его биографии раннего периода пока остаются неисследованными, однако неудивительно, что обучение и карьера его складывались по линии ведомства путей сообщения.

В 1821 г. Брюн де Сент-Ипполит Георгий успешно выдержал экзамен (по полному курсу наук) в Институте инженеров путей сообщения и был переведен в старший офицерский класс, а в 1823 г. инженер Брюн окончил ИКИПС в офицерском чине [2, с. 36–37]

Из исторического очерка С. М. Житкова мы узнаем также, что по новому положению «окончившие с успехом полный курс наук производились в поручики на действительную службу, в которой казенно-коштатные должны были прослужить не менее 6 лет по ведомству путей сообщения... Новое положение вступило в действие с 1 января 1824 г.» [1, с. 45].

Однако, в соответствии с Общим штатом Российской Империи на 1824 г. в Общей росписи начальствующих и прочих должностных лиц

по всем управлениям в Российской Империи (по состоянию на 8 декабря 1823 г.), в разделе «Частные Управления путей сообщения, разделенные по округам, инженер 3-го класса в 1-м отделении по части портов VII округа Главного Управления путей сообщения» (далее ГУПС) Егор (Георгий) Францевич Брюн числится как подпоручик [3, с. 777].

Интересный факт открывается нам в связи с этим со страниц книги «История Института инженеров путей сообщения Императора Александра I за первое столетие его существования. 1810–1910», вышедшей в 1910 г. (составитель: инженер А. М. Ларионов) [4].

Нижеследующее объясняет нам, почему Е. Ф. Брюн в названном Адрес-календаре по состоянию на конец 1823 г. и последующий 1824 г. указан в чине подпоручика.

А. М. Ларионов пишет, что в 1821 г. было выпущено из института на службу 15 инженеров. Далее читаем, что производства в подпоручики в этом году не было из-за инцидента непослушания дежурному офицеру одного из воспитанников. За что нарушитель дисциплины был арестован. Остальные воспитанники, будучи свидетелями случившегося и приняв сторону своего товарища, попросили арестовать и их. В результате все портупей-прапорщики, выдержавшие экзамен в 1821 г., были переведены в офицерский класс без производства в прапорщики, а в 1823 г. выпущены не поручиками, как их предшественники, а подпоручиками [4, с. 65–66].

Соответственно, мы находим Е. Ф. Брюна поручиком уже в Общих росписях начальствующих и прочих должностных лиц по всем управлениям в Российской Империи (в 1-м отделении по части портов VII округа ГУПС) за 1825 [5, с. 770] и 1826 [6, с. 807] гг.

В Общих росписях чинов 1827 и 1828 годов Е. Ф. Брюн — поручик в Депо карт и планов ГУПС [7, с. 826], [8, с. 824], а в 1829 г. Георгий

Францевич Брюн — один из инженеров Депо карт и планов при ГУПС уже в чине капитана [9, с. 787].

Из архивных источников нам известно, что поручик Егор Францевич Брюн выступил с предложением об организации модельной мастерской в институте (Дело «О создании при институте мастерской», 1827–1831 гг.) [10, л. 1–3 с об.]. Главноуправляющий Александр Виртембергский одобрил это предложение, и мастерская была организована.

19 июня 1829 г. было утверждено составленное П. П. Базеном новое положение об институте [4, с. 85]. И в том же 1829 г. Егор Францевич Брюн был назначен заведующим модельной мастерской института [4, с. 87].

История модельной мастерской, организованной в 1829 г. является малоизученной, в ней могут представлять интерес имена мастеров, кратко упомянутые в первом каталоге моделей «музеума», впервые составленного в 1862 г. инженером Н. М. Соколовым. Эти каталоги есть в Центральном музее железнодорожного транспорта и в научно-технической библиотеке ПГУПС [11]. Многие модели в «Описании моделей Музеума Института Корпуса инженеров путей сообщения» оставлены без указания авторства и года поступления модели в «Музеум».

Остановимся подробнее на истории одной из моделей, представленных в каталоге музеума ИКИПС.

На странице 78 этого каталога под номером 78 числится модель цепного моста, называемого Египетским через р. Фонтанку в С.-Петербурге.

Пояснение гласит: «Хотя мост этот выстроен вскоре после построения Пантелеймоновского цепного моста, но строитель его Инженер Капитан Христианович ввел в его систему многие улучшения, которые в то время только что сделались известными. Важнейшее улучшение состояло в том, что привесные цепи сделаны касательными

к полотну — чему умеряется качка мостового полотна... Опоры, через которые проведены привесные цепи, сделаны из чугуна и имеют вид порталов Египетского стиля». В заключении говорится: «Отделка модели замечательна по изяществу, которым, впрочем, отличаются все модели работанные в бывших мастерских при Институте Корпуса Путей Сообщения» [11, с. 78–79]. Почему мы остановились именно на этой модели каталога, станет понятно позже.

В открытых источниках о капитане Брюне мы получаем довольно скудные сведения, в основном касающиеся недвижимости в Петербурге. Так, например, зафиксированы сведения о том, что инженер-майор путей сообщения Егор Францевич Брюн в 1834 г. построил дворовый П-образный флигель дома по адресу: Невский пр., д. 82. Далее находим замечательные для нас уточнения о том, что в 1837 г. согласно Адрес-календарю, Корпуса инженер, майор Егор Францевич Брюн занимает должность заведующего модельной мастерской Института Корпуса инженеров путей сообщения. Следуя этим замечаниям, обратимся вновь к названному Адрес-календарю за 1830-е гг., чтобы проверить информацию.

1831 г. (сост. на 7 дек. 1930 г.) XII Отделение. ГУПС. ИКИПС. «Заведывающий Модельного и мастерскими, Корп. Инж. Кап. Георгий Францевич Брюн» [12, с. 626]. 1832 г. (сост. чинов на 20 дек. 1831 г.) XII Отделение. ГУПС. ИКИПС. «Заведывающий Модельного и мастерскими, Корп. Инж. Майор Георгий Францевич Брюн» [13, с. 635]. В последующие годы с 1832 до 1837 гг. о точном местоположении по службе Егора Францевича мы пока говорить не будем. В справочнике за 1837 г. мы находим его в Отделении Главного Управления путей сообщения и публичных зданий в разделе «Учебные заведения» в Институте Корпуса инженеров путей сообщения как: «Завед. Модел. Маст., Корп. Инж. Mai. Егоръ Франц. Брюнь» [14, с. 849]. В Фондах



Рис. 3, 4. Модель Египетского моста выполнена в 1828 г. и передана Институту Корпуса инженеров путей сообщения в 1829 г. Автор: Егор Францевич Брюн – начальник модельной мастерской ИКИПС с 1829 г. Масштаб 1:56. Памятник науки и техники

ЦГИА СПб есть Дело за 1832 г., которое может сообщить нам обстоятельства командирования инженера Брюна в Новгород для обследования Вишерского канала и закрыть существующий пробел его биографии начала 30-х гг.

Вместе с тем размещенные в открытых источниках справки о перестройке лицевых домов и надворных флигелей, надстройке этажей домов по ряду других адресов в Санкт-Петербурге в период с начала 1830-х до середины 1840-х гг., а также обилие ссылок на архивные источники, где мы можем найти подтверждение наличия соответствующих чертежей и планов с подписью (майора, подполковника, а затем и полковника) Е. Ф. Брюна, дают основание думать, что Егор (Георгий) Францевич Брюн в обозначенный период входил в состав Комитета для строений и гидравлических работ. Мы посвятим этой теме следующие исследования, а пока вернемся к исследуемому периоду 1820–1830-х гг. и главному предмету исследования — к одной из тех моделей, которые упомянуты в каталоге «музеума» и оставались долгое время без авторства.

В Центральном государственном историческом архиве в деле за 1828–1829 гг. «О покупке у капитана Брюна модели большого цепного моста» [15] содержатся документы, свидетельствующие о приобретении Институту Корпуса

инженеров путей сообщения у «Сегоже Корпуса Капитана Брюна» (орфография источника сохранена) модели большого цепного моста.

В Рапорте на имя «Его Королевского Высочества Господина Главноуправляющего путей сообщения» герцога Виртембергского от 24 октября 1828 г. Директор Института Корпуса путей сообщения Генерал Майор Базен пишет: «Находя с своей стороны, что означенная модель может быть весьма полезна при преподавании в Институте курса построений, доставлением обучающимся подробных понятий о сооружениях сего рода, я осмеливаюсь испрашивать разрешения Вашего Королевского Высочества купить оную на счет экономических сумм Института» [15, л. 3].

Этому документу предшествует Рапорт самого Капитана Брюна от 6 октября 1828 г., направленный «Корпуса Инженеров Путей Сообщения Господину Подполковнику и кавалеру Адаму», в котором он пишет буквально следующее (орфография и пунктуация источника соблюдены): «Построенные в здешней Столице цепные Мосты, представляя весьма Любопытный предмет, как по новости введения сего рода служений в России, так и по различным опытам и наблюдениям которых присем были делаемы относительно систем цепных Мостов, пробы Железа и наконец влияния на оныя севернаго климата, —



Рис. 5, 6. Табличка, выполненная автором. Модель Египетского моста изготовлена в 1828 г. и передана Институту Корпуса инженеров путей сообщения в 1829 г.
Автор: Егор Францевич Брюн – начальник модельной мастерской ИКИПС с 1829 г.
Масштаб 1:56. Памятник науки и техники

по будило меня сделать Модель одного из сих Мостов. Модель сию, составленную с математическою точностию сходную во всех частях с Мостом существующим в натуре, — я имел счастье представлять Его Королевскому Высочеству, и заслужил весьма лестное для меня одобрение Его Высочества; поелику же Модель сия может быть особенно полезна при преподавании курса построений, и учащиеся по средством оной могут приобрести совершенно ясные и полные понятия о сооружениях сего рода, то я честь имею покорнейше просить Ваше Высокоблагородие, представить Начальству Института: не признает ли оное полезным, — приобрести сию Модель за Восемьсот рублей...» [15, л. 2].

Большим цепным мостом (никто из участников деловой переписки на 11 листах с оборотами не именует мост иначе как «Большой цепной мост») в то время могли называть как Пантелеймоновский, так и Египетский мост. При этом в первом путеводителе по музею ИКИПС, изданном в 1862 г., интересующих нас сведений мы не находим. В основном встречается формулировка: «Модель изготовлена в бывших модельных мастерских Института Корпуса инженеров путей сообщения». Аналогичными комментариями, отсылающими нас к мастерским ИКИПС, предпи-

саны обе модели: Пантелеймоновского и Египетского моста. Чтобы понять, модель какого моста была изготовлена капитаном Брюном и передана институту, обратимся к архивным источникам.

В Центральном государственном историческом архиве Санкт-Петербурга сохранилось дело «О сдаче генерал-майором Языковым подполковнику Соболевскому имущества кабинетов и лабораторий», 1849 г. [16], в котором есть список моделей [16, л. 3], поступивших до создания в 1829 г. мастерской. Согласно списку, это модели мостов: цепного моста на Фонтанке (Египетского) [16, л. 5 об.] и модель цепного пешеходного моста на Екатерининском канале (Львиный мост, или «Мост о четырех львах» на канале Грибоедова) [16, л. 5 об.].

В 1832 г. согласно делу «О создании в мастерских института моделей плотин и мостов» [17], находящемуся в Центральном государственном историческом архиве Санкт-Петербурга, по приказу П. П. Базена на выделенные средства от Главного управления путей сообщения изготовили 4 модели в модельных мастерских, в том числе цепного Пантелеймоновского моста на реке Фонтанке [17, л. 1].

Из этого может следовать, что в 1829 г. Е. Ф. Брюн продал институту изготовленную им в 1828 г. модель Египетского моста. Львиный

мост исключается по той причине, что он не мог называться «Большим цепным». Однако утвердительного ответа на наш вопрос не давал нам ни один из приведенных источников.

Удивительно прикоснуться к истории, несмотря на то, что «большого цепного» моста давно нет, от него остались только молчаливые сфинксы. Его миниатюра (1828 г.), ровесница моста 1825–1826 гг., спустя почти 2 столетия прекрасно сохранилась и обосновалась в Музее мостов — филиале Центрального музея железнодорожного транспорта Российской Федерации. Как, впрочем, продолжает жить в архиве и «Дело Брюна» о покупке у него институтом модели «большого цепного моста». Но, как и сфинксы на месте прежнего Египетского моста, это дело умалчивает имя моста, модель которого была передана институту капитаном Брюном в 1828–1829 гг.

Для окончательного решения этого вопроса, потребовался еще один шаг — посетить Музей мостов — филиал Центрального музея железнодорожного транспорта РФ, еще раз внимательно взглянуть на модель Египетского моста. И решение оказалось именно там! На аутентичной табличке, изготовленной в то же время, что и сама модель, мелким шрифтом под основной надписью указано имя автора модели: *par le Capitaine Brun*, что означает: «автор: Капитан Брюн». Подписанная автором, модель Брюна долгие годы сама говорила за себя, как исторический документ. И наконец, (25 октября 2023 г.) этот документ прочитан!

24 мая 1829 г. Генерал-Майор Базен пишет своему помощнику Генерал-Майору Роземону (орфография и пунктуация источника сохранены): «Покорнейше прошу Ваше Превосходительство, приказать поставить в зале моделей на приличном месте купленную у Капитана Брюна за восемь сот рублей модель большого цепного моста и включить в опись моделей с означением материи, формы, цены и времени покупки оной» [15, л. 11].

Заключение

Модель Египетского моста, выполненная в 1828 г. инженером Е. Ф. Брюном, приобретенная у него Институтом Корпуса инженеров путей сообщения в 1829 г. и установленная в зале моделей 24 мая 1829 г., ярко демонстрирует конструкцию первых металлических цепных мостов и отражает начало развития новых направлений в мостостроении России XIX века. На данный момент модель Египетского цепного моста, утраченного в 1905 году, сама атрибутирована со статусом памятника науки и техники, но до сих пор считалось (о чем гласила современная табличка с описанием модели без имени автора), что выполнена она в 1830-е гг. в мастерских ИКИПС.

В результате исследования установлена точная дата поступления модели Египетского цепного моста в Институт Корпуса инженеров путей сообщения. А имя автора одной из самых изящных моделей в экспозиции Центрального музея железнодорожного транспорта РФ — Егора (Георгия) Францевича Брюна — заведующего модельной мастерской ИКИПС — спустя долгие годы возвращено из забвения на страницы истории славного вуза!

Библиографический список

1. Житков С. М. Институт инженеров путей сообщения императора Александра I: Ист. очерк / Сост. С. М. Житков. — СПб.: тип. М-ва пут. сообщ. (т-ва И. Н. Кушнерев и К°), 1899. — VI, 500 с.
2. Список окончивших курс в Институте Инженеров Путей Сообщения Императора Александра I за сто лет 1810–1910. СПб., 1910. — 225 с.
3. Частные Управления путей сообщения, разделенные по округам // Месяцослов с росписью чиновных особ или общий штат Российской империи на лето от Рождества Христова 1824: Адрес-календарь. Часть I. — СПб.: Имп. Академия наук, 1824. — XL, 884, 28 с.
4. Ларионов А. М. История Института инженеров путей сообщения Императора Александра I за первое столетие его существования. 1810–1910 / Сост. инж. пут. сообщ. А. М. Ларионов. — СПб.: тип. Ю. Н. Эрлих (влад. А. Э. Коллинс), 1910. — VIII, 409 с. — С. 27.

5. Частные Управления путей сообщения, разделенные по округам // Месяцослов с росписью чиновных особ или Общий штат Российской империи на лето от Рождества Христова 1825. Часть I: Адрес-календарь. — СПб.: Имп. Академия наук, 1825. — XXXII, 880, 15 с.

6. Частные Управления путей сообщения, разделенные по округам // Месяцослов с росписью чиновных особ или Общий штат Российской империи на лето от Рождества Христова 1826. Часть I: Адрес-календарь. — СПб.: Имп. Академия наук, 1826. — XXXIX, 920, XVII с.

7. Депо карт и планов Главного Управления путей сообщения // Месяцослов с росписью чиновных особ или Общий штат Российской империи на лето от Рождества Христова 1827. Часть I: Адрес-календарь. — СПб.: Имп. Академия наук, 1827. — XL, 978, 4 с.

8. Депо карт и планов Главного Управления путей сообщения // Месяцослов с росписью чиновных особ или Общий штат Российской империи на лето от Рождества Христова 1828. Часть I: Адрес-календарь. — СПб.: Имп. Академия наук, 1828. — XL, 980, 16 с.

9. Депо карт и планов Главного Управления путей сообщения // Месяцослов с росписью чиновных особ или Общий штат Российской империи на лето от Рождества Христова 1829. Часть I: Адрес-календарь. — СПб.: Имп. Академия наук, 1829. — XLVIII, 923 с.

10. ЦГИА СПб. Ф. 381. Оп. 13. Д. 181.

11. Описание моделей Музеума Института Корпуса инженеров путей сообщения / Сост. Н. М. Соколов. — СПб.: тип. Р. Голике, 1862. — VI, 274, XIV с.

12. Главное Управление путей сообщения. Учебные заведения: Институт Корпуса Путей Сообщения // Месяцослов с росписью чиновных особ или Общий штат Российской империи на лето от Рождества Христова 1831 (Сост. на 7 декабря 1930 г.) Часть I: Адрес-календарь. — СПб.: Имп. Академия наук, 1831. — XLIX, 725, 24 с.

13. Главное Управление путей сообщения. Учебные заведения: Институт Корпуса Путей Сообщения // Месяцослов с росписью чиновных особ или Общий штат Российской империи на лето от Христова 1832 (Состояние чинов на 20 дек. 1831 г.) Часть I: Адрес-календарь. — СПб.: Имп. Академия наук, 1832. — XLVIII, 744, XL с.

14. Главное Управление путей сообщения и публичных зданий. Учебные заведения: Институт Корпуса Путей Сообщения // Месяцослов с росписью чиновных особ или общий штат Российской империи на лето от Рождества Христова 1837. Часть I: Адрес-календарь. — СПб.: Имп. Академия наук, 1837. — LIII, 1010, LXI с.

15. ЦГИА СПб. Ф. 381. Оп. 13. Д. 236.

16. ЦГИА СПб. Ф. 381. Оп. 13. Д. 2089.

17. ЦГИА СПб. Ф. 381. Оп. 13. Д. 503.

Дата поступления: 26.10.2023

Решение о публикации: 25.11.2023

Контактная информация:

ЛЕЙЕРМАН Анна Сергеевна — инженер, каф.

«Изыскания и проектирование железных дорог», редактор газеты «Наш путь»; leierman@pgups.ru

Another Mystery of the Big Chain Bridge, or Qui est le Capitaine Brun?

A. S. Leyerman

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

For citation: Leyerman A. S. Another Mystery of the Big Chain Bridge, or Qui est le Capitaine Brun? // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 791–800. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-791-800

Summary

Purpose: To uncover new data related to the history of the Institute of Railway Engineers during the 1820s–1830s, exploring the biographical aspect of the history of the model workshop at the Institute of Railway Engineers through the little-known facts of the biography of Egor (Georgy) Frantsevich Brun, who was in charge of the workshop of the institute since 1829. **Methods:** The collection and analysis of historical data using published

publications, reference literature, archival sources and the museum fund. **Results:** The precise date of the arrival of the model of the Egyptian chain bridge at the Institute of Railway Engineers has been established. The authorship of one of the oldest models in the exposition of the Central Museum of Railway Transport of the Russian Federation has been identified, which vividly demonstrates the construction of the first metal chain bridges and reflects the beginning of the development of new directions in bridge construction in Russia in the 19th century. The biography of the engineer E.F. Brun during the 1820s–1830s has been reconstructed. **Practical significance:** The materials are published for the first time and can be useful both for further research by specialists in the history of the first transport university of Russia, and for a wide range of interested readers.

Keywords: IKIPS workshops, Model, George Brun, chain bridge, Egyptian bridge, Bridge model.

References

1. Zhitkov S. M. *Institut inzhenerov putey soobshcheniya imperatora Aleksandra I : Ist. ocherk* [Institute of Railway Engineers of Emperor Alexander I: Historical Essay]. St. Petersburg: tip. M-va put. soobshch. Publ. (t-va I. N. Kushnerev i K°), 1899, VI, 500 p. (In Russian)
2. *Spisok okonchivshikh kurs v Institute Inzhenerov Putey Soobshcheniya Imperatora Aleksandra I za sto let 1810–1910* [List of Graduates of the Institute of Railway Engineers of Emperor Alexander I for One Hundred Years 1810–1910]. St. Petersburg, 1910, 225 p. (In Russian)
3. Chastnye Upravleniya putey soobshcheniya, razdelennye po okrugam [Private Administrations of Communications, Divided by Districts]. *Mesyatsoslov s rospis'yu chinovnykh osob ili obshchiy shtat Rossiyskoy imperii na leto ot Rozhdestva Khristova 1824: Adres-kalendar' . Chast' I* [Monthly Word with a List of Official Persons or General Staff of the Russian Empire for the Summer from the Birth of Christ 1824: Address Calendar. Part I]. St. Petersburg: Imp. Akademiya nauk Publ., 1824, XL, 884, 28 p. (In Russian)
4. Larionov A. M. *Istoriya Instituta inzhenerov putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I za pervoe stoletie ego sushchestvovaniya. 1810–1910* [History of the Institute of Railway Engineers of Emperor Alexander I for the First Century of Its Existence. 1810–1910]. St. Petersburg: tip. Yu. N. Erlikh (vlad. A. E. Kollins), 1910, VIII, 409 p., p. 27. (In Russian)
5. Chastnye Upravleniya putey soobshcheniya, razdelennye po okrugam [Private Administrations of Communications, Divided by Districts]. *Mesyatsoslov s rospis'yu chinovnykh osob ili Obshchiy shtat Rossiyskoy imperii na leto ot Rozhdestva Khristova 1825. Chast' I: Adres-kalendar' . Chast' I* [Monthly Word with a List of Official Persons or General Staff of the Russian Empire for the Summer from the Birth of Christ 1825. Part I: Address Calendar]. St. Petersburg: Imp. Akademiya nauk Publ., 1825, XXXII, 880, 15 p. (In Russian)
6. Chastnye Upravleniya putey soobshcheniya, razdelennye po okrugam [Private Administrations of Communications, Divided by Districts]. *Mesyatsoslov s rospis'yu chinovnykh osob ili Obshchiy shtat Rossiyskoy imperii na leto ot Rozhdestva Khristova 1826. Chast' I: Adres-kalendar' . Chast' I* [Monthly Word with a List of Official Persons or General Staff of the Russian Empire for the Summer from the Birth of Christ 1826. Part I: Address Calendar]. St. Petersburg: Imp. Akademiya nauk Publ., 1826, XXXIX, 920, XVII p. (In Russian)
7. Depo kart i planov Glavnogo Upravleniya putey soobshcheniya [Depot of Maps and Plans of the Main Administration of Communications]. *Mesyatsoslov s rospis'yu chinovnykh osob ili Obshchiy shtat Rossiyskoy imperii na leto ot Rozhdestva Khristova 1827. Chast' I: Adres-kalendar' . Chast' I* [Monthly Word with a List of Official Persons or General Staff of the Russian Empire for the Summer from the Birth of Christ 1827. Part I: Address Calendar]. St. Petersburg: Imp. Akademiya nauk Publ., 1827, XL, 978, 4 p. (In Russian)
8. Depo kart i planov Glavnogo Upravleniya putey soobshcheniya [Depot of Maps and Plans of the Main Administration of Communications]. *Mesyatsoslov s rospis'yu chinovnykh osob ili Obshchiy shtat Rossiyskoy imperii na leto ot Rozhdestva Khristova 1828. Chast' I: Adres-kalendar' . Chast' I* [Monthly Word with a List of Official

Persons or General Staff of the Russian Empire for the Summer from the Birth of Christ 1828. Part I: Address Calendar]. St. Petersburg: Imp. Akademiya nauk Publ., 1828, XL, 980, 16 p. (In Russian)

9. Depo kart i planov Glavnogo Upravleniya putey soobshcheniya [Depot of Maps and Plans of the Main Administration of Communications]. *Mesyatsoslov s rospis'yu chinovnykh osob ili Obshchiy shtat Rossiyskoy imperii na leto ot Rozhdestva Khristova 1829. Chast' I: Adres-kalendar'* [Monthly Word with a List of Official Persons or General Staff of the Russian Empire for the Summer from the Birth of Christ 1829. Part I: Address Calendar]. St. Petersburg: Imp. Akademiya nauk Publ., 1829, XLVIII, 923 p.

10. *TsGIA SPb. F. 381. Op. 13. D. 181* [Central State Historical Archive St. Petersburg. F. 381. Op. 13. D. 181]. (In Russian)

11. *Opisanie modeley Muzeuma Instituta Korpusa inzhenerov putey soobshcheniya; sost. N. M. Sokolov* [Description of Models of the Museum of the Institute of the Corps of Railway Engineers; compiled by N. M. Sokolov]. St. Petersburg: typ. R. Golike Publ., 1862, VI, 274, XIV p. (In Russian)

12. Glavnoe Upravlenie putey soobshcheniya. Uchebnye zavedeniya: Institut Korpusa Putey Soobshcheniya [Main Administration of Communications. Educational Institutions: Institute of the Corps of Communications]. *Mesyatsoslov s rospis'yu chinovnykh osob ili Obshchiy shtat Rossiyskoy imperii na leto ot Rozhdestva Khristova 1831 (Sost. na 7 dekabrya 1930 g.) Chast' I: Adres-kalendar'* [Monthly Word with a List of Official Persons or General Staff of the Russian Empire for the Summer from the Birth of Christ 1831 (Compiled on December 7, 1830). Part I: Address Calendar]. St. Petersburg: Imp. Akademiya nauk Publ., 1831, XLIX, 725, 24 p. (In Russian)

13. Glavnoe Upravlenie putey soobshcheniya. Uchebnye zavedeniya: Institut Korpusa Putey Soobshcheniya [Main Administration of Communications. Educational Institutions:

Institute of the Corps of Communications]. *Mesyatsoslov s rospis'yu chinovnykh osob ili Obshchiy shtat Rossiyskoy imperii na leto ot Khristova 1832 (Sostoyanie chinov na 20 dek. 1831 g.) Chast' I: Adres-kalendar'* [Monthly Word with a List of Official Persons or General Staff of the Russian Empire for the Summer from Christ 1832 (State of Officials on December 20, 1831). Part I: Address Calendar]. St. Petersburg: Imp. Akademiya nauk Publ., 1832, XLVIII, 744, XL p. (In Russian)

14. Glavnoe Upravlenie putey soobshcheniya i publichnykh zdaniy. Uchebnye zavedeniya: Institut Korpusa Putey Soobshcheniya [Main Administration of Communications and Public Buildings. Educational Institutions: Institute of the Corps of Communications]. *Mesyatsoslov s rospis'yu chinovnykh osob ili obshchiy shtat Rossiyskoy imperii na leto ot Rozhdestva Khristova 1837. Chast' I: Adres-kalendar'* [Monthly Word with a List of Official Persons or General Staff of the Russian Empire for the Summer from the Birth of Christ 1837. Part I: Address Calendar]. St. Petersburg: Imp. Akademiya nauk Publ., 1837, LIII, 1010, LXI p. (In Russian)

15. *TsGIA SPb. F. 381. Op. 13. D. 236* [Central State Historical Archive St. Petersburg. F. 381. Op. 13. D. 236]. (In Russian)

16. *TsGIA SPb. F. 381. Op. 13. D. 2089* [Central State Historical Archive St. Petersburg. F. 381. Op. 13. D. 2089]. (In Russian)

17. *TsGIA SPb. F. 381. Op. 13. D. 503* [Central State Historical Archive St. Petersburg. F. 381. Op. 13. D. 503]. (In Russian)

Received: October 26, 2023

Accepted: November 25, 2023

Author's information:

Anna S. LEYERMAN — Engineer, Department of “Research and Design of Railways”, Editor of the Newspaper “Our Way”; leierman@pgups.ru

УДК 556:628.29

Основные расчетные гидрологические характеристики систем очистки поверхностного стока в северо-западной зоне России

Ю. А. Канцибер, А. Б. Пономарев, В. И. Штыков

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

Для цитирования: Канцибер Ю. А., Пономарев А. Б., Штыков В. И. Основные расчетные гидрологические характеристики систем очистки поверхностного стока в северо-западной зоне России // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 801–810. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-801-810

Аннотация

Цель: Действующие в России нормативные и методические документы, касающиеся очистки поверхностного стока с селитебных территорий, не дают разъяснений по вопросу эффективности работы системы очистки с точки зрения допускаемой ими возможности загрязнения водных объектов. Не исследованы вероятность возникновения загрязнения и кратность разбавления неочищенных стоков. Цель состоит в разработке способа определения гидрологических характеристик стока, необходимых для вероятностной оценки кратности разбавления, допустимых концентраций и сбросов загрязненных поверхностных вод. **Методы:** На основании данных наблюдений четырнадцати метеостанций северо-запада России исследована вероятностная связь характеристик стока с застроенных территорий и реки-водоприемника, учитывающая основы теории вероятности и гидрологических расчетов минимального стока. Проведены расчеты, и установлены зависимости числа дней с осадками и их относительной суммы в теплый период года от максимального суточного слоя осадков. Найдена математическая связь между повторяемостью дождя и числом возможных случаев загрязнения водного объекта. **Результаты:** Разработан способ расчета вероятных значений характеристик осадков, минимального стока воды в реке-водоприемнике и кратности разбавления загрязняющих веществ в зависимости от допустимой повторяемости негативных последствий от загрязнения речных вод и коэффициента корреляции обеспеченностей минимального стока воды с застроенных территорий и в реке-водоприемнике. **Практическая значимость:** Способ расчета гидрологических характеристик стока позволит более обоснованно и точнее определить необходимую степень очистки сточных вод, производительность и параметры очистных сооружений, а в ряде случаев — снизить степень загрязнения водотоков.

Ключевые слова: Поверхностный сток, очистные сооружения, загрязнение водного объекта, водный объект, осадки, гидрологические характеристики, сток, расходы воды, половодье, дождевой паводок, кратность разбавления, обеспеченность, повторяемость, надежность.

Введение

При проектировании систем очистки сточных вод наряду с содержанием загрязняющих веществ (ЗВ) в сбросных и речных водах должны определяться расчетные гидрологические характеристики стока (ГХ) с селитебных и производственных территорий (ЗТ), а также в реках-водоприемниках.

Однако в действующих на территории РФ нормативно-методических документах [1, 2] рекомендуемые величины расчетных обеспеченностей расходов и объемов речного стока и стока с ЗТ не увязаны между собой и не имеют достаточно объективных климатических, гидрологических и технико-экономических обоснова-

ний. Конструкции и параметры очистных сооружений (ОС) рассчитывают в основном на прием и очистку поверхностного стока в маловодные и средние по водности годы, что, естественно, должно привести к увеличению загрязнения водных объектов при сбросе максимального стока с ЗТ через разделительные камеры (даже при использовании регулирующих резервуаров), считая его сравнительно чистым, т. е. имеющим меньшее содержание загрязняющих веществ в воде. Таким образом, занижая расчетные расходы загрязненных вод, поступающих на ОС, мы уменьшаем затраты на их строительство и эксплуатацию, но в то же время увеличиваем экологический ущерб от загрязнения водных объектов.

В качестве расчетного (фонового) расхода **речного** стока, определяемого выше выпуска сточных вод в реки-водоприемники (Q_p), принимается, как правило, **минимальный среднемесячный (30-дневный) расход 95 % обеспеченности** ($p_m = 95 \%$) в лимитирующие периоды зимней и летней межени перед половодьем и дождевым паводком, которые происходят в пределах водосбора ЗТ [1]. Они находятся в соответствии с СП 529.132800.2023 [3] и пособием [4], путем использования данных наблюдений, расчетных формул, картограмм и т. д.

Обеспеченность (p_c) расхода **талых** вод с ЗТ, поступающих в водоток и на ОС, согласно [1] рекомендуется принимать в пределах 50–95 % обеспеченности, что, как отмечалось выше, допускает возможность загрязнения речных вод в многоводные годы. Поэтому учитывая высокую степень загрязненности талых вод, необходимо, очевидно, ориентироваться на их **полное** отведение на ОС, предусматривая, по нашему мнению, определение их производительности и параметров по расчетному расходу обеспеченностью менее 50 % (при его превышении расхода дождевых вод, отправляемого на ОС).

Обеспеченность предельного суточного расхода очищаемых **дождевых** вод с ЗТ (q_c) устанавливается исходя из того, что не менее 70 % **среднегодового** объема стока, наблюдаемого при выпадении осадков небольшой интенсивности, должна отводиться на ОС. Однако в зависимости от водности года, вида и степени загрязнения территории ЗТ объемы наиболее загрязненного стока поверхностных вод могут колебаться от 50 до 100 % его годового объема [5].

Методы

Результаты расчетов, выполненных в соответствии с рекомендациями [1] по данным справочников [6–8] для 14 метеостанций Северо-Запада РФ (СЗ РФ), показали, что 70% среднегодовому объему стока загрязненных поверхностных вод будут соответствовать расходы воды с ЗТ обеспеченностью $p_c > 99 \%$ или периоду однократного превышения расчетной интенсивности дождя $P = 0,07–0,11$ года. При этом максимальный суточный слой осадков ($h_{70\%}$), от величины которого зависит расход **дождевых** вод, подаваемый на ОС, изменяется в пределах от 11 до 15 мм (табл. 1).

Необходимо отметить, что накапливаемые суммы объемов стока в расчетах были отнесены к верхнему пределу диапазона изменения суточного слоя осадков, а не к среднему их значению [1]. Невыполнение этого достаточно обоснованного условия приводит к занижению величин максимального суточного слоя осадков и расхода дождевого стока, направляемого на ОС, примерно на 15–20 %.

В соответствии с рекомендациями [1, 5]:

$$q_c = 10 h_{70\%} \varphi_q F_{\text{л}}, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (1)$$

где φ_q — средневзвешенный коэффициент стока дождевых вод;

$F_{\text{л}}$ — площадь стока, отводимого дождевой канализацией, га.

Таблица 1. Характеристики осадков в теплый период года в северо-западной зоне РФ

Метеостанция	X , мм	T , сут	Число дней с осадками		$h_{p=1\text{год}}$, мм	$h_{70\%}$, мм	P , год
			> 0	$\geq 0,1$			
Мурманск	255	178	104	77	19	11,6	0,11
Мончегорск	273	169	94	74	23	11,7	0,09
Лоухи	295	175	90	72	21	12,2	0,1
Паданы	326	194	107	90	20	11	0,08
Олонец	396	205	115	95	23	13,8	0,09
Выборг	450	215	130	110	26	13	0,07
Санкт-Петербург	418	222	108	100	24	12,2	0,07
Ефимовская	473	210	125	105	28	14,4	0,08
Новгород	402	218	115	99	27	13	0,08
Боровичи	413	214	123	108	23	12,2	0,08
Псков	419	226	129	104	31	13	0,09
Опочка	460	220	140	115	30	13,3	0,08
Смоленск	457	230	122	98	28	13,8	0,08
Тверь	444	215	123	97	27	12,6	0,08

Примечание. X — сумма осадков за теплый период года, продолжительность, которого (T) ограничена датами перехода температуры воздуха выше (весной) и ниже (осенью) 0°C .

Предельный суточный расход талых и дождевых вод, направляемых на ОС из разделительной камеры в коллекторе для полной раздельной системы канализации, устанавливается также в зависимости от коэффициента разделения расхода воды с ЗТ, т. е.:

$$q_c = K_{oc} q_{p\%}, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (2)$$

где K_{oc} — коэффициент разделения расхода воды с ЗТ, поступающего в разделительную камеру на коллекторе;

$q_{p\%}$ — максимальный суточный расход талых (дождевых) вод $p\%$ обеспеченности, который формируется на ЗТ и поступает в коллектор до разделительной камеры, $\text{м}^3/\text{сут}$.

Таким образом, величина коэффициента разделения расхода дождевых вод с ЗТ будет равна:

$$K_{oc} = 10 h_{70\%} \Phi_q \frac{F_{\text{л}}}{q_{p\%}}. \quad (3)$$

Максимальный суточный расход талых (дождевых) вод $p\%$ обеспеченности, поступающий в коллектор до разделительной камеры, определяется в соответствии с рекомендациями [1, 9]. Причем его обеспеченность должна соответствовать периоду однократного превышения расчетного расхода талых (дождевых) вод, задаваемому в гидравлических расчетах коллектора.

При **полном** (100 %) отведении среднегодового объема загрязненного дождевого стока на ОС, принимаемом, как правило, для территорий предприятий 2 группы, $p_c \leq 63\%$ ($P \geq 1$ года) [1, 5]. Максимальный суточный слой осадков для $P = 1$ году ($h_{p=1\text{год}}$) на территории СЗ РФ колеблется в пределах от 19 до 31 мм. Для многоводных лет 5–10 % обеспеченности ($P \approx 20$ –10 лет) он возрастает в 1,5–2 раза и более.

Аналогичные расчеты максимальных суточных осадков также проведены для условий отведения на ОС 50, 80, 90 и 100 % среднегодового объема поверхностного стока с ЗТ. Причем рас-

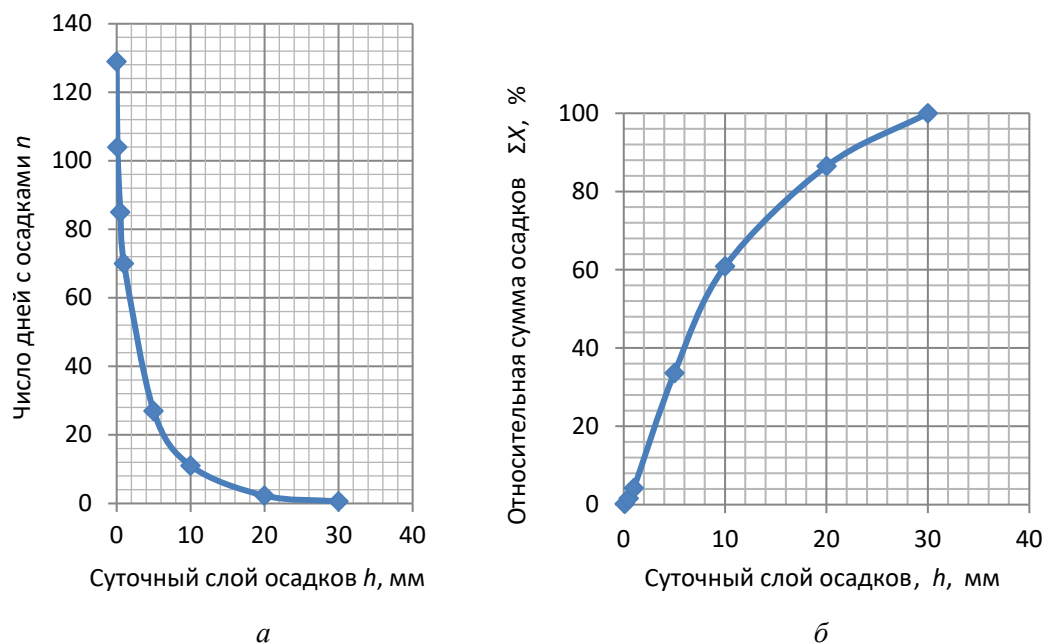


Рис. 1. Зависимости $\Sigma X = f(h)$ (б) и $n = f(h)$ (а). Псков (пример)

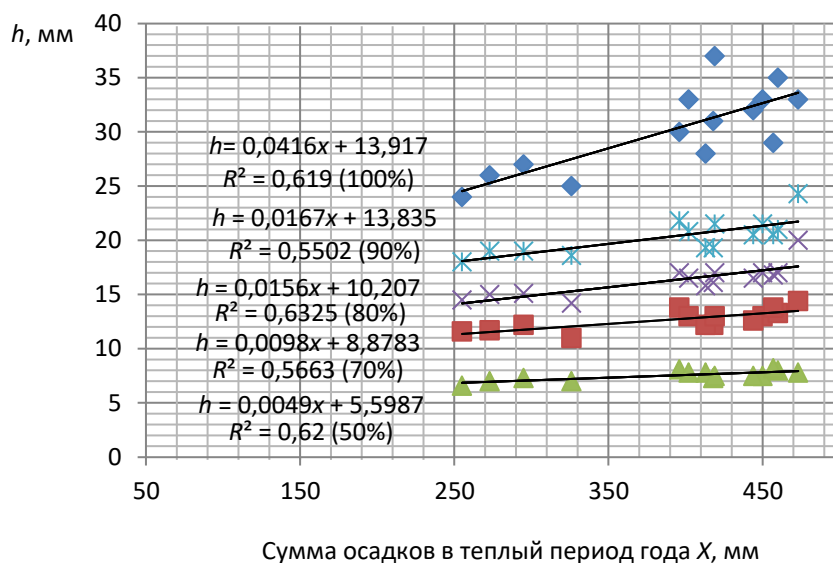


Рис. 2. Зависимости между максимальными суточными слоями осадков (h) и суммой осадков в теплый период года (X) при отведении на ОС 100, 90, 80, 70, 50 % среднегодового объема стока для территории СЗ РФ

четные характеристики осадков для каждой метеостанции определены по построенным графикам связи числа дней с осадками (n) и их относительной суммы (ΣX , %) с максимальным суточным слоем осадков в теплый период (рис. 1).

Связи между максимальными суточными слоями осадков и их суммой в теплый период

года (X) оказались достаточно тесными (рис. 2). Поэтому уравнения регрессии, приведенные в поле рис. 2, можно использовать для практических расчетов суточных осадков (при отведении на ОС от 50 до 100 % среднегодового объема поверхностных вод) с ошибкой в среднем не более 10 %.

Результаты

Обеспеченность тесно связана с **повторяемостью** величины гидрологической характеристики, т. е. с числом лет, в течение которых она встречается (превышается) в среднем 1 раз [3]. При проектировании систем водоотведения и очистки стока она также может характеризовать продолжительность периода «бесперебойной» их работы, когда в расчетном (контрольном) створе водотока (или в местах выпуска сточных вод) превышение ПДК загрязняющих веществ в речной воде будет наблюдаться в среднем 1 раз. В этом единичном или многократных случаях создаются негативные экономические и экологические последствия от загрязнения речных вод, наблюдаемые, как правило, в лимитирующие меженные периоды с **минимальным** стоком воды в водоприемнике.

В связи с частым выпадением в теплый период года слабоинтенсивных осадков и прохождением вызванных ими сравнительно небольших дождевых паводков, при расчетах параметров ливневой канализации и ОС наряду с обеспеченностью гидрологической характеристики используется период однократного превышения расчетной интенсивности дождя (P , год), который зависит от среднего числа дней с осадками, превышающими расчетную суточную интенсивность их выпадения (n , сут), а также от продолжительности теплого периода года (T , сут), т. е.:

$$P = \left(\frac{T}{365} \right) \frac{1}{n}. \quad (4)$$

Отметим, что, по данным климатических справочников [6–8], в южных районах ЕТ РФ отношение $\left(\frac{T}{365} \right) \approx 0,9 - 1$. В северных оно уменьшается до 0,4–0,5.

Между обеспеченностью (p) и периодом однократного превышения (P) существует зависи-

мость, выраженная законом распределения вероятностей Пуассона [1, 5, 10]:

$$p \approx (1 - e^{-1/P}) \cdot 100, \% \quad (5)$$

или

$$P \approx \frac{1}{1 - \ln \frac{1}{1 - 0,01 p}}.$$

Тогда обеспеченность безотказной (бесперебойной) работы ОС, т. е. когда отсутствует загрязнение речных вод в контрольном створе, или так называемая **гидроэкологическая надежность ОС** будет равна:

$$P_{\text{гн}} = (100 - p), \% \quad (6)$$

В табл. 2 приведены результаты расчетов обеспеченности бесперебойной работы ОС и числа возможных случаев загрязнений водного объекта **дождевыми** паводками за период эксплуатации ОС в зависимости от продолжительности периода однократного превышения или повторяемости загрязнения речных вод. Из нее следует, что с увеличением числа случаев загрязнения речных вод уменьшается обеспеченность бесперебойной работы или надежность ОС.

Допустимая повторяемость или период однократного повышения расчетной интенсивности дождя, так же как и расчетная обеспеченность гидрологических характеристик, которая определяется при обосновании конструкций и параметров гидротехнических сооружений, должна устанавливаться в результате сравнительных технико-экономических расчетов в зависимости от характера использования водного объекта и капитальности сооружения, в частности системы водоотведения и очистки. При этом возможное число случаев загрязнения водного объекта (N_{Σ}) за весь период эксплуатации ОС (M) составит:

Таблица 2. Период однократного превышения и обеспеченность бесперебойной работы очистных сооружений (дождевые паводки)

Повторяемость или период однократного превышения (P), год	Обеспеченность, p, %	Обеспеченность бесперебойной работы ОС (p _{см}), %	Число возможных случаев загрязнения водного объекта в теплый период года (N _Σ)
30	3,2	96,8	0,9
10	9,5	90,5	2,7
5	18	82	5,5
2	39	61	14
1	63	37	27
0,5	86	14	55
0,2	99	1	137
0,1	99,9	0,1	274
0,05	99,99	0,01	548

Примечание. T = 200 сут, M = 50 годам.

– для неоднократно повторяющихся в течение теплого периода года **дождевых паводков** учетом формулы (3):

$$N_{\Sigma} = Mn = \frac{MT}{365P}; \quad (7)$$

– при однократном в течение года событии, характерном, например, для **весеннего половодья**, величина N_Σ, очевидно, составит:

$$N_{\Sigma} = \frac{M}{N} = \frac{Mp}{100}, \quad (8)$$

где M — проектный период эксплуатации ОС, год;

$$N = \frac{100}{p} \text{ — повторяемость при обеспеченно-}$$

сти p ≤ 50 %, год [3].

Формулу (7) следует также использовать при определении суммарных объемов дождевого стока воды и масс ЗВ, необходимых для оценки вероятного экологического ущерба от загрязнения водного объекта.

Как известно, талый, дождевой или дренажный сток с ЗТ недостаточно тесно связан с пред-

шествующим минимальным стоком воды в реке-водоприемнике. Коэффициент их корреляции (r) изменяется, как правило, в пределах от 0,3 до 0,7 [9, 10]. В работе [11] представлены зависимости, которые позволяют определить:

– обеспеченность совместного появления значений характеристик стока с ЗТ и в реке, а также повторяемость загрязнения речных вод и надежность работы ОС;

– обеспеченность минимального расхода воды в реке при заданной обеспеченности расхода сбрасываемых очищенных стоков с ЗТ (p_с > p_{см}), допустимой повторяемости негативных последствий от загрязнения речных вод и коэффициента корреляции ГХ.

В качестве примера в табл. 3 приведены результаты расчетов обеспеченности минимального расхода воды в реке-водоприемнике, выполненные по этим зависимостям.

Кратность основного разбавления сточных вод до контрольного створа в водотоке, необходимая для расчетов допустимой концентрации ЗВ, НДС и др., определяется отдельно для весеннего половодья и летнего (летне-осеннего) дождевого паводка по формулам, приведенным в рекомендациях [1, 12].

Таблица 3. Обеспеченность минимальных расходов воды в реке при обеспеченности расхода сбрасываемого очищенного дождевого стока $p_c = 90$ и 99 %

Допустимая повторяемость или период однократного превышения, год	$p_{cm}, \%$	Обеспеченность минимальных расходов воды в реке при различной корреляции с расходами дождевых вод с ЗТ, %				
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
0,2	1/1	1,1/1	1,1/1	1,1/1	1/1	1/1
0,5	14	15,5/14,1	15/14,1	14,7/14,1	14,4/14	14/14
2	61	68/61,6	66/61,5	64/61,3	62,6/61,1	61/61
5	82	91/82,8	88,6/82,7	86,3/82,4	84,1/82,2	82/82
10	90,5	/91,4	97,8/91,2	95,2/91	92,8/90,7	90,5/90,5
20	95,1	/96	/95,8	/95,6	98/95,3	95,1/95,1

Примечания. 1. Перед дефисом приведены результаты расчетов при $p_c = 90$ %, после — при $p_c = 99$ %.

2. p_{cm} — обеспеченность совместного появления стока с ЗТ и в реке.

Таблица 4. Результаты расчетов кратности разбавления при обеспеченности расхода сбрасываемого очищенного дождевого стока $p_c = 90$ и 99 %

Допустимая повторяемость или период однократного превышения, год	$p_{cm}, \%$	$p_m, \%$	Расходы воды, m^3/c		Кратность основного разбавления сточных вод
			в реке выше выпуска сточных вод (Q_{mr})	в устье коллектора очищенных сточных вод (q_c)	
0,5	14	14,4/14	2,05/1,99	0,097/0,065	21,1/30,6
2	61	62,6/61,1	1,22/1,18	0,097/0,065	12,6/18,2
5	82	84,1/82,2	0,91/0,87	0,097/0,065	9,4/13,4
10	90,5	92,8/90,7	0,77/0,73	0,097/0,065	7,9/11,2
20	95,1	98/95,3	0,65/0,61	0,097/0,065	6,7/9,4

Исходные данные: $F_p = 450$ км², $F_{zt} = 70$ га. Для реки: $Q_c = 1,45$ м³/с, $C_v = 0,45$, $C_s/C_v = 3$ [13], $\alpha = 1$, $r = 0,6$. Перед дефисом приведены результаты расчетов при $p_c = 90$ % ($P = 0,4$ года), после — при $p_c = 99$ % ($P = 0,2$ года).

Кратность основного разбавления, так же как и расходы воды, от которых она зависит, целесообразно вычислять с учетом связи обеспеченностей этих расходов.

В табл. 4 приведены результаты расчетов вероятной кратности разбавления очищенных дождевых стоков, сбрасываемых в водоприемник.

Как показали расчеты, выполненные для различных вариантов исходных данных, учет связи обеспеченностей расходов воды позволит повысить точность определения кратности разбавления сточных вод в среднем на 20–30 % и более.

Выводы

1. Проведены многовариантные расчеты характеристик осадков в зависимости от определяющих факторов. Получены уравнения регрессии, которые можно использовать для расчета максимальных суточных осадков и предельных расходов в северо-западной зоне РФ (при отведении на ОС от 50 до 100 % годового объема дождевых поверхностных вод) с ошибкой в среднем не более 10 %.

2. Определена обеспеченность бесперебойной работы ОС и числа возможных случаев загрязнений водного объекта за период эксплуатации ОС в зависимости от продолжительности периода

однократного превышения или повторяемости загрязнения речных вод.

3. Вычислены вероятные значения кратности разбавления сточных вод, учитывающие допустимую повторяемость негативных последствий от загрязнения речных вод, и коэффициент корреляции обеспеченностей минимального стока воды с ЗТ и в реке-водоприемнике.

4. Учет связи обеспеченностей расходов воды с ЗТ и в водоприемнике позволит повысить точность определения кратности разбавления сточных вод и допустимой концентрации ЗВ в очищаемом стоке в среднем на 20–30 % и более.

Библиографический список

1. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. — М.: ФГУП «НИИ Водгео», 2015. — 146 с.
2. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. СНИП 2.04.03—85. Утв. приказом Министерства строительства и ЖКХ РФ (Минстрой России) от 25 декабря 2018 г. № 680/пр и введен в действие с 26 июня 2019 г. — М.: Стандартинформ, 2019. — 76 с.
3. СП 529.1325800.2023. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Утв. приказом Министерства строительства и ЖКХ РФ от 11 сентября 2023 г. № 654/пр. — М.: ФАУ «ФЦС», 2023. — 103 с.
4. Пособие по определению основных расчетных гидрологических характеристик. — Л.: Гидрометеиздат, 1984. — 447 с.
5. Дикаревский В. С. Отведение и очистка поверхностных сточных вод / В. С. Дикаревский, А. М. Курганов, А. П. Нечаев и др. — Л.: Стройиздат. Лен. отд., 1990. — 223 с.
6. Справочник по климату СССР. Ч. 1–4. — Л.: Гидрометеиздат, 1972.
7. СП 131.13330.2020. Строительная климатология (СНИП 23-01—99). Утв. приказом Министерства строительства и ЖКХ РФ от 24 декабря 2020 г. № 859/пр. — М.: ФАУ «ФЦС», 2020. — 150 с.
8. Научно-прикладной справочник по климату СССР. — Серия 3 «Многолетние данные». Ч. 1–6. — Вып. 3. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 693 с.
9. Канцибер Ю. А. Расчеты характеристик поверхностного стока систем водоотведения на селитебных и производственных территориях Северо-Запада РФ / Ю. А. Канцибер, А. Б. Пономарев // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2016. — Т. 13. — № 1(46). — С. 68–74.
10. Картвелишвили Н. А. Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулирование речного стока / Н. А. Картвелишвили. — Л.: Гидрометеиздат, 1967. — 291 с.
11. Набойченко А. А. К оценке расчетных характеристик стока загрязненных поверхностных вод с застроенных территорий / А. А. Набойченко, Ю. А. Канцибер // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 16–23 апреля 2018 года. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2018. — С. 245–249.
12. Жуков А. И. Методы очистки производственных сточных вод / А. И. Жуков, И. Л. Монгайт, И. Д. Родзиллер. — М.: Химия, 1996. — 270 с.
13. Ресурсы поверхностных вод СССР. — Том 2. Карелия и Северо-Запад, ч. 1–2. — Л.: Гидрометеиздат, 1972.

Дата поступления: 04.10.2023

Решение о публикации: 28.11.2023

Контактная информация:

КАНЦИБЕР Юрий Алексеевич — канд. техн. наук, доц.; kanziber3@yandex.ru

ПОНОМАРЕВ Андрей Борисович — канд. техн. наук, доц.; pollnom@yandex.ru

ШТЫКОВ Валерий Иванович — д-р техн. наук, проф.; shtykov41@mail.ru

Basic Calculated Hydrological Characteristics of Surface Runoff Treatment Systems in the North-Western Region of Russia

Yu. A. Kantsiber, A. B. Ponomarev, V. I. Shtykov

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

For citation: Kantsiber Yu. A., Ponomarev A. B., Shtykov V. I. Basic Calculated Hydrological Characteristics of Surface Runoff Treatment Systems in the North-Western Region of Russia // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 801–810. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-801-810

Summary

Purpose: The normative and methodological documents in Russia regarding the treatment of surface runoff from residential areas do not provide explanations on the effectiveness of the treatment system from the point of view of the possibility of pollution of water bodies they allow. The probability of pollution and the dilution ratio of untreated wastewater have not been studied. The goal is to develop a method for determining the hydrological characteristics of the runoff necessary for the probabilistic assessment of dilution factors, permissible concentrations and discharges of contaminated surface waters. **Methods:** Based on observational data from fourteen weather stations in the North-West of Russia, the probabilistic relationship between the characteristics of runoff from built-up areas and the receiving river has been studied, taking into account the basics of probability theory and hydrological calculations of minimum runoff. Calculations have been carried out and the dependence of the number of days with precipitation and their relative amount in the warm period of the year on the maximum daily precipitation layer has been established. A mathematical relationship has been found between the frequency of rain and the number of possible cases of pollution of a water body. **Results:** A method has been developed for calculating the probable values of precipitation characteristics, minimum water runoff in the receiving river and the dilution factor of pollutants depending on the permissible frequency of negative consequences from river water pollution and the correlation coefficient of the probability of minimum water flow from built-up areas and in the receiving river. **Practical significance:** The method for calculating the hydrological characteristics of runoff will make it possible to more reasonably and accurately determine the required degree of wastewater treatment, the productivity and parameters of treatment facilities, and in some cases, to reduce the degree of pollution of watercourses.

Keywords: Surface runoff, treatment facilities, pollution of a water body, water body, precipitation, hydrological characteristics, runoff, water rate, flood, rain flood, dilution factor, availability, frequency, reliability.

References

1. *Rekomendacii po raschetu sistem sbora, otvedeniya i ochistki poverhnostnogo stoka s selitebnyh territorij, ploshchadok predpriyatij i opredeleniyu uslovij vypuska ego v vodnye ob'ekty* [Recommendations for calculating systems for collecting, draining and purifying surface runoff from residential areas, enterprise sites and determining the conditions for its release into water bodies]. Moscow: FGUP "NII VODGEO" Publ., 2015, 146 p. (In Russian)

2. SP 32.13330.2018. *Kanalizatsiya. Naruzhnye seti i sooruzheniya*. SNiP 2.04.03—85. *Utv. prikazom Ministerstva stroitel'stva i ZhKKh RF (Minstroy Rossii) ot 25 dekabrya 2018 g. № 680/pr i vveden v deystvie s 26 iyunya 2019 g.* [SP 32.13330.2018. Sewerage. External networks and structures. SNiP 2.04.03—85. Approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (Ministry of Construction of Russia) dated December 25, 2018 № 680/pr and put into effect on

June 26, 2019]. Moscow: Standartinform Publ., 2019, 76 p. (In Russian)

3. *SP 529.1325800.2023. Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik. Utv. prikazom Ministerstva stroitel'stva i ZhKKh RF ot 11 sentyabrya 2023 g. № 654/pr* [SP 529.1325800.2023. Determination of the main calculated hydrological characteristics. Approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated September 11, 2023 № 654/pr]. Moscow: FAU "FTsS" Publ., 2023, 103 p. (In Russian)

4. *Posobie po opredeleniyu osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Guide to determining the basic design hydrological characteristics]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1984, 447 p. (In Russian)

5. Dikarevskij V. S., Kurganov A. M., Nechaev A. P. *Otvedenie i ochistka poverkhnostnykh stochnykh vod* [Disposal and treatment of surface wastewater]. Leningrad: Stroiizdat Publ., 1990, 223 p.

6. *Spravochnik po klimatu SSSR* [USSR Climate Guide]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1972, vol. 1–4. (In Russian)

7. *SP 131.13330.2020. Stroitel'naya klimatologiya (SNiP 23-01—99). Utv. prikazom Ministerstva stroitel'stva i ZhKKh RF ot 24 dekabrya 2020 g. № 859/pr* [SP 131.13330.2020. Construction climatology (SNiP 23-01—99). Approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 24, 2020 № 859/pr]. Moscow: FAU "FTsS" Publ., 2020, 150 p. (In Russian)

8. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3 "Mnogoletnie dannye", ch. 1–6, vyp. 3* [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR, series 3 "Long-term data", parts 1–6, vol. 3]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1988, 693 p. (In Russian)

9. Kantsiber Yu. A., Ponomarev A. B. *Raschety kharakteristik poverkhnostnogo stoka sistem vodootvedeniya na selitebnykh i proizvodstvennykh territoriyakh Severo-Zapada RF* [Calculation of characteristics of surface drainage in water disposal systems in habitable and production territories in northwest Russian Federation]. *Izvestiya*

Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2016, vol. 13, Iss. 1, pp. 68–74. (In Russian)

10. Kartvelishvili N. A. *Teoriya veroyatnostnykh processov v gidrologii i regulirovanie rechnogo stoka* [Theory of probabilistic processes in hydrology and river flow regulation]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1967, 291 p. (In Russian)

11. Nabojchenko A. A., Kanziber Yu. A. K. *Ocenke raschetnykh kharakteristik stoka zagryaznennykh poverkhnostnykh vod s zastroyennymi territoriyami* [To the assessment of the calculated characteristics of the runoff of polluted surface waters from built-up areas]. *Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXVIII Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh, Sankt-Peterburg, 16–23 aprelya 2018 goda* [Transport: problems, ideas, prospects: Proceedings of the LXXVIII All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists, St. Petersburg, April 16–23, 2018]. St. Petersburg: St. Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I Publ., 2018, pp. 245–249. (In Russian)

12. Zhukov A. I., Mongajt I. L., Rodziller I. D. *Metody ochistki proizvodstvennykh stochnykh vod* [Methods for treating industrial wastewater]. Moscow: Chemistry Publ., 1996, 270 p. (In Russian)

13. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Tom 2. Kareliya i Severo-Zapad, ch. 1–2* [Surface water resources of the USSR. Volume 2. Karelia and the North-West, parts 1–2]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. (In Russian)

Received: October 04, 2023

Accepted: November 28, 2023

Author's information:

Yuri A. KANTSIBER — PhD in Engineering, Associate Professor; kanziber3@yandex.ru

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

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

УДК 669.054.8

Переработка отходов металлургической промышленности для стабилизации и укрепления проблемных грунтов

И. М. Печенцов

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

Для цитирования: Печенцов И. М. Переработка отходов металлургической промышленности для стабилизации и укрепления проблемных грунтов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 811–819. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-811-819

Аннотация

Цель: Рассмотреть существующие способы переработки и утилизации отходов металлургической промышленности, раскрыть их классификацию. Затронуть негативное воздействия металлургической промышленности, в частности образующихся отходов от их деятельности на геосистемы. Показать технологическое решение проблемы слабых грунтов, с помощью первоначальной их стабилизации и последующим укреплением данных грунтов, для объектов городской инфраструктуры Российской Федерации. **Методы:** Разработаны различные технологии комплексной переработки твердых отходов металлургии, часть из них реализована в промышленном масштабе за рубежом. У нас такие технологии разрабатываются на уровне исследовательских работ и полупромышленных испытаний. **Результаты:** Отличительная особенность грунтов, укрепленных твердыми отходами металлургии, состоит в том, что структурообразование и набор прочности происходит как в воздушно-сухой, так и во влажной средах. Данными отходы эффективно укрепляют грунты разного гранулометрического и химико-минералогического состава. Как показали лабораторные исследования и опорное строительство, грунты, укрепленные данными комплексными отходами, пригодны для устройства конструктивных слоев дорожных одежд. При укреплении песчаных грунтов происходит чисто механическое пронизывание и обволакивание грунтовых частиц (ввиду малого количества глинистых частиц) без образования прочной пространственной структуры. **Практическая значимость:** Показана возможность применения отходов металлургического производства для укрепления слабых грунтов, указанные новые методики могут быть рекомендованы к практическому использованию.

Ключевые слова: Металлургические предприятия, доменный шлак, переработка, вторичные материальные ресурсы, техногенный отход, глинистые грунты, устойчивость.

В настоящий момент направление крупной и средней металлургической промышленности занимает 2-е место по вредным выбросам в атмосферу в России. Производственные мощности крупных металлургических заводов при обработке металла и металлических болванок (расплавленных металлических заготовок) находятся в безвыходном положении в связи с использованием сырья с очень ограниченным содержа-

нием полезных компонентов. По этой причине на металлургические производства поступает очень большой объем руды для переработки в готовые изделия (выпускаемый продукт), а это, соответственно, образует большое количество отходов, в том числе продуктов вторичного производства, например, таких как шлаки и отходящий газ из неиспользуемых компонентов. Таким образом, нанесение вреда через загрязнение атмосферы



Рис. 1. Процесс сброса отходов металлургического производства на открытый полигон

(воздуха) и растительного слоя (почвы) является одной из главных причин экологических проблем, возникающих от деятельности крупной и средней металлургической промышленности. Сточные выбросы с металлургических производств по сточным трубам и системам ливневой канализации с открытых площадок складирования отходов приводят к тому, что загрязняется почва (плодородный растительный слой) и образуются техногенные пустоши вокруг периметра крупных заводов и металлургических производств. По этой причине пагубное воздействие получают от деятельности металлургических производств не только воздух, но также вода и почва [1].

На рис. 1 представлен выброс отходов металлургического производства на открытый полигон (отвал).

Сохраняет свою значимость на сегодняшний день проблема переработки, хранения и утилизации отвальных шлаков, а также выработки из них металлокомпонентов при запуске по новому

технологическому кругу как вторичное сырье. По данной проблеме выделим несколько аспектов. **Первый** — металл, извлеченный из отхода металлургического производства — шлака, более экономически выгодный, чем извлеченный из руды в результате длинного ряда производственной последовательности. **Второй** — после выплавки металлов из шлака, оставшиеся компоненты можно с пользой утилизировать [2].

В целом все образующиеся основные отходы делятся на два вида: **основные** и **негативные**.

Основные — это отходы от компонентов и материалов для производственной и промышленной инфраструктуры, используемых чаще всего при создании и изготовлении товаров, таких как металлы в чистом виде (без примесей), металлосодержащие (окалина, шламы, шлаки и пр.) и неметаллические (текстиль, пластик, полимеры, резина, древесина, клеи, стекло и др.) отходы.

К **негативным** отходам можно отнести строительные, машиностроительные материалы и



Рис. 2. Отходы металлургического производства — шлак

вещества для промышленного производства, используемые или образующиеся при технологических процессах, являющиеся побочным этапом. Негативные отходы бывают твердые (огнеупоры, золы, абразивы и т. д.), жидкие (смазочно-охлаждающие) жидкости, минеральные (полусинтетические и синтетические) масла и другие подобные по составу нефтепродукты, отходы гальванопроизводства и газообразные (отходящие газы, летучие химические элементы).

Особенно значимо комплексное применение сырья для промышленных металлургических и машиностроительных отраслей, таких как металлургия черных металлов, заводы по выпуску тяжелой техники для строительной отрасли и гражданского назначения, где в процессе обработки (выплавки) металлов, таких как сталь, чугун, нержавеющая сталь, и ферросплавов, возникает значительное количество **технологических отходов** [3]. Из этих остаточных материалов технологического производства 80 % составляют **шлаки** из флюсов, зол топлива и продуктов, окисляющих металл и примеси.

На рис. 2 представлены отходы металлургического производства, а именно шлаки.

С учетом «Временного классификатора токсичных отходов промышленного производства и методических рекомендаций по определению класса токсичности промышленных отходов»

от 1987 г. подобные отходы делятся на **4 класса опасности** [4]:

- **1-й класс опасности отходов (чрезвычайно опасные)**: электрические трансформаторы, ртутные лампы, градусники, в основном эти отходы образованы от промышленности;

- **2-й класс опасности отходов (высокоопасные)**: аккумуляторы свинцовые, кабели медно-жильные, батарейки;

- **3-й класс опасности отходов (умеренно опасные)**: автомобильные отработанные масла и масляные фильтры, обрезки оголенных проводов (медных и т. д.);

- **4-й класс опасности отходов (малоопасные)**: строительный мусор, автомобильные резиновые покрышки, древесные опилки, бой керамического кирпича, обрезки картона и другие отходы [5].

На рис. 3 указаны основные виды образующихся промышленных отходов на комбинатах и предприятиях Российской Федерации.

В настоящее время на предприятиях черной и цветной металлургии для металлопроизводства [6] расположены такие направления, как: прямое технологическое производство проката и металлозаготовок, прессозоны (кузны промышленные), плавильные и прокатные производства. Данные производства являются источниками для загрязнения водоемов и воздуха.

При выплавке и выработке металлов образуются отходы, утилизация которых в настоящий момент является острой проблемой для окружающей среды. Так, в металлоотходах находится очень большое количество вредных и токсических химических веществ. Поэтому тонны металлургических отходов, число которых составляет миллиарды, представляют собой очень большую экологическую проблему в стране.

Отработанные остатки от металлургической промышленности перерабатываются. Однако перерабатываются эти отходы не полностью —



Рис. 3. Основные виды образующихся промышленных отходов в Российской Федерации

только из 10–15 % их общей массы добывают полезные элементы. Металлургические отходы также используются для изготовления строительных материалов.

На это приходится примерно 20–30 тонн отходов в сутки. Значительную их часть просто выбрасывают либо в отвалы, либо в поля, которые предназначены для захоронения шламов, или куда-то еще. Увы, нередко местом выброса металлических отходов становится плодородная почва.

Однако опасность металлических отходов не уменьшается, поскольку они могут наносить

вред экологии, даже находясь в 200 км от своего локального расположения. Токсичные вещества способны мигрировать в природную среду на большие расстояния [7].

Среди избыточных отходов черного металла можно отметить, что выработка чугуна, стали приводит к образованию шлаков [8]. Взаимодействие железа раскаленного и кислорода приводит к образованию калия. Кроме того, остатки от металлопроизводства включают замасленные окалины, керамические ломы, шламы. Большинство отходов черного металла находят свое применение путем переработки. Из них происходит

извлечение металлических компонентов, из которых потом можно получить металл.

Шлак, бой футеровки, окалина и пыль — это не весь спектр количества отходов из металла [9].

Если выполнить химический анализ всех отходов, вырабатываемых металлургической компанией, то, скорее всего, обнаружим огромное количество компонентов.

Правильное выполнение переработки дает возможность дальнейшего практического использования доли данных отходов. Но большую их часть складывают в накопители золота.

Одним из не менее значимых компонентов, содержащихся в черных металлах, является цинк, находящийся широкое практическое применение [10]. Количество цинка в отходах настолько велико, что, например, при извлечении всего цинка из пыли газовой очистки, выбрасываемой электростальным цехом ОАО «Северсталь», его будет достаточно, чтобы полностью обеспечить цинковый завод в Челябинской области.

Кроме того, к отходам от металлургической промышленности относятся и цветные металлы. В процессе производства цветного металла образуется отход, который является более серьезной проблемой экологии, чем отход черного металла. Отходы предприятий, занимающихся производством цветного металла, содержат почти полный ассортимент тяжелого металла. К сожалению, неполная утилизация таких отходов не только приводит к неблагоприятной экологической обстановке, но также к потере цветного металла и прочих химических веществ, имеющих важный хозяйственный смысл.

Кроме того, определенную значимость имеет грунтовое основание. Рассмотрим, что представляет собой **грунт**. Это многокомпонентная геологическая структура горных пород, почв, техногенных систем, искусственных грунтов, используемых в качестве основы при строительстве и реконструкции зданий, автодорог, аэродромов, строительстве насаждений и т. д. [11].

В число устойчивых относятся грунты скального происхождения [12]. Они настолько прочные, что не требуют глубины. Такая порода не подвергается вспучиванию и вымыванию. Но у них все же есть один недостаток, при этом очень существенный. Скальный грунт характерен для горных районов и не встречается на равнине. Несколько меньше прочности имеют так называемые крупные грунты — валуны, щебень и гравий.

Одним из самых удобных вариантов для строительства по назначению является песчаная грунтовка. Предпочтение следует отдавать крупным пескам и фракциям средних размеров [13]. Они не рвутся при заморозке.

Среди неблагоприятных видов почв следует отметить глинистую и суглинистую. В зависимости от структуры глина очень сильно нагревается водой, что при заморозке дает значительные расширения, способные деформировать фундамент и другие конструкции, расположенные в цокольном этаже капитального строительства. Оттаивание тоже грозит огромными проблемами — в этот период почва проседает и разжижается.

Отдельно взятый вид грунта — лесс. Это осадочные породы светло-желтого цвета. Пока дискуссия идет о супеси или, скорее всего, о суглинке.

Немаловажно, что процесс строительства в большинстве случаев зависит от материала, который используется в качестве грунта. Вследствие чего перед началом строительных работ требуется изучение грунта. В основном встречаются виды песчано-глинистого грунта, которые различны по свойствам физики и механически, а также по величине частей.

Следует отметить зарубежный опыт ученых из Хорватии Ivana Barišić, Sanja Dimter, Ivanka Netinger [14], изучающих вопрос использования шлаков в дорожных строительствах в Хорватии. Дорожное строительство является деятельностью, где больше всего, чем в других отраслевых направлениях строительного производства,



Рис. 4. Разделение шлака по способу охлаждения

используется природный ресурс. Огромное количество природного материала — гравия, камней, песка — вложено в километры недавно возведенных дорог или при реконструировании ветхих магистралей. При этом концепция «устойчивое развитие» требует эффективного контроля за отходами, а также управления окружающей средой. Шлак является отходом, образуемым при очищении металла, его литье и переплавке. В этом процессе шлак формируется в двух этапах. На первом этапе руды подвергаются высоким температурам плавления, чтобы разделить примеси. Полученные примеси собирают и удаляют, а этот отходный материал называется шлаком. При дальнейшем литье и легировании металла в очищенные металлы добавляются разные вещества для плавления металла и его обогащения, а в таких процессах шлак вновь образуется в качестве побочных продуктов.

На рис. 4 отражены типы образующегося шлака в зависимости от способа охлаждения, расплавленной массы и от типа обрабатываемого металла (цветной и черный шлак).

Кристаллические шлаки обладают целлюлозной или пористой структурой в результате формирования газовых пузырьков в расплавленных массах и, как правило, считаются группой агрегатов нормальной массы.

При изготовлении гранулированных шлаков создаются песочные зерна. Благодаря составу материал имеет отличные гидравлические свойства, и если у него есть соответствующий активатор, то гидроксид кальция, например, будет действовать как портландцемент.

Расширенные, или пенные, шлаки более пористые и имеют меньший объем, чем воздушный шлак.

В зависимости от типа обработанного металла шлак подразделяется на два основных типа: цветные шлаки из алюминиевого, феррохромного и ферромарганцевого сплавов и железные шлаки из алюминиевого, ферромарганцевого и латунного сплавов.

Большое количество черного и цветного шлака с металлургических заводов в Сисаке и Сплите расположено на свалках Хорватии, оценивается примерно в 1,8 млн тонн. Большое число такого материала на свалках побудило хорватских ученых провести исследование о возможности применения различного шлака в строительстве [15, 16] в качестве заполнителя в бетонных смесях.

Библиографический список

1. Бабак Н. А. Физическое загрязнение окружающей среды: учебное пособие / Н. А. Бабак, И. А. Горшкова, О. Ю. Макарова и др. — СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2012. — 54 с.

2. Кусков С. В. Полигоны твердых бытовых и промышленных отходов / С. В. Кусков, Л. А. Осипова, Е. Н. Щербакова // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2005. — № 3. — С. 70–75.
 3. Малахов В. М. Городские отходы в России: состояние, проблемы, пути решения / В. М. Малахов, А. Г. Гриценко, С. В. Дружинин // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. — 2012. — № 98. — С. 1–126.
 4. Большина Е. П. Экология металлургического производства: курс лекций / Е. П. Большина. — Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2012. — 155 с.
 5. Сторожаков С. Ю. Пути утилизации ацетатсодержащих отходов в качестве добавок в бетонные смеси / С. Ю. Сторожаков, С. В. Медведько // Наука и образование: архитектура, градостроительство и строительство: материалы Международной конференции, посвященной 80-летию строительного образования и 40-летию архитектурного образования Волгоградской области, Волгоград, 06–10 сентября 2010 года. — Волгоград: Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2010. — С. 331–334.
 6. Линчевский Б. В. Металлургия черных металлов / Б. В. Линчевский — М.: Книга по Требованию, 2021. — 360 с.
 7. Гаврилина А. В. Моделирование оценки затрат металлургического предприятия, связанных с загрязнением окружающей среды / А. В. Гаврилина, Н. В. Долбня // Вестник Академии гражданской защиты. — 2018. — № 2(14). — С. 89–96.
 8. Временный классификатор токсичных промышленных отходов и методические рекомендации по определению класса токсичности промышленных отходов / Министерство здравоохранения СССР; Государственный комитет СССР по науке и технике. — М., 1987.
 9. Шершнева М. В. Геоэкозащитные свойства доменного шлака в дорожном строительстве / М. В. Шершнева, В. Я. Соловьева, Л. Л. Масленникова и др. // Естественные и технические науки. — 2018. — № 9(123). — С. 81–84.
 10. Путилина В. С. Влияние органического вещества на миграцию тяжелых металлов на участках складирования твердых бытовых отходов / В. С. Путилина, И. В. Галицкая, Т. И. Юганова // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. — 2005. — № 76. — С. 1–100.
 11. Печенцов И. М. Обоснование высокоэффективного вяжущего на основе модифицированного металлургического отхода (доменного шлака), с его последующим применением для стабилизации и укрепления проблемных грунтов / И. М. Печенцов, М. С. Абу-Хасан // БСТ: Бюллетень строительной техники. — 2023. — № 3(1063). — С. 22–25.
 12. ГОСТ 25100—2020. Грунты. Классификация (с Изменениями № 1). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200174302>.
 13. Соловьева В. Я. Эффективное основание из глинистого грунта для устройства автомобильной дороги / В. Я. Соловьева, М. Абу-Хасан, Н. В. Ершиков и др. // Транспортное строительство. — 2017. — № 11. — С. 26–28.
 14. Barišić I. Possibilities of application of slag in road construction / I. Barišić, S. Dimter, I. Netinger // Tehnički vjesnik: znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku. — 2010. — Vol. 17. — Iss. 4. — Pp. 523–528.
 15. Netinger I. Primjena zgure u graditeljstvu / I. Netinger, D. Bjegović, M. Jelčić et al. // Sabor hrvatskih graditelja / Simović, V. Cavtat: Hrvatski savez građevinskih inženjera, 2008. — Pp. 281–292.
 16. Netinger I. Mogućnosti primjene domaće zgure kao agregata u betonu / I. Netinger, M. J. Rukavina, D. Bjegović // Građevinar. — 2010. — Vol. 62. — Iss. 1. — Pp. 35–43.
- Дата поступления: 10.08.2023
Решение о публикации: 28.09.2023
- Контактная информация:**
ПЕЧЕНЦОВ Илья Михайлович — аспирант;
pechensov1989@gmail.com

Processing of Waste from the Metallurgical Industry for Stabilization and Reinforcement of Problematic Soils

I. M. Pechentsov

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

For citation: Pechentsov I. M. Processing of Waste from the Metallurgical Industry for Stabilization and Reinforcement of Problematic Soils // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 811–819. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-811-819

Summary

Purpose: To examine existing methods of processing and recycling waste from the metallurgical industry, to elucidate their classification. To touch upon the negative impact of the metallurgical industry, in particular, of the waste generated from its activities on geosystems. To present technological solutions for addressing the issue of weak soils through their initial stabilization and subsequent reinforcement, specifically for urban infrastructure objects in the Russian Federation. **Methods:** Various technologies for the complex processing of solid waste from metallurgy have been developed, some of them have been implemented on an industrial scale abroad. We develop such technologies at the level of research and semi-industrial tests. **Results:** A distinctive feature of soils reinforced with solid wastes of metallurgy is that structure formation and strength development occur both in air-dry and in humid environments. These wastes effectively strengthen soils of different granulometric and chemical-mineralogical composition. As shown by laboratory studies and supporting construction, soils reinforced with this complex waste are suitable for constructing pavement structural layers. When strengthening sandy soils, a purely mechanical penetration and enveloping of soil particles (due to the small amount of clay particles) occurs without the formation of a strong spatial structure. **Practical significance:** The possibility of using waste from metallurgical production to strengthen weak soils is shown, and these new methods can be recommended for practical use.

Keywords: Metallurgical enterprises, blast-furnace slag, processing, secondary material resources, technogenic waste, clay soils, stability.

References

1. Babak N. A., Gorshkova I. A., Makarova O. Yu. et al. *Fizicheskoe zagryaznenie okruzhayushchey sredy: uchebnoe posobie* [Physical pollution of the environment: textbook]. St. Petersburg: Peterburgskiy gos. un-t putey soobshcheniya Publ., 2012, 54 p. (In Russian)
2. Kuskov S. V., Osipova L. A., Shcherbakova E. N. *Poligony tverdykh bytovykh i promyshlennykh otkhodov* [Landfills for solid household and industrial waste]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University]. 2005, Iss. 3, pp. 70–75. (In Russian)
3. Malakhov V. M., Gritsenko A. G., Druzhinin S. V. *Gorodskie otkhody v Rossi: sostoyanie, problemy, puti resheniya* [Urban waste in Russia: state, problems, solutions]. *Ekologiya. Seriya analiticheskikh obzоров mirovoy literatury* [Ecology. A series of analytical reviews of world literature]. 2012, Iss. 98, pp. 1–126. (In Russian)
4. Bol'shina E. P. *Ekologiya metallurgicheskogo proizvodstva: kurs lektsiy* [Ecology of metallurgical production: a course of lectures]. Novotroitsk: NF NITU "MISiS", 2012, 155 p. (In Russian)
5. Storozhakov S. Yu., Medved'ko S. V. *Puti utilizatsii atsetatsoderzhashchikh otkhodov v kachestve dobavok v betonnye smesi. Nauka i obrazovanie: arkhitektura, gradostroitel'stvo i stroitel'stvo: materialy Mezhdunarodnoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu stroitel'nogo obrazovaniya i 40-letiyu arkhitekturnogo obrazovaniya*

Volgogradskoy oblasti, Volgograd, 06–10 sentyabrya 2010 goda [Ways of recycling acetate-containing waste as additives in concrete mixtures. Science and education: architecture, urban planning and construction: materials of the International conference dedicated to the 80th anniversary of construction education and the 40th anniversary of architectural education in the Volgograd region, Volgograd, September 06–10, 2010]. Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet Publ., 2010, pp. 331–334. (In Russian)

6. Linchevskiy B. V. *Metallurgiya chernykh metallov* [Metallurgy of ferrous metals]. Moscow: Kniga po Trebovaniyu Publ., 2021, 360 p. (In Russian)

7. Gavrilina A. V., Dolbnya N. V. Modelirovanie otsenki zatrat metallurgicheskogo predpriyatiya, svyazannykh s zagryazneniem okruzhayushchey sredy [Modeling the assessment of costs of a metallurgical enterprise associated with environmental pollution]. *Vestnik Akademii grazhdanskoy zashchity* [Bulletin of the Academy of Civil Protection]. 2018, Iss. 2(14), pp. 89–96. (In Russian)

8. *Vremennyy klassifikator toksichnykh promyshlennykh otkhodov i metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu klassa toksichnosti promyshlennykh otkhodov. Ministerstvo zdavookhraneniya SSSR; Gosudarstvennyy komitet SSSR po nauke i tekhnike* [Temporary classifier of toxic industrial waste and guidelines for determining the toxicity class of industrial waste. Ministry of Health of the USSR; USSR State Committee for Science and Technology.]. Moscow, 1987. (In Russian)

9. Shershneva M. V., Solov'eva V. Ya., Maslennikova L. L. Geokozashchitnye svoystva domennogo shlakav dorozhnom stroitel'stve [Geo-environmental properties of blast furnace slag in road construction]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and technical sciences]. 2018, Iss. 9(123), pp. 81–84. (In Russian)

10. Putilina V. S., Galitskaya I. V., Yuganova T. I. Vliyanie organicheskogo veshchestva na migratsiyu tyazhelykh metallov na uchastkakh skladirovaniya tverdykh bytovykh otkhodov [Influence of organic matter on the migration of heavy metals in areas where municipal solid waste is stored].

Ekologiya. Seriya analiticheskikh obzorov mirovoy literatury [Ecology. A series of analytical reviews of world literature]. 2005, Iss. 76, pp. 1–100. (In Russian)

11. Pechentsov I. M., Abu-Khasan M. S. Obosnovanie vysokoeffektivnogo vyazhushchego na osnove modifitsirovannogo metallurgicheskogo otkhoda (domennogo shlak), s ego posleduyushchim primeneniem dlya stabilizatsii i ukrepleniya problemnykh gruntov [Justification of a highly effective binder based on modified metallurgical waste (blast furnace slag), with its subsequent use for stabilization and strengthening of problematic soils]. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki* [BST: Construction Bulletin technology]. 2023, Iss. 3(1063), pp. 22–25. (In Russian)

12. *GOST 25100—2020. Grunty. Klassifikatsiya (s Izmeneniyami № 1)* [GOST 25100—2020. Soils. Classification (with Changes № 1)]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200174302>. (In Russian)

13. Solov'eva V. Ya., Abu-Khasan M., Ershikov N. V. et al. Effektivnoe osnovanie iz glinistogo grunta dlya ustroystva avtomobil'noy dorogi [Effective base of clay soil for the construction of a highway]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction]. 2017, Iss. 11, pp. 26–28. (In Russian)

14. Barišić I., Dimter S., Netinger I. Possibilities of application of slag in road construction. *Tehnički vjesnik: znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku*. 2010, vol. 17, Iss. 4, pp. 523–528.

15. Netinger I., Bjegović D., Jelčić M. et al. Primjena zgure u graditeljstvu. *Sabor hrvatskih graditelja / Simović, V. Cavtat: Hrvatski savez građevinskih inženjera*, 2008, pp. 281–292.

16. Netinger I., Rukavina M. J., Bjegović D. Mogućnosti primjene domaće zgure kao agregata u betonu. *Građevinar*. 2010, vol. 62, Iss. 1, pp. 35–43.

Received: August 10, 2023

Accepted: September 28, 2023

Author's information:

Il'ya M. PECHENTSOV — Postgraduate Student;
pechensov1989@gmail.com

УДК 331.451

Прогнозирование переизлученного шума и вибрации, создаваемых вблизи железнодорожных линий

А. Б. Завьялов

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

Для цитирования: Завьялов А. Б. Прогнозирование переизлученного шума и вибрации, создаваемых вблизи железнодорожных линий // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 820–827. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-820-827

Аннотация

Цель: Проанализировать модель ScopeRail, способную прогнозировать переизлученный шум и вибрации в конструкциях, расположенных в непосредственной близости от железнодорожных линий. Полученные результаты сравнить с альтернативной, широко используемой моделью для определения точности и потенциального снижения стоимости оценки воздействия вибраций на территорию жилой застройки для новых железнодорожных линий. **Методы:** Произвести статистический разбор полученных данных для моделирования вибрации разных типов грунта. Рассчитать полученные с помощью моделирования результаты для создания базы данных вибрационных характеристик при различных состояниях грунта, скорости движения поездов и расстояния от пути. **Результаты:** Проанализированы полученные результаты, сравнены с альтернативной, широко используемой моделью определения точности. Установлено, что модель ScopeRail дает более высокую точность прогнозирования, что может потенциально снизить стоимость оценки воздействия вибраций на территорию жилой застройки для новых железнодорожных линий. Получена модель, которая может мгновенно предсказать уровни вибрации и переизлученного шума для разных типов грунта при отличной скорости проходящих поездов. **Практическая значимость:** Разработано моделирование переизлученной вибрации и шума для помещений зданий, располагающихся непосредственно вблизи железнодорожного полотна, с помощью набора некоторых факторов, полученных опытным путем. Также смоделировано воздействие вибрации и шума при использовании дополнительных мер по снижению виброакустических факторов (плит и балластных матов), а также параметров возбуждения вибрации (стрелки, переезды и колесоотбойники).

Ключевые слова: Вибрация, переизлученный шум, глубина почвы, скорость волны, точность, грунт.

Быстрое развитие инфраструктуры высокоскоростных железных дорог за последние десятилетия привело к увеличению количества объектов и сооружений, расположенных в непосредственной близости от скоростных железнодорожных линий [1, 2]. Скоростные магистрали могут потенциально генерировать повышенные уровни переизлученного шума и вибрации как в путевом хозяйстве, так и на территории жилой застройки, где негативно влияют на техносферную среду,

вызывая сотрясение стен и полов в домах из-за возбуждения шума внутри здания [2]. Данное явление вызывает, во-первых, дискомфорт находящихся в помещении людей, а также становится причиной снижения порога чувствительности к вибрации социально-значимых объектов, например школ, больниц, промышленных зданий [3].

В следствие этого перед закладкой нового железнодорожного пути необходимо провести исследования по оценке вибрации и выявлению

тех субъектов и объектов, на которые будут влиять виброакустические факторы, вызванные постоянным движением поездов. В настоящее время уровни вибрации, которые будут негативно влиять на селитебную территорию, рассчитываются уже на стадии проектирования [4, 5], ускоряя процесс определения потенциальных «жертв». За последнее время в разных странах было проведено множество исследований по определению переизлученной вибрации от проходящих поездов. В качестве альтернативы была предложена модель, учитывающая вклад каждой шпалы в поле вибрации и использующая функции Грина для моделирования распространения грунтовой волны.

Проблема численных моделей в частотной и временной областях заключается в том, что время их вычислений для первоначальной оценки масштаба велико. В следствие того, что участки железнодорожного пути требуют подробного анализа, необходимо, чтобы прогнозы получались с небольшими вычислительными затратами. Для этого был предложен простой математический инструмент быстрого прогнозирования абсолютных уровней виброскорости грунта в децибелах и среднеквадратичных значениях [6]. Смоделированные результаты сравнили с полевыми и обнаружили, что точность моделирования сравнима с более требовательными численными подходами.

В данной статье описана модель ScopeRail, основанная на эмпирических данных, для облегчения прогнозирования вибрации и переизлученного шума при переменных формах пути и в разных типах зданий. Также ScopeRail сравнивается с производительностью оригинального подхода прогнозирования.

Целью моделирования является прогнозирование уровней вибрации на больших участках пути для определения ключевых участков, которые могут быть подвержены данному фактору, с

последующим более глубоким анализом. В случае моделирования вибрации на значительной по площади территории обычно жертвуют точностью прогнозирования для понижения требований по вычислению [7], иными словами, полученные при моделировании результаты уровней вибрации могут оказаться выше фактических, и тогда подробный анализ будет проводиться в том месте, где не будет актуальной данная проблема. Подробный анализ вибрации и переизлученного шума на железной дороге требует больших затрат, что приводит к удорожанию проекта.

Подход к моделированию, используемый в работе ScopeRail, состоит из двух отдельных частей. Во-первых, была разработана модель, способная предсказывать скоростные железнодорожные наземные временные вибрации. Затем эта модель многократно рассчитывалась для создания базы данных временных историй скоростей при различных состояниях грунта, скорости движения поездов и расстояния от пути. Во-вторых, был осуществлен статистический разбор полученных с помощью программы данных для моделирования вибрации разных типов грунта [8].

В следствие того, что модель симметричная, все ее компоненты были смоделированы наполовину — почва была смоделирована с помощью линейно-упругих, трехмерных кирпичных элементов с размерами 0,3 м в каждом направлении; верхняя граница почвы была местом расположения свободной поверхности, а горизонтальное смещение было ограничено в направлении перпендикулярно дорожке, учитывая симметрию почвы. Также были проанализированы типы поездов, технические характеристики путей и виды почв, которые влияли на результирующие уровни вибрации грунта, определены наиболее влиятельные факторы, создающие переизлученную вибрацию от проходящих составов. Те параметры, которые меньше всего влияют на этот фактор и имеют большие стандартные погрешно-

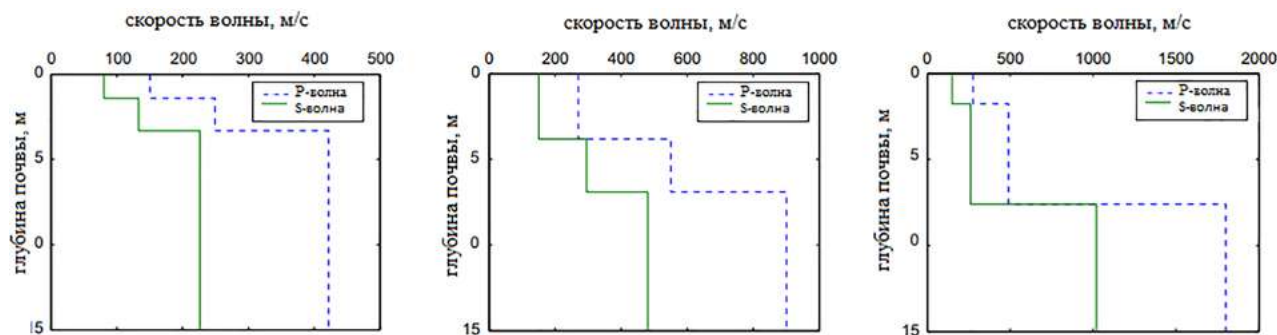


Рис. 1. Профили поверхностных волн сжатия и сдвига (ИВ2021, МоС 2022, НМ1 2022)

сти (дефекты рельсов и колесных пар), не учитывались при разработке модели [9].

Одним из наиболее важных параметров, влияющих на распространение вибрации грунта, являются характеристики грунта. Для включения свойств грунта в модель оценки были использованы два альтернативных подхода. Первый подход заключался в рассмотрении грунта как однородного полупространства (т. е. один слой), а второй — в рассмотрении почвы как двухслойной среды. Следует отметить, что для целей обзорной модели желательно ограниченное число входных параметров, потому что трудно получить подробную информацию о почве для труднодоступных географических районов [10].

Для проверки способности модели предсказывать уровни вибрации и переизлученного шума для различных испытательных площадок были проведены исследования с использованием трех наборов экспериментальных результатов. Первый набор результатов был зарегистрирован в 2021 году (ИВ 2021). Во время испытаний уровни вибрации отбирались с помощью акселерометров, а затем преобразовывались в скоростные временные истории.

В 2022 году также были проведены эксперименты для сбора результатов для дополнительных сравнений. Во-первых, вибрации были зарегистрированы на линии Санкт-Петербург — Москва (МоС 2022), во-вторых, на высокоскоростной линии Москва — Нижний Новгород

(НМ1 2022). Для каждого испытания использовалось идентичное оборудование, однако для МоС 2022 вибрации измерялись на расстоянии до 100 метров от пути, а для НМ1 2022 — до 35 метров. Во всех экспериментах проводился многоканальный анализ профилей волн, чтобы определить свойства грунта (рис. 1).

Обработывая полученные результаты, скорость проходящих поездов определяли с помощью комбинации спектрального и регрессионного анализа при обработке полученных результатов для того, чтобы сравнить эмпирический частотный спектр с теоретическим. Сначала модель была протестирована с использованием однородной почвы на каждом испытательном участке, а потом сравнили производительность модели с моделью, не учитывающей свойства почвы.

Однородная модель показала хорошие результаты и смогла предсказать значения с высокой точностью для каждого тестового участка (рис. 2).

Для испытаний МоС 2022 моделирование ScopeRail близко соответствовало экспериментальным результатам. Схожие результаты наблюдаются и в ИВ 2021, однако имеется превышение прогнозируемых уровней вибрации в приемниках при расстоянии от пути более 10 метров. В испытаниях НМ1 ScopeRail прогнозирует завышенный уровень вибрации при расстоянии меньше 25 метров от пути, а если расстояние больше — то прогноз становится пониженным. Сравнивая полученные модели, можно заметить примерно

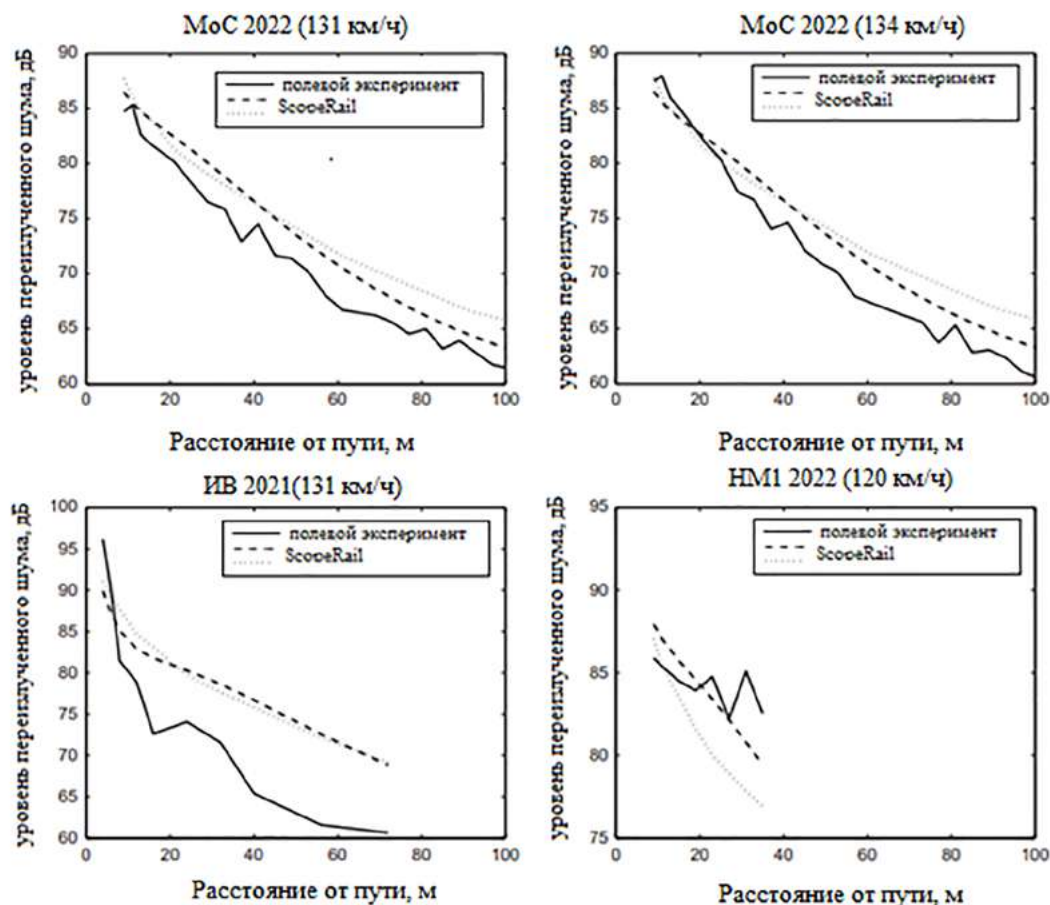


Рис. 2. Производительность однослойной модели при измерениях MoC 2022 (131 км/ч), MoC 2022 (134 км/ч), ИВ 2021, НМ1 2022

схожую производительность, однако обе модели завышают уровни вибрации для большинства мест расположения приемников. Для MoC 2022 ScopeRail предлагает незначительно улучшенную производительность при больших смещениях (2–3 дБ), а для НМ1 2022 — лучшую точность

Двухслойная модель ScopeRail также была протестирована в сравнении с экспериментальными данными. На рис. 3 показано, что снова обе модели завышают прогнозируемые уровни вибрации. Несмотря на это, модель ScopeRail показала более высокую точность по сравнению с моделью, в которой использовался однородный профиль грунта.

Для результатов ИВ 2021 было получено значительное улучшение точности уровней вибрации и переизлученного шума (до 9–10 дБ). Для

результатов MoC 2022 г. точность также была улучшена, однако производительность обеих моделей была низкой на участке НМ1 2022. Установлено, что ScopeRail обеспечивает высокую эффективность прогнозирования вибрации, особенно при использовании двухслойной модели грунта. Точность прогнозирования была самой высокой для MoC 2022 и ИВ 2021, поскольку изменение уровня вибрации в зависимости от расстояния было относительно равномерным, что сделало эти участки более простыми для прогнозирования. Для численной модели было сложно предсказать различные аномалии, однако модель смогла получить и результаты, которые хорошо соответствовали линии наилучшего соответствия.

В заключение стоит отметить, что было проведено тестирование модели ScopeRail, пред-

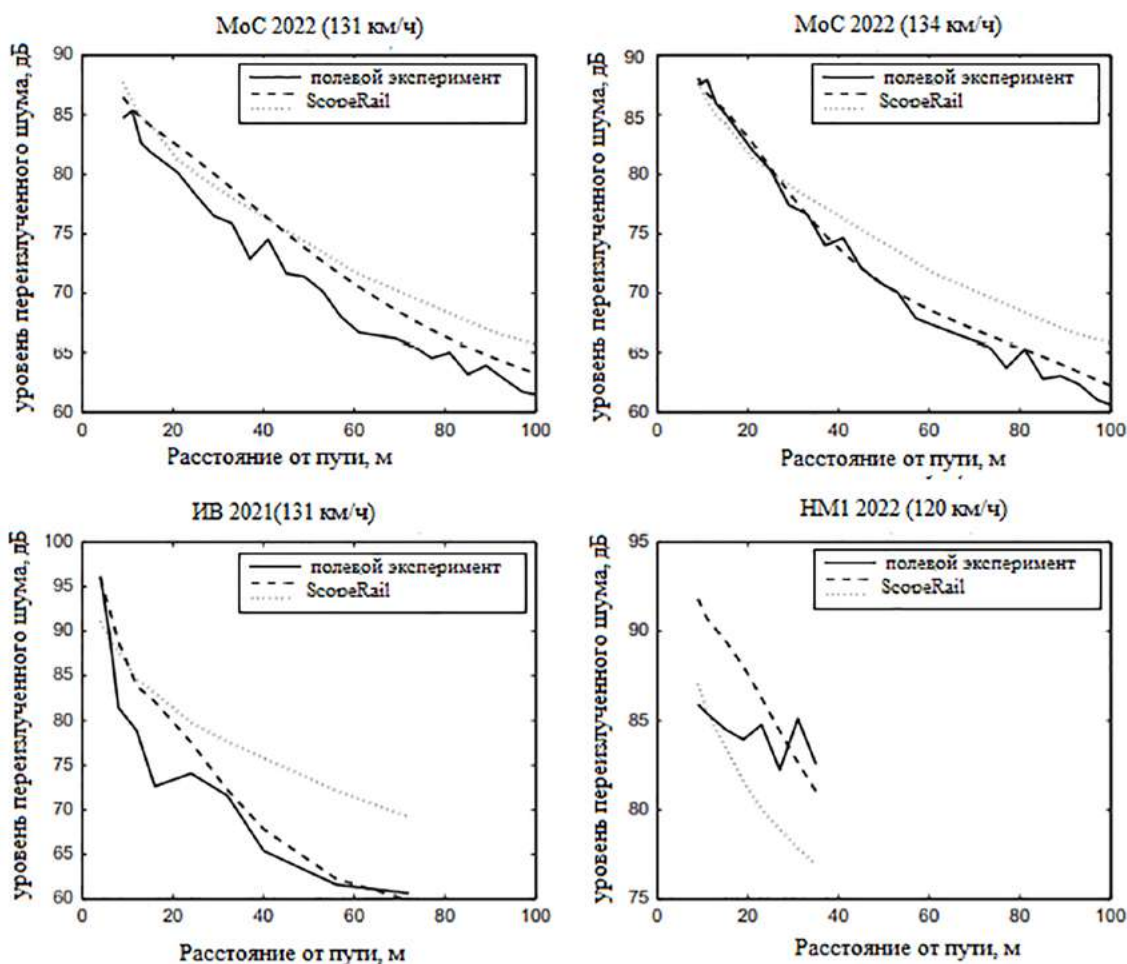


Рис. 3. Производительность двухслойной модели MoC 2022 (131 км/ч), MoC 2022(134 км/ч), ИВ2021, НМ1 2022

назначенной для оценки уровней переизлученного шума и вибрации на территории жилой застройки, вызванных прохождением скоростных поездов. Даны характеристики численной модели ScopeRail, являющейся трехмерной, которая позволяет симитировать возникновение и распространение волн переизлученной вибрации и шума от проходящих поездов. Моделирование проводилось много раз с разным набором комбинаций начальных входных параметров для получения базы данных с полученными результатами. Также проведен анализ этих результатов с целью выявить конкретные параметры, влияющие на переизлученную вибрацию. Анализ ScopeRail показал, что модель позволяет мгновенно прогнозировать уровни вибрации

грунта при наличии различных скоростей поездов и профилей грунта. Также в модель был добавлен набор эмпирических факторов для облегчения прогнозирования структурной вибрации и шума в помещениях зданий, расположенных вблизи высокоскоростных линий.

Преимущество этой повышенной точности заключается в том, что она снижает вероятность занижения или завышения прогнозируемых уровней вибрации. Если уровни вибрации завышены, то для дальнейшего анализа не потребуются ненужные детали оценки вибрации, когда занижены — могут потребоваться меры по снижению вибрации. Поэтому более точные прогнозы могут привести к значительной экономии средств.

Библиографический список

1. Леванчук А. В. Гигиеническое обоснование методов снижения акустической нагрузки в жилых помещениях / А. В. Леванчук, О. И. Копытенкова, Т. А. Афанасьева // *Здоровье населения и среда обитания*. — 2020. — № 10(331). — С. 46–51.
2. Рябец В. В. Особенности оценки комфортности среды городских поселений с учетом виброакустического воздействия в зоне влияния транспортных железнодорожных узлов / В. В. Рябец, А. В. Леванчук // *Вестник Евразийской науки*. — 2021. — Т. 13. — № 6.
3. Фиала П. Прогнозирование внутреннего шума в зданиях, создаваемого подземным железнодорожным движением / П. Фиала, Г. Дегранде // *Журнал звука и вибрации*. — Вып. 293. — С. 680–690.
4. Канонин Ю. Н. Травматизм на объектах железнодорожного транспорта / Ю. Н. Канонин // *Охрана труда и техносферная безопасность на объектах промышленности, транспорта и социальных инфраструктур: сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции*. — Пермь, 2023. — С. 226–229.
5. Рябец В. В., Овчаренко М. С. Перспективный метод снижения виброакустической нагрузки вдоль линейных объектов железнодорожного транспорта / В. В. Рябец, М. С. Овчаренко // *Сборник трудов III Бетанкуровского международного форума*. — 2021. — Т. 2. — С. 125–127.
6. Завьялов А. Б. Исследование смягчения вибрации и переизлученного шума в зданиях, создаваемых при движении железнодорожного транспорта / А. Б. Завьялов, О. И. Копытенкова, А. М. Евстафьев // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2023. — Т. 20. — № 2. — С. 433–440.
7. Терловая Н. В. Технологические решения по минимизации шума и вибрации на железнодорожном транспорте / Н. В. Терловая, А. А. Ступак // *Проблемы и перспективы формирования инфраструктуры экономики знаний: сборник статей*. — М., 2018. — С. 177–181.
8. Акулова Е. А. Технология защиты зданий от вибрации / Е. А. Акулова // *Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых: сборник научных статей II Всероссийской конференции перспективных разработок*. — М., 2021. — Т. 5. — С. 192–194.
9. Иванов Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник / Н. И. Иванов. М., 2016.
10. Панова А. А. Влияние железнодорожного транспорта на здоровье человека / А. А. Панова, А. Ю. Ермакова, И. Г. Захарова // *Молодежная наука: вызовы и перспективы: материалы III Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых*. — Самара, 2020. — С. 341–343.

Дата поступления: 10.08.2023

Решение о публикации: 29.09.2023

Контактная информация:

ЗАВЬЯЛОВ Алексей Борисович — ассистент;
zenitpiter91@inbox.ru

Prediction of Re-Radiated Noise and Vibration Generated in the Vicinity of Railroad Lines

A. B. Zavyalov

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

For citation: Zavyalov A. B. Prediction of Re-Radiated Noise and Vibration Generated in the Vicinity of Railroad Lines // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 820–827. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-820-827

Summary

Purpose: To analyze a ScopeRail model capable of predicting re-radiated noise and vibration in structures located in close proximity to rail lines. To compare the obtained results with an alternative, widely used model for accuracy assessment and the potential cost reduction of assessing the impact of vibrations on residential areas for new railway lines. **Methods:** To perform statistical analysis of the obtained data for modeling vibration of different types of ground. To calculate simulation results in order to create a database of vibration characteristics for different ground conditions, train speeds and distances from the track. **Results:** The results obtained have been analyzed and compared with an alternative, widely used model for determining accuracy. It is found that the ScopeRail model yields higher prediction accuracy, which can potentially reduce the cost of assessing the impact of vibrations on residential areas for new rail lines. A model is obtained which can instantly predict the vibration and re-radiated noise levels for different types of soil at different speeds of passing trains. **Practical significance:** Re-radiated vibration and noise model for the spaces in buildings immediately adjacent to the railroad track has been developed using a set of empirically obtained factors. Vibration and noise impacts have also been modeled using additional vibroacoustic mitigation measures (slabs and ballast mats) as well as vibration excitation parameters (switches, crossings and wheel stoppers).

Keywords: Vibration, re-radiated noise, soil depth, wave velocity, accuracy, soil.

References

1. Levanchuk A. V., Kopytenkova O. I., Afanasyeva T. A. Gigienicheskoe obosnovanie metodov snizheniya akusticheskoy nagruzki v zhilyh pomesheniya [Hygienic justification of methods to reduce the acoustic load in residential areas]. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya* [Population health and the environment]. 2020, Iss. 10(331), pp. 46–51. (In Russian)
2. Ryabets V. V., Levanchuk A. V. Osobennosti ocenki komfortnosti sredi gorodskih poseleniy s uchetom vibroakusticheskogo vozdeystviya v zone vliyaniya transportnykh zheleznodorozhnykh uzlov [Peculiarities of assessing the comfort of the environment of urban settlements, taking into account the vibroacoustic impact in the zone of influence of transport railway hubs]. *Vestnik Evraziyskoy nauki* [Bulletin of Eurasian Science]. 2021, vol. 13, Iss. 6. (In Russian)
3. Fiala P., Degrande G., Augusztinovicz F. Prediction of internal noise in buildings generated by underground rail traffic. *Sound and vibration log*, 2012, Iss. 293, pp. 680–690. (In English)
4. Kanonin Yu. N. *Travmatizm na obektakh zheleznodorozhnogo transporta. Okhrana truda i tekhnosfernaya bezopasnost na obektakh promyshlennosti, transporta i sotsialnykh infrastruktur: sbornik statey II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Traumatism at railway transport facilities. Labor protection and technosphere safety at industrial, transport and social infrastructure facilities: collection of articles of the II All-Russian Scientific and Practical Conference]. Perm, 2023. pp. 226–229. (In Russian)
5. Ryabets V. V., Ovcharenko M. S. Perspektivnyy metod snizheniya vibroakusticheskoy nagruzki vdol' ob'ektov zheleznodorozhnogo transporta [Promising method to reduce vibroacoustic load along linear objects of railway transport]. *Sbornik trudov III Betankurovskogo mezhdunarodnogo foruma* [Proceedings of the III Betancourt International Forum]. 2021, vol. 2, pp. 125–127. (In Russian)
6. Zav'yalov A. B., Kopytenkova O. I., Evstaf'ev A. M. Issledovanie smyagcheniya vibratsii i pereizluchennogo shuma v zdaniyakh, sozdavaemykh pri dvizhenii zheleznodorozhnogo transporta [Prediction of over-radiated noise and vibration generated in the vicinity of railroad lines]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2023, vol. 20, Iss. 2, pp. 433–440. (In Russian)
7. Terlovaya N. V., Stupak A. A. Tekhnologicheskie resheniya po minimizatsii shuma i vibratsii na zheleznodorozhnom transporte [Technological solutions to minimize noise and vibration in railway transport]. *Problemy i perspektivy formirovaniya infrastruktury ekonomiki znaniy: sbornik statey* [Problems and prospects for the formation of the infra-

structure of the knowledge economy: digest of articles]. Moscow, 2018, pp. 177–181. (In Russian)

8. Akulova E. A. Tekhnologiya zashchity zdaniy ot vibratsii [Technology for protecting buildings from vibration]. *Innovatsionnyy potentsial razvitiya obshchestva: vzglyad molodykh uchenykh: sbornik nauchnykh statey II Vserossiyskoy konferentsii perspektivnykh razrabotok* [Innovative potential for the development of society: the view of young scientists: a collection of scientific articles of the II All-Russian Conference of Advanced Developments]. Moscow, 2021, vol. 5, pp. 92–194. (In Russian)

9. Ivanov N. I. *Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika borby s shumom: uchebnik* [Engineering acoustics. Theory and practice of noise control: textbook]. Moscow, 2016. (In Russian)

10. Panova A. A., Ermachkova A. Yu., Zakharova I. G. *Vliyanie zheleznodorozhnogo transporta na zdorovye cheloveka. Molodezhnaya nauka: vyzovy i perspektivy: materialy III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh* [The influence of railway transport on human health. Youth science: challenges and prospects: materials of the III All-Russian scientific-practical conference of students and young scientists]. Samara, 2020. pp. 341–343. (In Russian)

Received: August 10, 2023

Accepted: September 29, 2023

Author's information:

Alexey B. Zavvalov — Assistant; zenitpiter91@inbox.ru

УДК 621.183.386

Совершенствование транспортировки АХОВ на автомобильном транспорте

Е. Г. Асманкин, Е. М. Зубкова, В. В. Смыгалин, А. Н. Хлебородов, С. О. Шкуратов

Российский университет транспорта (МИИТ), Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова 9, стр. 9

Для цитирования: Асманкин Е. Г., Зубкова Е. М., Смыгалин В. В., Хлебородов А. Н., Шкуратов С. О. Совершенствование транспортировки АХОВ на автомобильном транспорте // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 828–834. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-828-834

Аннотация

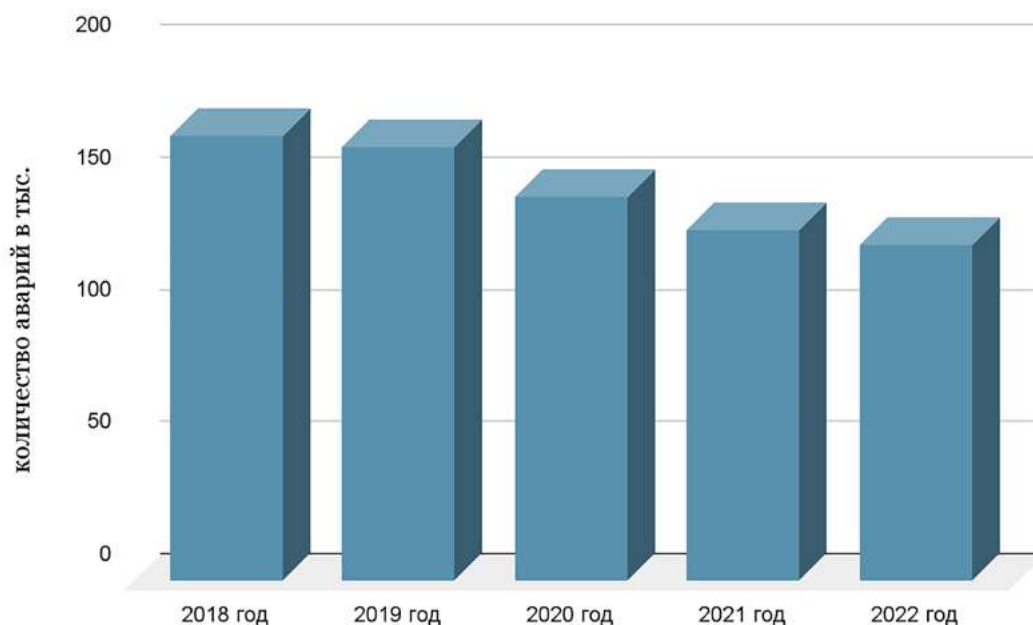
Цель: Проблема транспортировки АХОВ на автомобильном транспорте в настоящее время является особенно актуальной в связи с последними геополитическими событиями, именно транспортировка внутри страны является ключевой задачей для Российской Федерации. Для обеспечения безопасности перевозочного процесса требуется усовершенствование конструкций автомобильных транспортных средств. **Методы:** Инструментом для исследования и анализа проблемы выбора оптимального сечения предохранительного клапана на автомобильной цистерне является проходное сечение диаметра предохранительного клапана цистерны. **Результаты:** В статье предложены расчеты сечения предохранительного клапана цистерны с большим диаметром, чем устанавливаемые на данный момент на автоцистерны в России. Также в статье приведены статистические данные аварий на автомобильном транспорте с 2018 по 2020 г. **Практическая значимость:** Полуэмпирические модели теплофизических процессов внутри цистерны при возникновении избыточного давления описаны большим количеством авторов. Степень разработанности темы данного исследования невысокая, в отличие от тем, посвященных избыточному давлению в цистерне-разрядки и термодинамическому процессу. Статья рассматривает усовершенствование конструкций автомобильных цистерн для перевозки светлых нефтепродуктов. Предложен вариант усовершенствования конструкции цистерны посредством установки на цистерну предохранительного клапана с большим сечением. Представлены результаты расчетов оптимального сечения дыхательного клапана в табличной форме. Расчеты имеют практическую значимость, так как в случае внедрения данных предохранительных (дыхательных) клапанов существует возможность повысить устойчивость тонкостенной оболочки цистерны и увеличить безопасность при транспортировках на автомобильном транспорте. Увеличение проходного сечения предохранительного клапана цистерны — технически эффективный и экономически выгодный вариант увеличения степени безопасности перевозочного процесса.

Ключевые слова: Аварийно-опасные химические вещества (АХОВ), транспортировка АХОВ, эквивалентный диаметр клапана, автоцистерна, проходное сечение впускного предохранительного клапана.

Введение

Ежегодно в Российской Федерации перевозится более 1 млрд тонн груза на автомобильном транспорте. Стоит отметить, что автомобили являются самым опасным видом

транспорта. Каждый день на дорогах России случается около 400 аварий с пострадавшими. Статистика аварий на автомобильном транспорте за период с 2018 по 2022 год представлена на рисунке.



Статистика аварий на автомобильном транспорте за 2018–2022 гг.

Несмотря на сниженное количество аварий, жизни людей на дорогах все равно в зоне риска. Добавляя к этому перевозку легковоспламеняющихся, взрывчатых, радиоактивных и других опасных химических веществ, последствия могут стать катастрофическими для жизни людей и окружающей среды.

Перевозка АХОВ требует специальной организации и зависит от класса опасности перевозимого вещества. Всего выделяют 4 класса опасности:

1. Вещества, которые взрывоопасны и имеют в основе легковоспламеняющиеся предметы. В первую очередь это сухие смеси пиротехнического назначения и т. д.
2. Вещества, которые транспортируются в газообразном состоянии: сжатые, сжиженные низкой температурой, растворенные под действием высокого давления.
3. Бензин, керосин, жидкие взрывчатые вещества, спиртосодержащие вещества и т. д.
4. Вещества, способные легко возгораться от воздействия открытого пламени, даже от искр,

а также способные к самонагреву: сера, калий, натрий и карбид кальция.

При перевозке АХОВ используются специально оборудованные транспортные средства: контейнеровозы, рефрижераторы, цистерны и специально оборудованные бортовые автомобили. Наиболее опасными АХОВ являются взрывчатые вещества. Помимо сухих смесей пиротехнического назначения к ним также относятся нефтепродукты. В качестве основного ТС по перевозке нефтепродуктов следует рассматривать автоцистерны. Моделей автоцистерн много, но в большинстве случаев они отличаются лишь объемом. В табл. 1 представлены характеристики некоторых автоцистерн. В табл. 2, соответственно, показаны параметры светлых нефтепродуктов [1].

Расчет эквивалентного диаметра клапана

Налив нефтепродуктов происходит различными способами: герметичными технологиями, открытой и замкнутой струей. При использовании герметичных технологий весь процесс авто-

Таблица 1. Характеристика автоцистерн

Модель автоцистерны	Наименование АХОВ	Емкость цистерны, м ³	Донный клапан, мм	Материал цистерны	Устройство дыхательное
АЦ-10	Светлые нефтепродукты	10	80	09Г2С толщиной 4 мм	УД 2-80
АЦ-12		12			
АЦ-8		8			

Таблица 2. Характеристика некоторых АХОВ

Название АХОВ	Плотность, кг/м ³	Температура кипения, °С	Пороговая токсодоза, мг/л	Смертельная концентрация, мг/кг
Бензин (АИ-100)	795	30–200	38–49	100
Керосин	780–850*	150–250		300–500
Дизель	830	240–400		400

*В зависимости от температуры.

матизирован, при этом есть специальные отсеки, отводящие пары для избежания воспламенения. Также существует еще один способ налива. Его используют достаточно редко, так как он имеет значительные проблемы с контролем процесса. Этот способ осуществляется через сливной узел. Слив нефтепродуктов осуществляется разными методами. Их можно слить самотеком через нижний сливной узел в резервуар. Таким способом избегают потери нефтепродукта, характеризующегося высокой испаряемостью. Закрытый слив позволяет избегать загрязнения груза, так как все происходит через герметичный рукав, соединенный с автоцистерной. Верхний слив также производится самотеком при помощи вакуумного насоса.

Для оценки проходного сечения впускного предохранительного клапана будем исходить из предположения, что поток теплоты, вносимый воздухом через предохранительный клапан, должен компенсировать тепловой поток за счет внешней теплоотдачи котла цистерны в окружающую среду.

Запишем выражение для теплового потока воздуха, вносимого в цистерну через предохранительный клапан:

Таблица 3. Исходные данные для расчета [2, 3]

№	Физическая величина	Размерность	Величина
1	Материал стенок котла (сталь 09ГС 2)	—	—
2	Коэффициент теплопроводности стали ($\lambda_{ст}$)	Вт/(м · К)	58
3	Объем цистерны (АЦ-8, АЦ-10, АЦ-12)	м ³	8, 10, 12
4	Коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности котла цистерны	Вт/(м ² · К)	362,3
5	Коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности котла цистерны	Вт/(м ² · К)	17,6
6	Толщина стенок котла ($\sigma_{ст}$)	мм	4
7	Перепад давления (ΔP)	Па	0,024

$$Q_{cp} = C_{Pв} G \chi (t_T - t_o), \quad (1)$$

где $C_{Pв}$ — удельная изобарная теплоемкость воздуха;

t_T — температура технологического процесса;

t_o — температура окружающей среды;

$\chi = \frac{0,1}{1}$ — коэффициент, характеризующий степень нагрева поступающего воздуха;

G — массовый расход воздуха через впускной предохранительный клапан;

$$G = \mu S \sqrt{2\rho_B \Delta P}, \quad (2)$$

где μ — коэффициент расхода;

S — эквивалентная площадь проходного сечения впускного предохранительного клапана;

ρ_B — плотность воздуха;

ΔP — перепад давления, при котором срабатывает впускной предохранительный клапан.

$$G = 0,7 \cdot 58,169 \cdot \sqrt{2 \cdot 1,2754 \cdot 0,024} = 10,07;$$

$$Q_{cp1} = 1004 \cdot 10,07 \cdot 0,1 \cdot 30 = 30345,08676$$

при $\chi = 0,1$;

$$Q_{cp2} = 1004 \cdot 10,07 \cdot 0,5 \cdot 30 = 151725,4338$$

при $\chi = 0,5$;

$$Q_{cp3} = 1004 \cdot 10,07 \cdot 1 \cdot 30 = 303450,8676$$

при $\chi = 1$;

Запишем выражение для теплового потока за счет внешней теплоотдачи котла цистерны в окружающую среду:

$$Q_{cp} = kF(t_T - t_o), \quad (3)$$

где k — коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\sigma_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{362,3} + \frac{0,004}{58} + \frac{1}{17,6}} = 16,76522, \quad (4)$$

где α_1 — коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности котла цистерны;

α_2 — коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности котла цистерны; $\lambda_{ст}, \sigma_{ст}$ — коэффициенты теплопроводности материала стенки котла и толщины стенки котла;

F — внешняя поверхность котла цистерны.

Для недопущения снижения давления в котле цистерны после открытия впускного предохранительного клапана необходимо выполнение условия:

$$Q_{cp} = Q_B. \quad (5)$$

По полученным данным найдем внешнюю поверхность котла цистерны (1–5):

$$F = \frac{Q_B}{k(t_T - t_o)}; \quad (6)$$

$$F_1 = \frac{30345,08676}{16,76522 \cdot (15 + 15)} = 0,000603334$$

при $\chi = 0,1$;

$$F_2 = \frac{151725,4338}{16,76522 \cdot (15 + 15)} = 0,00301667$$

при $\chi = 0,5$;

$$F_3 = \frac{303450,8676}{16,76522 \cdot (15 + 15)} = 0,00603334$$

при $\chi = 1$;

Из уравнений (1–6) получим формулу для оценки эквивалентного диаметра проходного сечения впускного предохранительного клапана:

$$D = \sqrt{\frac{4kF}{\pi C_{P_B} \chi \mu \sqrt{2\rho_B \Delta P}}}; \quad (7)$$

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 16,76522 \cdot 0,000603334}{\pi \cdot 1004 \cdot 0,1 \cdot 0,7 \cdot \sqrt{2 \cdot 1,2754 \cdot 0,024}}} = 0,0264316;$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot 16,76522 \cdot 0,00301667}{\pi \cdot 1004 \cdot 0,5 \cdot 0,7 \sqrt{2 \cdot 1,2754 \cdot 0,024}}} = 0,0264972;$$

$$D_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot 16,76522 \cdot 0,00603334}{\pi \cdot 1004 \cdot 1 \cdot 0,7 \sqrt{2 \cdot 1,2754 \cdot 0,024}}} = 0,0264316.$$

Расчет произведем для цистерн моделей АЦ-8, АЦ-10, АЦ-12 для следующих характеристик предохранительного клапана: $\Delta P = 0,024 \cdot 10 \cdot \text{Па}$, $\Delta t = -15^\circ \text{C}$ — и температуры окружающей среды. Для определения коэффициентов теплоотдачи воспользуемся критериальными уравнениями для естественной конвекции.

Результаты расчета эквивалентного диаметра проходного сечения впускного предохранительного клапана представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчета для АЦ-8

χ	D_1
0,1	0,0264316
0,5	0,0264972
1	0,0264316

Данные расчеты были проведены также для АЦ-10, АЦ-12.

Для получения уточненной количественной оценки необходимо проведение специальных экспериментальных исследований либо построение нестационарных математических моделей более высокого уровня с целью уточнения χ — коэффициента, характеризующего степень нагрева воздуха, поступающего в цистерну через клапан [4, 5].

Выводы

Проблема транспортировки АХОВ на автомобильном транспорте в настоящее время является особенно актуальной. Инструментом для

исследования и анализа проблемы выбора оптимального сечения предохранительного клапана на автомобильной цистерне является проходное сечение диаметра предохранительного клапана цистерны. В статье предложен вариант усовершенствования конструкции цистерны методом установки на нее предохранительного клапана с большим сечением. Представлены результаты расчетов оптимального сечения дыхательного клапана в табличной форме. Расчеты имеют практическую значимость, так как в случае внедрения данных предохранительных (дыхательных) клапанов существует возможность повысить устойчивость тонкостенной оболочки цистерны и увеличить безопасность при транспортировках на автомобильном транспорте. Увеличение проходного сечения предохранительного клапана цистерны — технически эффективный и экономически выгодный вариант увеличения степени безопасности перевозочного процесса [6–8].

Библиографический список

1. Цистерны: устройство, эксплуатация, ремонт: справочное пособие. — М.: 1990. — 154 с.
2. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. — М.: Наука, 1972. — 720 с.
3. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. — М.: Энергоиздат, 1981. — 417 с.
4. Петров И. Совершенствование методов оценки и управления аварийным риском в чрезвычайных ситуациях при перевозке нефтепродуктов на железнодорожном транспорте / И. Петров. — URL: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-metodov-otsenki-i-upravleniya-avariinym-riskom-v-chrezvychainykh-situatsii>.
5. Безопасность жизнедеятельности / Под общ. ред. С. В. Белова. — М.: Высшая школа, 2001.
6. ГОСТ Р 22.0.01—94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Основные положения.
7. Правила перевозок опасных грузов. — М., 2004.

8. Соколов Ю. И. Вопросы безопасности транспортировки опасных грузов / Ю. И. Соколов // Проблемы анализа риска. — 2009. — Т. 6. — № 1.

Дата поступления: 25.07.2023

Решение о публикации: 19.09.2023

Контактная информация:

АСМАНКИН Евгений Геннадьевич — ст. преподаватель кафедры «ХиИЭ»; asman08@yandex.ru

ШКУРАТОВ Семен Олегович — студент;

sem.shkuratov@yandex.ru

ЗУБКОВА Екатерина Михайловна — студент;

katya.zubkova2909@gmail.com

СМЫГАЛИН Владислав Вадимович — студент;

noname23082@yandex.ru

ХЛЕБОРОДОВ Алексей Николаевич — студент;

pazan2021@mail.ru

The Improvement of Hazardous Chemicals Transportation Methods by Motor Vehicles

Ye. G. Asmankin, Ye. M. Zubkova, V. V. Smygalin, A. N. Khleborodov, S. O. Shkuratov

Moscow State University of Railway Engineering, 9 bld. 9, Obraztsova st., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Asmankin Ye. G., Zubkova Ye. M., Smygalin V. V., Khleborodov A. N., Shkuratov S. O. The Improvement of Hazardous Chemicals Transportation Methods by Motor Vehicles // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 828–834. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-828-834

Abstract

Purpose: The issue of hazardous chemicals transportation by motor vehicles is especially crucial nowadays, given recent geopolitical situation. Transportation inside the country has become a key task for the Russian Federation. The improvement of motor vehicle construction is required in order to provide security of the transportation process. **Methods:** The tool for research and analysis of the issue of choosing the optimal cross-section of the relief valve on a tank car is the flow section diameter of the tank car's relief valve. **Results:** The article proposes calculations for the cross-section of the relief valve of a tank with a larger diameter than those currently installed on tank cars in Russia. The article also provides statistical data on accidents in road transport from 2018 to 2020. **Practical significance:** Semi-empirical models of thermophysical processes inside a tank during the occurrence of excess pressure have been described by numerous authors. The level of development of the topic of this research is relatively low, unlike topics dedicated to excess pressure in pressure-relief tanks and thermodynamic processes. The article discusses the improvement of designs of tank cars used for the transportation of light petroleum products. The authors have offered a way to improve the construction of a tank with the help of installation of a relief valve of a bigger section. The results of the calculations of the optimal section in the relief valve are presented in a tabular form. The calculation has practical significance as in the case of integration of the data on relief (breather) valves there exists a possibility of increasing the stability of the thin shell of a tank and so of increasing the security during the transportation by motor vehicles. The enlargement of flow area of the tank relief valve is a technically efficient and economically profitable way to increase the degree of transportation process security.

Keywords: Emergency hazardous chemicals (AHS), transportation of AHS, equivalent valve diameter, tank car, orifice of the inlet relief valve.

References

1. *Tcisterny: ustrojstvo, jekspluatacija, remont: spravochnoe posobie* [Tanks: device, operation, repair: reference book]. Moscow, 1990, 154 p. (In Russian)

2. Vargafitik N. B. *Spravochnik po teplofizicheskim svojstvam gazov i zhidkostej* [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow: Nauka Publ., 1972, 720 p. (In Russian)

3. Isachenko V. P. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energoizdat Publ., 1981, 417 p. (In Russian)

4. Petrov I. *Sovershenstvovanie metodov ocenki i upravlenija avarijnym riskom v chrezvychajnyh situacijah pri perevozke nefteproduktov na zheleznodorozhnom transporte* [Improvement of methods for assessing and managing emergency risk in emergency situations during the transportation of petroleum products by rail]. Available at: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-metodov-otsenki-i-upravleniya-avariinym-riskom-v-chrezvychajnykh-situatsii>. (In Russian)

5. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety]. Belov S. B. (Ed.). Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2001. (In Russian)

6. *GOST R 22.0.01—94. Bezopasnost' v chrezvychajnyh situacijah. Osnovnye polozhenija* [GOST R 22.0.01—94. Safety in emergency situations. Basic provisions]. (In Russian)

7. *Pravila perevozok opasnyh грузов* [Rules for the transportation of dangerous goods]. Moscow, 2004. (In Russian)

8. Sokolov Yu. *Voprosy bezopasnosti transportirovki opasnyh грузов* [Issues of safety of transportation of dangerous goods]. *Problemy analiza riska* [Risk Analysis Issues]. 2009, vol. 6, Iss. 1. (In Russian)

Received: July 25, 2023

Accepted: September 19, 2023

Author's information:

Evgeny G. ASMANKIN — Senior Lecturer, Department “Chemistry and Environmental Engineering”;

asman08@yandex.ru

Semyon O. SHKURATOV — Student;

sem.shkuratov@yandex.ru

Ekaterina M. ZUBKOVA — Student;

katya.zubkova2909@gmail.com

Vladislav V. SMYGALIN — Student;

noname23082@yandex.ru

Alexey N. KHLEBORODOV — Student;

pazan2021@mail.ru

УДК 629.463.32

К вопросам транспортировки гептила железнодорожным транспортом

Н. Д. Лапшин, В. А. Миленьких, С. В. Дульнева, Е. Г. Асманкин, Т. А. Сильянова

Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, Образцова, 9

Для цитирования: Лапшин Н. Д., Миленьких В. А., Дульнева С. В., Асманкин Е. Г., Сильянова Т. А. К вопросам транспортировки гептила железнодорожным транспортом // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 835–842. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-835-842

Аннотация

Цель: Оценить свойства гептила и его воздействие на организм человека и окружающую среду. Представить для ознакомления сферы применения гептила и особенности его транспортировки железнодорожным транспортом. Рассмотреть конструктивные особенности вагона-цистерны модели 15-629 и произвести расчет для подбора оптимальной площади сечения впускного отверстия для предохранительного клапана с целью увеличения безопасности при транспортировке гептила вагоном-цистерной модели 15-629. **Методы:** Используя технические характеристики шестиосной, сочлененной цистерны модели 15-629, произвести расчет площади внутренней и наружной площадей поверхности котла. Далее проведем вычисления массового расхода воздуха через впускной предохранительный клапан и определим тепловой поток, происходящий за счет внешней теплоотдачи котла цистерны в окружающую среду. Эти данные необходимы для оценки эквивалентного диаметра проходного сечения впускного предохранительного клапана. **Результаты:** Благодаря произведенным расчетам был определен более подходящий диаметр проходного сечения впускного предохранительного клапана, который обеспечит более безопасную транспортировку высокотоксичного компонента жидкостного ракетного топлива, применяемого как на российских ракетах-носителях («Космос», «Циклон», «Протон»), так и зарубежных (на американских ракетах семейства «Титан», французских РН семейства «Ариан», китайских РН семейства «Большой Поход» и др.). **Практическая значимость:** Гидразиновые горючие являются более энергетически эффективными по сравнению с углеводородным горючим, поэтому за последние годы увеличилось применение НДМГ. Из-за стремительного развития космической промышленности возрастает количество грузовых перевозок гептила на железнодорожном транспорте. Дабы предотвратить техногенные катастрофы, были произведены расчеты диаметра впускного предохранительного клапана для минимизирования разгерметизации вагона-цистерны вне зависимости от температурных условий.

Ключевые слова: Транспортировка гептила, железнодорожный транспорт, предохранительный клапан вагона-цистерны, расчет оптимальной площади сечения впускного отверстия для предохранительного клапана, свойства гептила.

Введение.

Характеристика ракетного топлива

Гептил, или несимметричный диметилгидразин (НДМГ), — это высокотоксичное жидкое химическое соединение, органический растворитель из группы ациклических альдегидов. Явля-

ется компонентом высококипящего ракетного топлива. Его химическая формула — $C_7H_{14}O$, молекулярная масса — 114 г/моль. Он представляет из себя бесцветную прозрачную жидкость, обладает характерным для аминов резким запахом и температурой кипения 63 градуса по Цель-

сию; легко растворяется в воде и спиртах; летуч; является сильным восстановителем; имеет высокую плотность около 0,83 г/мл [1]. Также гептил используется в промышленности в качестве растворителя для различных материалов, лакокрасочных средств, фармацевтики, пластика, резины и пищевых добавок. Применяется в производстве полиуретанов и других полимерных материалов. Может быть использован в качестве промышленного растворителя для этилцеллюлозы, жирных кислот и некоторых других веществ.

Гептил — компонент ракетного топлива, которое используется как в космической, так и в военной промышленности, его необходимость с каждым годом будет только увеличиваться. Большая часть перевозок гептила осуществляется железнодорожным транспортом в специальных ВЦ, одной из которых является модель 15-629. При несрабатывании предохранительного клапана цистерна может потерять устойчивость от избыточного давления или схлопнуться из-за вакуума, обе эти ситуации приведут к разливу груза. В данной статье рассматривается одно из экономически выгодных решений — это изменение диаметра проходного сечения впускного предохранительного клапана для обеспечения безопасности при транспортировке нефтепродуктов железнодорожным транспортом.

Данное вещество относят к первому классу опасности, предельная допустимая концентрация для водоемов — 0,01 мл/л, безопасный уровень концентрации в атмосферном воздухе — 0,001 мг/м³ [2]. Самым опасным источником отравления является вдыхание паров. Гептил (НДМГ) при воздействии на людей поражает буквально все системы человека, начиная с того, что он является канцерогенным веществом, и поражает иммунную систему, сердечно-сосудистую, лимфатическую, нервную систему, желудочно-кишечный тракт, печень, кожу, а также вызывает нарушение репродуктивной деятельности. НДМГ по физиологическому

воздействию на живые организмы можно классифицировать как суперэкоотоксикант [3]. Периодическому медицинскому осмотру ежегодно подлежит 410 чел., контактирующих с основной вредностью. Распределение по полу: 72,5 % работающих — мужчины, 7,5 % — женщины. Средний возраст составил 45,6 года, около 60 % имеют стаж работы более 10 лет. Структура заболеваний, зарегистрированных у работающих в контакте с несимметричным диметилгидразином (НДМГ), стабильна на протяжении анализируемого периода. Первые ранговые места занимают болезни системы кровообращения — 27,3 %; болезни органов дыхания — 3,3 %; болезни органов пищеварения — 11,5 %; болезни мочеполовой системы — 10,5 %; болезни глаз — 8,2 % [4].

Главный вывод о влиянии гептила на организм человека — гидразин оказывает преимущественно гепатотропное и нейротропное действие на организм человека [5, 6].

По классификации опасных грузов НДМГ причисляется к легковоспламеняющимся жидкостям, т. е. к 3 классу. По правилам перевозки по железным дорогам опасных грузов допускаются только те грузы, которые находятся в алфавитном указателе опасных грузов, допущенных к перевозке железнодорожным транспортом. Погрузка опасных грузов запрещается без проведения технического осмотра специальных вагонов и подтверждения их годности для транспортировки опасных грузов. Вагоны, транспортирующие данный вид грузов, обязаны обладать маркировками знака опасности (номер знака опасности для гептила — 368) [7]. Данные знаки опасности могут быть удалены исключительно только после выгрузки опасного вещества. Маркировки и знаки опасности также обязаны находиться на порожних неочищенных вагонах, соответствующих перевозимому в них грузу. Транспортировка НДМГ, а также порожней тары из-под этого груза должна осуществляться в специализированных

вагонах исключительно повагонными или контейнерными отправлениями [8].

Несимметричный диметилгидразин, как и большая часть АХОВ, перевозится железнодорожным транспортом в специальных вагонах — вагонах-цистернах. Вагон-цистерна (далее — ВЦ) — это вид подвижного состава для перевозки жидкостей, сжиженных газов, нефтепродуктов и химически активных веществ.

Транспортировка гептила железнодорожным транспортом

Цистерны для перевозки гептила являются специальными емкостями, созданными для безопасной и эффективной перевозки гептила, который является очень токсичным материалом, используемым в промышленности в качестве растворителя и в других химических процессах. Цистерны для перевозки гептила должны быть изготовлены из материалов, которые не реагируют с гептилом, имеют высокую степень герметичности и специальную систему вентиляции для предотвращения образования паров. Кроме того, цистерны должны быть достаточно прочными, чтобы выдерживать давление, которое создается внутри них во время перевозки. Также следует отметить, что перевозка гептила является опасной деятельностью, требующей соблюдения специальных правил и мер безопасности. Для перевозки гептила должны быть использованы специально обученные водители и специализированное оборудование. Кроме того, цистерны для перевозки гептила должны проходить регулярную проверку на условия, соответствующие безопасности, а также должны соответствовать соответствующим стандартам и нормам.

Для перевозки гептила используют шестиосную, сочлененную цистерну модели 15-629. Эта модель выпускается серийно с 2019 г. по сегодняшний день, срок службы вагона 40 лет. Данный вагон можно эксплуатировать в температурном

интервале от минус 60 до плюс 50 градусов Цельсия. После окончания срока службы независимо от состояния вагона эксплуатация должна быть прекращена. Данная цистерна состоит из двух секций, каждая секция оборудована автоматическим и стояночным тормозом (тормозная система должна сохранять свою работоспособность при температурах от минус 60 до плюс 55 °С) и имеет котел с полурамами, к которым крепится котел вагона. Котел данной цистерны выполнен из стали марки 09Г2С. Толщина обечайки 8 мм, а толщина днища 10 мм. Обечайки вагона состоят из нескольких частей, а именно из двух средних обечайки и двух крайних (для одной секции вагона). Средняя обечайка имеет уклон 0°40' к сливному прибору, что обеспечивает полный слив нефтепродукта. Объем данного вагона составляет 160 м³, объем одной секции равен 80 м³. Внутренний номинальный диаметр котла цистерны равен 3120 мм. Каждая секция ВЦ оснащена предохранительно-впускным клапаном, внутренними и наружными лестницами, люком-лазом, сливным прибором, бобышкой заземления, козырьком. Предохранительно-впускной клапан необходим для предотвращения избыточного давления и для ликвидации вакуума в котле. Рабочее давление в котле вагона не должно превышать 0,069 МПа, а расчетное 0,32 МПа. Рабочее давление предохранительного и впускного клапана 0,26 МПа и минус 0,015 МПа. Также клапан оборудован пламегасителем, что предотвращает возгорание продукта внутри котла при пожаре. К обслуживанию ВЦ модели 15-629 допускаются лица старше 18 лет, ознакомленные с конструкцией ВЦ, с правилами оказания первой помощи, с правилами техники безопасности при работе с перевозимым продуктом, прошедшие медицинское обследование, обучение и сдавшие экзамены. Категорически запрещается эксплуатация вагона при неисправности ходовой части, при температурах от минус 60 до плюс 50 °С, при нарушении герме-

Таблица 1. Технические характеристики шестиосной, сочлененной цистерны модели 15-629

Физическая величина	Размерность	Величина
Материал стенок котла (сталь 09ГС 2)		
Плотность стали	кг/м ³	7800
Удельная теплоемкость стали	Дж/(кг · К)	480
Коэффициент теплопроводности стали	Вт/(м · К)	58
Объем цистерны	м ³	80
Внутренняя поверхность котла	м ²	122,96319
Наружная поверхность котла	м ²	123,83027
Коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности котла цистерны (капельная конденсация пара [9])	Вт/(м ² · К)	362,3
Коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности котла цистерны (естественная конвекция воздуха [9])	Вт/(м ² · К)	17,6

тичности разъемных соединений, предохранительно-впускного клапана и сливного прибора. При эксплуатации цистерны необходимо проводить техническое освидетельствование каждого котла.

Один из способов увеличения безопасности транспортировки гептила является подбор оптимальной площади сечения впускного отверстия для предохранительного клапана ВЦ модели 15-629 (табл. 1).

При проведении технологических операций с котлом цистерны, таких как очистка или слив нефтепродукта, возможно образование вакуума в цистерне. Это связано с тем, что котел цистерны при проведении данных операций нагревают до 80 °С, а затем котел ВЦ в закрытом состоянии может попасть в условия с более низкой температурой, что может привести к деформации стенок котла. Во избежание деформаций стенок в цистернах предусмотрен впускной предохранительный клапан.

Для дальнейшего анализа проходного сечения клапана будем исходить из гипотезы, что поток теплоты, вносимый воздухом через клапан, должен компенсировать тепловой поток за счет внешней теплоотдачи котла ВЦ в окружающую среду.

Расчеты

Для расчета площади наружной и внутренней поверхности котла воспользуемся формулами:

$$S_{\text{внутр}} = S_o + 2S_d; \quad (1)$$

$$S_{\text{наружн}} = S'_o + 2S'_d; \quad (2)$$

$$S_{\text{внутр}} = 2\pi \cdot 9425 \cdot 1560 \cdot 10^{-6} + 4\pi \cdot 1560^2 \cdot 10^{-6} = 122,96319 \text{ м}^2;$$

$$S_{\text{наружн}} = 2\pi \cdot 9425 \cdot (1560 + 8) \cdot 10^{-6} + 4\pi \cdot (1560 + 10)^2 \cdot 10^{-6} = 123,83027 \text{ м}^2,$$

где S_o — площадь обечайки без учета толщины;
 S'_o — площадь обечайки с учетом толщины;
 S_d — площадь днища без учета толщины;
 S'_d — площадь днища с учетом толщины.

При расчете площади наружной и внутренней поверхности котла были приняты следующие допущения:

$$S_{\text{шар}} = 2S_d, \quad S'_{\text{шар}} = 2S'_d.$$

Запишем формулу для расчета теплового потока воздуха, вносимого в цистерну через клапан:

$$Q_B = c_{\text{PB}} G \chi (t_T - t_O), \quad (3)$$

где c_{pB} — удельная изобарная теплоемкость воздуха;

t_T — температура технологического процесса;

t_O — температура окружающей среды;

$\chi = \frac{0,1}{1}$ — коэффициент, характеризующий

степень нагрева поступающего воздуха;

G — массовый расход воздуха через впускной предохранительный клапан.

$$G = \mu S \sqrt{2\rho_B \Delta P}, \quad (4)$$

где μ — коэффициент расхода;

S — эквивалентная площадь проходного сечения впускного предохранительного клапана;

ρ_B — плотность воздуха;

ΔP — перепад давления, при котором срабатывает впускной предохранительный клапан.

Запишем формулу для вычисления теплового потока за счет внешней теплоотдачи котла цистерны в окружающую среду:

$$Q_{CP} = kF(t_T - t_O), \quad (5)$$

где k — коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{CT}}{\lambda_{CT}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{362,3} + \frac{58}{58} + \frac{1}{17,6}} = 0,943772, \quad (6)$$

где α_1 — коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности котла цистерны;

α_2 — коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности котла цистерны;

λ_{CT} , δ_{CT} — коэффициент теплопроводности материала стенки котла и коэффициент толщины стенки котла;

F — внешняя поверхность котла цистерны.

Для недопущения снижения давления в котле цистерны после открытия впускного предохранительного клапана необходимо выполнение условия.

$$Q_B = Q_{CP}. \quad (7)$$

Из уравнений (3–7) получим формулу для оценки эквивалентного диаметра D проходного сечения впускного предохранительного клапана:

$$D = \sqrt{\frac{4k \cdot F}{\pi c_{pB} \cdot \chi \cdot \mu \cdot \sqrt{2\rho_B \cdot \Delta P}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,943772 \cdot 123,83027}{\pi \cdot 1,004 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 0,7 \cdot \sqrt{2 \cdot 1,225 \cdot 0,275 \cdot 10^5}}} = 0,0903153 \text{ м}. \quad (8)$$

Результаты

Расчет произведем для цистерны модели 15-629 (табл. 2) для следующих характеристик предохранительного клапана: $\Delta P = 0,275 \cdot 10^5$ Па, $\mu = 0,7$ и температуры окружающей среды $t_O = 15^\circ \text{C}$. Для определения коэффициентов теплоотдачи воспользуемся критериальными уравнениями для естественной конвекции.

Таблица 2. Расчет диаметра проходного сечения предохранительного клапана вагона-цистерны 15-629

χ	0,1	0,5	1,0
D , м	0,0903153	0,0403902	0,0285602

Заключение

Транспортировка нефтепродуктов железнодорожным транспортом — один из самых безопасных способов транспортировки данного вида топлива с учетом размеров, а также климатических зон Российской Федерации. Исходя из увеличивающихся потребностей страны в объемах нефтепродуктов для различных отраслей промышленности вопрос транспортировки различных нефтепродуктов, особенно гептила, является особенно актуальным на

данный момент. В статье рассмотрены характеристики специализированных цистерн для транспортировки гептила, а также других нефтепродуктов. Действующие методики расчетов устойчивости котлов проводятся в соответствии с требованиями «Норм для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)». Стоит отметить, что методика утверждена заместителем министра путей сообщения РФ А. Н. Кондратенко 23 декабря 1999 г. и введена с 1 февраля 2000 г. За последние двадцать лет изменился маршрут транспортировок нефтепродуктов, а соответственно, и перепад среднесуточных давлений и температур. В статье предлагается расчет оптимальных проходных сечений предохранительного клапана одной из действующих цистерн для перевозки гептила на основе теплофизических процессов — с учетом как максимальных изменений температур внутри и снаружи котла вагона цистерны, так и минимальных. Расчет проводился в соответствии с современной географией железнодорожных путей в России [10].

Вопрос транспортировки нефтепродуктов в дальнейшем следует рассматривать и с точки зрения недопущения возникновения вакуума в котле вагона цистерны путем установки двух предохранительных клапанов, недопущения возникновения разряжения, а также избыточного давления внутри котла вагона-цистерны.

Библиографический список

1. Панин Л. Е. Медико-социальные и экологические проблемы использования ракет на жидком топливе (гептил) / Л. Е. Панин, А. Ю. Перова. // Сибирский научный медицинский журнал. — Новосибирск, 2006. — 152 с.
2. Козловский В. А. Гигиеническое нормирование некоторых продуктов химической трансформации несимметричного диметилгидразина в почве / В. А. Козловский, Г. К. Эилрбеков, А. П. Позднякова и др. // Наука о жизни и здоровье. — 2014. — 79 с.
3. Ушакова В. Г. Особенности химических превращений НДМГ и его поведение в объектах окружающей

среды / В. Г. Ушакова, О. Н. Шпигун, О. И. Старыгин // Ползуновский вестник. — 2004.

4. Ломакин А. И. Токсическое воздействие несимметричного диметилгидразина (гептила) на организм человека / А. И. Ломакин, О. П. Трикман, Л. Э. Скрипкина и др. // Вестник Клинической больницы. — 2012. — № 51. — 105 с.

5. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду / Под общ. ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова, А. В. Петрова. — М.: Анкил, 2000. — С. 640.

6. Мерков А. М. Санитарная статистика / А. М. Мерков, Л. Е. Поляков. — Л.: Медицина, 1974. — С. 384.

7. Распоряжение ОАО РЖД от 27 мая 2011 г. № 1150р «Об утверждении местных технических условий размещения и крепления специализированных контейнеров-цистерн длиной 20 футов, загруженных жидким грузом гептил, амил и порошков на платформах базой 9720 мм и 14720 мм».

8. Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов. Справочное пособие. — М.: Министерство путей сообщения РФ, 1993. — 251 с.

9. Исаченко В. П. Теплопередача / П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. — М.: Энергоиздат. 1981. — 417 с.

10. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). — М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996.

Дата поступления: 25.07.2023

Решение о публикации: 29.09.2023

Контактная информация:

ЛАПШИН Никита Дмитриевич — студент кафедры «ППХ»; nikita_lapshin2002@icloud.com
МИЛЕНЬКИХ Владислав Андреевич — студент кафедры «ППХ»; vlad1k.olad1k.qq@gmail.com
ДУЛЬНЕВА Стелла Викторовна — студент кафедры «ППХ»; stella3gek@gmail.com
АСМАНКИН Евгений Геннадьевич — ст. преподаватель кафедры «ХиИЭ»; asman08@yandex.ru
СИЛЬЯНОВА Татьяна Алексеевна — магистрант кафедры «ХиИЭ»; 1202871@edu.rut-miit.ru

To Matters of Heptyl Transportation by Rail

N. D. Lapshin, V. A. Milenkikh, S. V. Dulneva, Ye. G. Asmankin, T. A. Sil'yanova

Russian University of Transport, 9, Obraztsova, Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Lapshin N. D., Milenkikh V. A., Dulneva S. V., Asmankin Ye. G., Sil'yanova T. A. To Matters of Heptyl Transportation by Rail // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 835–842. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-835-842

Summary

Purpose: To estimate the properties of heptyl and its effect on the human body and the environment. To provide an overview of the sphere of heptyl application and the features of its transportation by rail. To consider the structural features of the model 15-629 tank car and to perform a calculation to select the optimal cross-sectional area for the inlet opening of the relief valve to enhance safety during the transportation of heptyl by the model 15-629 tank car. **Methods:** To calculate the inner and outer surface areas of the tank shell using the technical characteristics of the six-axis multi-unit tank-car of model 15-629. Next, we will calculate the mass air flow rate through the inlet relief valve and determine the heat transfer occurring due to the external heat dissipation from the tank shell into the surrounding environment. These data are necessary to estimate the equivalent diameter of the inlet relief valve orifice. **Results:** Thanks to the calculations performed, a more suitable diameter of the inlet safety valve orifice has been determined. This will ensure a safer transportation of highly toxic liquid rocket fuel components used in both Russian launch vehicles (“Kosmos”, “Cyclone”, “Proton”) and international ones (such as American “Titan” rockets, French launch vehicles of the “Ariane”, Chinese rockets of the “Long March” family, and others). **Practical significance:** Hydrazine-based propellants are more energy-efficient compared to hydrocarbon-based propellants, which has led to an increased usage of Unsymmetrical Dimethylhydrazine (UDMH) in recent years. Due to the rapid growth of space industry, the volume of heptyl transportation by railway has been increasing. In order to prevent technological disasters, calculations have been conducted to determine the diameter of the inlet relief valve to minimize depressurization of the tank car, regardless of temperature conditions.

Keywords: Transportation of heptyl, railroad transport, security valve of the tank car, calculation of the diameter of the inlet safety valve orifice, heptyl properties.

References

1. Panin L. E., Perova A. Y. Mediko-sotsial'nye i ekologicheskie problemy ispol'zovaniya raket na zhidkom toplive (geptil) [Medical, social and environmental problems of using liquid-fueled rockets (heptyl)]. *Sibirskiy nauchnyy meditsinskiy zhurnal* [Siberian Scientific Medical Journal]. Novosibirsk, 2006, 152 p. (In Russian)
2. Kozlovsky V. A., Eilrbekov G. K., Pozdnyakova A. P. et al. Gigienicheskoe normirovanie nekotorykh produktov khimicheskoy transformatsii nesimmetrichnogo dimetilgidrazina v pochve [Hygienic rationing of some products of chemical transformation of asymmetric dimethylhydrazine in soil]. *Nauka o zhizni i zdorov'e* [Life and Health Science]. 2014, 79 p. (In Russian)
3. Ushakova V. G., Shpigun O. N., Starygin O. I. Osobennosti khimicheskikh prevrashcheniy NDMG i ego povedenie v ob'ektakh okruzhayushchey sredy [Features of chemical transformations of NDMG and its behavior in environmental objects]. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovsky Bulletin]. 2004. (In Russian)
4. Lomakin A. I., Trikmán O. P., Skripkina L. E. et al. Toksicheskoe vozdeystvie nesimmetrichnogo dimetilgidrazina (geptila) na organizm cheloveka [Toxic effect of asymmetric dimethylhydrazine (heptyl) on the human body].

Vestnik Klinicheskoy bol'nitsy [Bulletin of Clinical Hospital]. 2012, Iss. 51, 105 p. (In Russian)

5. *Ekologicheskie problemy i riski vozdeystviy raketno-kosmicheskoy tekhniki na okruzhayushchuyu prirodnuyu sredy; pod obshch. red. V. V. Adushkina, S. I. Kozlova, A. V. Petrova* [Environmental problems and risks of missile impacts Space technology for the environment; general ed. V. V. Adushkina, S. I. Kozlova, A. V. Petrova]. Moscow: Ankil, 2000, p. 640. (In Russian)

6. Merkov A. M., Polyakov L. E. *Sanitarnaya statistika* [Sanitary statistics]. L.: Medicine, 1974, p. 384. (In Russian)

7. *Rasporyazhenie OAO RZhD ot 27 maya 2011 g. № 1150r "Ob utverzhdenii mestnykh tekhnicheskikh usloviy razmeshcheniya i krepleniya spetsializirovannykh konteynerov-tsistern dlinoy 20 futov, zagruzhennykh zhidkim gruzom heptil, amil i porozhnikh na platformakh bazoy 9720 mm i 14720 mm"* [Order of JSC Russian Railways dated 27.05.2011 № 1150r "On approval of local technical conditions for placement and fastening of specialized tank containers 20 feet long loaded with liquid cargo heptyl, amyl and empty on platforms with a base of 9720 mm and 14720 mm"]. (In Russian)

8. *Spetsializirovannye tsisterny dlya perevozki opasnykh gruzov. Spravochnoe posobie* [Specialized tanks for the transportation of dangerous goods. Reference manual]. Moscow: Ministry of Railways of the Russian Federation Publ., 1993, 251 p. (In Russian)

9. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energoizdat Publ., 1981, 417 p. (In Russian)

10. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Standards for the calculation and design of 1520 mm gauge railway carriages of the Ministry of Railways (non-self-propelled)]. Moscow: GosNIIV-VNIIZhT Publ., 1996. (In Russian)

Received: July 25, 2023

Accepted: September 29, 2023

Nikita D. LAPSHIN — Student, Department "Track and Railway Infrastructure Management"; nikita_lapshin2002@icloud.com

Vladislav A. MILENKH — Student, Department "Track and Railway Infrastructure Management"; vlad1k.olad1k.qq@gmail.com

Stella V. DULNEVA — Student, Department "Track and Railway Infrastructure Management"; stella3gek@gmail.com

Evgeny G. ASMANKIN — Senior Lecturer, Department "Chemical Engineering and Environmental Protection"; asman08@yandex.ru

Tatiana A. SIL'YANOVA — Master's Degree Student, Department "Chemical Engineering and Environmental Protection"; 1202871@edu.rut-miit.ru

УДК 519.876.5

Применение нейросетевых технологий на примере отечественной программной платформы *DeerTalk* в образовательном процессе ПГУПС на кафедре «Информационные и вычислительные системы»

С. Г. Ермаков, Н. А. Шедько

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

Для цитирования: Ермаков С. Г., Шедько Н. А. Применение нейросетевых технологий на примере отечественной программной платформы *DeerTalk* в образовательном процессе ПГУПС на кафедре «Информационные и вычислительные системы» // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 843–852. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-843-852

Аннотация

Цель: Разработать методику использования искусственного интеллекта для решения задачи интенсификации процесса формирования профессиональных компетенций обучающихся. Показать необходимость совершенствования технологий обучения вследствие сокращения аудиторного времени, отводимого на общеобразовательные дисциплины при реконфигурации учебных планов подготовки специалистов. Рассмотреть вопрос о переосмыслении результативности сложившейся системы дистанционного обучения (СДО) как средства рационализации образовательных процедур в связи с сохраняющимся риском усвоения студентами только минимального уровня знаний вследствие использования в СДО шаблонных электронных демонстрационных материалов. **Методы:** Для достижения сформулированных целей используются данные анализа результатов внедрения в учебный процесс кафедры ИВС продукта «Цифровой преподаватель» (ЦП), разработанного на основе отечественной платформы *DeerTalk*. Разработан алгоритм обучения нейронной сети как математического ядра ЦП. При использовании на первых этапах загрузки ЦП текстовыми и презентационными материалами реализован принцип рандомизации логически связанных запросов, ответов и замечаний преподавателей по лекциям и практическим заданиям. **Результаты:** Разработана и протестирована методика итерационной корректировки ЦП при наращивании массива ситуационных данных с последовательным устранением противоречия между требованием по репрезентативности и изначально малым объемом формируемой обучающей выборки. **Практическая значимость:** Создание разработанного нейросетевого продукта является первым шагом в развертывании системы цифровых сервисов университета, в иерархическую структуру которой по направлениям подготовки, специальностям и специализациям должны входить «Цифровой преподаватель», «Цифровой куратор абитуриента» и другие подобные продукты. Внедрение ЦП в обеспечение преподавания на старших курсах будет способствовать формированию индивидуальной образовательной траектории обучающегося и развитию его когнитивных способностей. Далее, в ходе получения дополнительного профессионального образования, применение *DeerTalk* обеспечит приобретение навыков взаимодействия с ИИ, используемого как средство поддержки принятия решений в условиях неопределенности. *DeerTalk* позволяет оценивать предрасположенность абитуриентов к основным видам профессиональной деятельности в ОАО «РЖД».

Ключевые слова: Система цифровых сервисов, генерирование образовательного контента, обучающая выборка, цифровой преподаватель, дообучение моделей, индивидуализация образования.

Введение

Планы развития отечественной транспортной системы включают различные проекты цифровизации, в том числе комплекс технологических решений искусственного интеллекта (ИИ) в соответствии с Национальной стратегией развития ИИ на период до 2030 г. Одним из перспективных направлений использования ИИ является внедрение «Цифровых кураторов» в учебный процесс образовательных организаций различного уровня [1, 2], что позволяет реализовать и развивать принцип образования: «Учить не всех, а каждого».

1. Необходимость совершенствования интенсивных технологий обучения

Следствием комплексной интеллектуализации производственных и транспортных процессов, активно внедряемых в настоящее время, является необходимость совершенствования технологий обучения.

Соответствующий рост объема данных, используемых как на стадиях разработки, так и на стадиях реализации инновационных проектов в различных сферах экономики, предопределили реконфигурацию учебных планов подготовки специалистов за счет минимизации аудиторного времени для общеобразовательных дисциплин. Таким образом, имеет место увеличение индивидуальной нагрузки на обучающихся, и могут возникнуть определенные психологические барьеры при усвоении «сокращенного» теоретического материала и выработке практических навыков.

На кафедре «Информационные и вычислительные системы» для обеспечения высокого качества обучения на первых этапах работы по новым программам осуществлялось непрерывное отслеживание новых алгоритмов компьютерной графики, были разработаны мультимедийные технологии преподавания и организовано электронное тестирование. Однако анализ

информации, обобщающей оценки достигаемого уровня обученности, показал, что слайдовая поддержка текста лекций может неоднозначно влиять на познавательный процесс, хотя и обеспечивает соответствующую наглядность по отдельным темам.

В связи с этим на кафедре, по мере накопления коллективного педагогического опыта, был переосмыслен подход к интенсификации преподавания и началось внедрение системы дистанционного обучения (СДО). Эффект применения СДО (особенно для обучающихся по заочной форме) базируется на включении в программное обеспечение интерактивных технических средств дополнительных стимулов для усиления мыслительной деятельности (логика проведения расчетов и построения схем, задания разной сложности на самостоятельную работу студентов и индивидуальные тесты для самоконтроля). В слайдовую базу начали вводиться элементы анимации, при этом четко выдерживались рациональность в объеме и темпе демонстрации материала и строго учитывались последовательность введения и взаимосвязь узловых понятий. В итоге, как показывали результаты текущих, промежуточных и рубежных аттестаций, степень использования резервных возможностей студентов существенно повысилась.

Но дальнейшая активизация познавательной деятельности обучающихся (на дистанционных занятиях, в часы самостоятельной работы и на дополнительных аудиторных занятиях) была затруднена.

Основными причинами являются:

- ограниченная степень интерактивности взаимодействия;
- «привязка» преподавателей и студентов к расписанию системы дистанционного обучения университета;
- сложности налаживания систематической обратной связи со стороны преподавателя;

– сложности с оперативным обнаружением «стоцентных» заимствований в отчетных материалах студентов [3].

Компенсировать эти недостатки и обеспечить достижение требуемых результатов обучения в соответствии с требованиями ФГОС ВО позволяет внедрение искусственного интеллекта (ИИ) в технологии обучения. На кафедре «Информационные и вычислительные системы» с 2022 г. проводилось тестирование всех известных платформ ИИ с учетом парадигмы технологического суверенитета. С 2023 г. в тестовом режиме впервые среди вузов осуществляется применение цифрового продукта DeepTalk, на основе которого в дальнейшем будет создаваться система цифровых сервисов (СЦС) университета, базирующихся на ИИ. Представляется, что в иерархическую структуру СЦС (по направлениям подготовки, специальностям и специализациям) должны входить «Цифровой преподаватель», «Цифровой куратор абитуриента» и другие подобные продукты. Цифровой продукт DeepTalk — это самообучающаяся, самосовершенствующаяся нейросистема, которая имеет микросервисную архитектуру с разделением на сервисы по зонам ответственности. Он разработан на базе технологий AI и ML. В составе продукта поставляются плагины, обеспечивающие взаимодействие функций продукта DeepTalk с LMS-системой Moodle, CDO.LMS.

Анализ предметной области показал, что DeepTalk может быть оценен как наиболее подходящий для первичного внедрения ИИ в учебный процесс на младших курсах. Первое применение DeepTalk в ПГУПС охватывает дисциплины «Информатика» и «Информационные технологии», так как эти дисциплины преподаются на первом курсе на всех специальностях специалитета и направлениях бакалавриата для очного и заочного обучения, т. е. охватывают всех студентов университета. Они являются базовыми и формируют цифровые компетенции,

предусмотренные учебными программами профильных кафедр.

2. Функциональное описание продукта DeepTalk

2.1. Общая характеристика

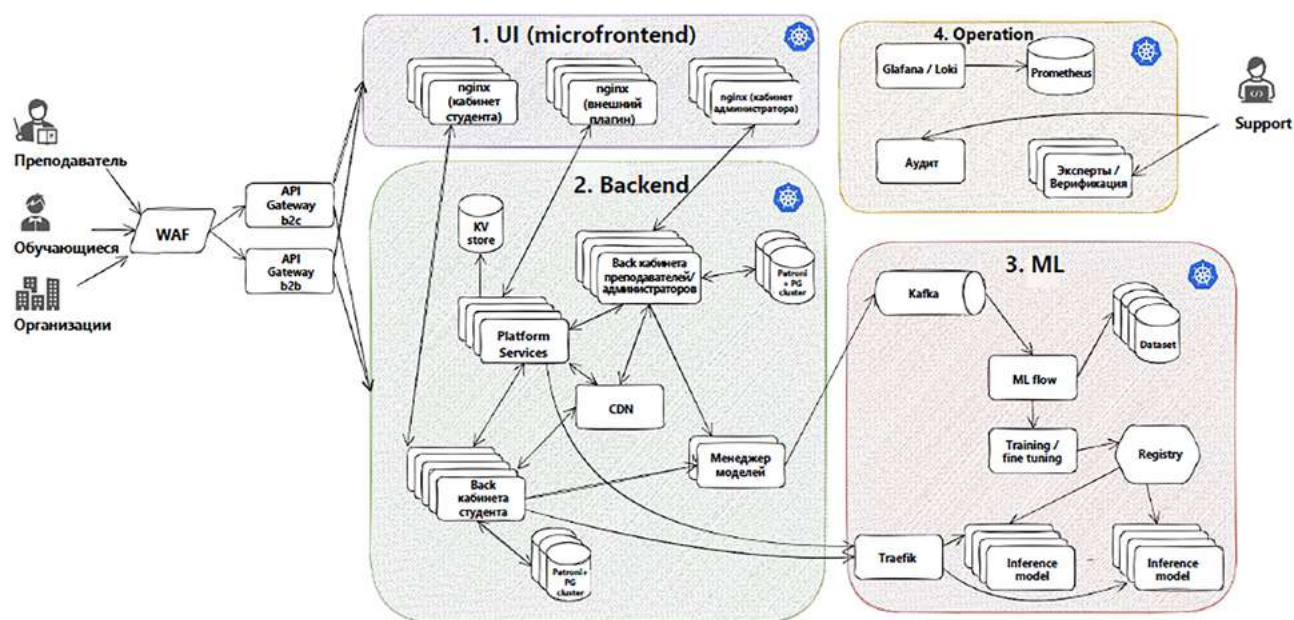
Продукт DeepTalk предназначен для повышения эффективности образовательного процесса, индивидуализации образования и внедрения технологий адаптивного обучения, построения индивидуальных образовательных траекторий на основе текущего уровня компетенций обучающегося за счет внедрения цифровых наставников обучающегося, обеспечивающих построение образовательного процесса с эффектом присутствия преподавателя, использующего инструменты ассесмент-центра для проверки уровня знаний, навыков и компетенций обучающегося и предоставляющих гибкие инструменты мониторинга образовательного процесса и повышения уровня вовлеченности обучающихся.

Продукт DeepTalk позволяет создать цифрового «наставника» обучающегося, способного взаимодействовать с обучающимся в любое время суток посредством голоса или текста, способного генерировать вопросы, давать ответы, анализировать ответы обучающегося, принимать решения на основании полученных ответов и адаптировать контент образовательной программы с учетом уровня знаний обучающегося и необходимости восполнения пробелов в сформированных ранее знаниях, навыках.

Алгоритм работы преподавателя с DeepTalk заключается в следующем:

1. Выбор. Преподаватель выбирает наиболее подходящего цифрового двойника по своей дисциплине.

2. Настройка. Преподаватель загружает свои материалы и выполняет валидацию сгенерированного контента.



Архитектура DeepTalk

3. Экспертиза/Дообучение. По мере использования преподаватель корректирует ответы и выполняет оценку ответов цифрового наставника, производя дообучение моделей.

4. Совершенствование. Прогрессивное совершенствование наставника и минимизация участия человека.

2.2. Архитектура DeepTalk

Архитектура DeepTalk представлена на рисунке и включает следующие блоки:

1. Front-end DeepTalk — визуальная часть проекта.

2. Back-end DeepTalk — серверная часть проекта.

3. ML часть DeepTalk — ML — алгоритмы, работающие по принципу обучающейся математической модели, которая производит анализ на основе большого объема данных.

4. Operation часть DeepTalk.

2.3. Возможности платформы

Цифровой наставник обучающегося DeepTalk способен:

– индивидуализировать обучение на основе текущего уровня компетенций обучающегося;

– генерировать образовательный контент на основе предоставленных (загруженных) видео, аудио, презентационных и текстовых материалов;

– генерировать и задавать вопросы обучающемуся;

– распознавать речь, рукописный текст, а также синтезировать речь для взаимодействия с обучающимся, задавать вопросы и отвечать на вопросы;

– самостоятельно генерировать задания ассесмент-центра: тесты, уравнения, опросы, экзаменационные вопросы;

– анализировать ответы обучающегося, выполнять проверку заданий ассесмент-центра без участия преподавателя;

– адаптировать контент с учетом опыта взаимодействия обучающегося с образовательным контентом или изучаемой темой на основании полученных результатов оценки уровня знаний и (или) давать рекомендации для последующего развития;

– предоставлять преподавателю рекомендации по итоговой оценке обучающегося по результатам завершения образовательной программы.

2.4. Модуль «Личный кабинет преподавателя»

Модуль обеспечивает:

- загрузку материалов в формате текста (включая pdf), аудио, видео, презентационных материалов; загрузка выполняется администратором системы в банк контента для обучения моделей нейросети, взаимодействуя с сервисом распознавания для разбора контента и преобразования в текстовый формат;
- генерацию учебного плана (в том числе на основании загруженного контента);
- генерацию контента образовательной программы (в формате текста) на основании учебного плана и загруженных материалов;
- формирование электронного курса (взаимодействие с сервисами синтеза голоса и сервисом видеоконтента). В составе сформированного электронного курса сервис может использовать исходные видео и презентационные материалы;
- формирование электронного курса с автоматическим подбором иллюстраций, соответствующих по сути сгенерированному контенту;
- генерацию вопросов на основании сгенерированного контента образовательной программы для проверки уровня знаний в ходе изучения курса (взаимодействие с сервисом ассесмент-центра и сервисом видеоконтента), выполняя разметку сформированного электронного курса для включения вопросов, сгенерированных продуктом;
- генерацию условий заданий вводного и итогового тестирования в составе сервиса ассесмент-центра в формате вопрос-ответ, содержащем открытые вопросы;
- адаптацию вопросов вводного тестирования цифровым наставником, изменяя уровень сложности в зависимости от получаемых ответов;
- генерацию условий заданий вводного и итогового тестирования в составе сервиса ассесмент-центра, используя следующие типы заданий:

тесты по программированию, эссе, уравнения, опросы, симуляторы;

- настройки параметров проверки заданий администратором системы и рекомендации оценки уровня знаний;

- проверку ответов на вопросы, заданные цифровым наставником в ходе изучения материала, с учетом контекста;

- проверку выполненных заданий вводного и итогового тестирования без участия автора в соответствии с критериями, установленными администратором системы (сложность, полнота, соответствие);

- проверку выполненных заданий вводного и итогового тестирования, содержащих следующие типы заданий: тесты по программированию, эссе, уравнения, опросы симуляторы и диалоговые симуляторы. При проверке типов заданий «тесты по программированию» выполняется подключение сред программирования и осуществляется проверка не только результатов решения, но и хода решения задания. При проверке эссе в том числе проверяются задания, содержащие рукописный текст (загруженные изображения рукописного текста обучающимся предварительно разбираются сервисом распознавания рукописного текста и преобразуются в электронный текст), выполняется лингвистическая проверка, обеспечивая проверку орфографии, грамматики. При проверке уравнений помимо проверки полученного результата проверяется ход решения уравнения;

- генерацию вводной части курса в формате мотивационной беседы, направленной на повышение интереса к изучаемому предмету, которая добавляется в состав курса, если по результатам вводного тестирования диагностируется отсутствие знаний обучающегося по данному предмету;

- адаптацию образовательного контента и учебного плана на основании результатов выполненного задания вводного тестирования, полученных из ассесмент-центра и сервиса под-

держки принятия решений (с учетом зачтенных образовательных единиц);

- адаптацию контента с учетом результатов анализа ответов на вопросы, задаваемые цифровым наставником в ходе изучения курса;

- возможность эскалации на преподавателя в случае неудовлетворенности результатами оценки;

- генерацию списка рекомендованной литературы на основании загруженных материалов учебного плана и сгенерированного контента;

- разметку образовательной программы на приобретаемые в ходе изучения компетенции и их уровни, используемые впоследствии для построения индивидуальной траектории развития обучающегося;

- анализ событий взаимодействия обучающегося с цифровым наставником.

2.5. Модуль «Личный кабинет обучающегося»

Модуль обеспечивает:

- просмотр видео лекций электронного курса с возможностью запуска курса («Начать»), перехода к новой теме («Перейти к следующему разделу»), задать вопрос («Поднять руку»);

- возможность задать вопрос цифровому наставнику по теме курса и получить ответ в режиме реального времени;

- прохождение вводного и итогового тестирований, разработанных ассесмент-центром;

- просмотр оценок, полученных в результате вводного тестирования;

- просмотр оценок, полученных в результате итогового тестирования с обеспечением возможности оспаривания результатов;

- прохождение экзаменационного собеседования;

- проверку уровня знаний обучающихся в ходе изучения курса за счет ответов на вопросы, задаваемые цифровым наставником;

- построение индивидуальной траектории развития с учетом ранее сформированных компетенций;

- адаптацию контента с учетом результатов анализа ответов на вопросы, задаваемые цифровым наставником в ходе изучения курса;

- ознакомление с рекомендациями цифрового наставника по темам курса в составе отдельного блока образовательной программы.

2.6. Служебные модули

Служебные модули обеспечивают:

- сервис распознавания — преобразование голоса (аудиоряд в формате mp3) в текстовый формат. Подключение сервиса распознавания голоса производится в любой момент при взаимодействии с обучающимся (когда нейросеть задала вопрос и передала слово обучающемуся, при нажатии на кнопку «Поднять руку» личного кабинета обучающегося). Обеспечивает преобразование голоса моделью STT (Speech to text) в текстовый формат. Обеспечивает передачу видео лекции и остальных загруженных материалов в единый текстовый формат (модель STT);

- сервис синтеза речи — воспроизведение голоса — преобразование текста, сгенерированного моделью нейросети в качестве вопроса/ответа/контента, в формат голоса — аудиосообщения. Обеспечивает преобразование текстовых сообщений в голосовые с использованием модели TTS;

- сервис видеоконтента — обработку загруженных материалов в формате видео — электронный курс в формате видео лекций, сформированный на основании исходных материалов, загруженных преподавателем и сгенерированных моделью нейросети. Обеспечивает подготовку видео лекции образовательной программы в соответствии со сгенерированной моделью контентом и выполняемым преобразованием исходных материалов, переданных на загрузку. Обеспечи-

вает разметку видеоролика для воспроизведения вопросов проверки знаний;

- сервис распознавания естественного языка — поиск среди преобразованных в текст материалов семантических сущностей, распознавание контекста. Анализирует ответы обучающегося с учетом контекста;

- сервис распознавания рукописного текста — распознавание изображения, содержащего рукописный текст, и его преобразование в формат текстового сообщения;

- сервис оркестрации — построение графа знаний контента по сформированному направлению подготовки. Все загружаемые материалы наполняют массив данных банка контента в формате текста, на основании полученного массива сервис анализирует данные, содержащиеся в массиве, и генерирует свой контент, при этом выполняя построение графа знаний, который обеспечивает более быстрый и структурированный поиск необходимой информации (например, при ответах на вопросы). Сервис обеспечивает формирование распределенного реестра банка контента для управления данными и повышение уровня их доступности в режиме реального времени. Разделение контента банка на быструю базу, в которой представлена информация по наиболее часто задаваемым вопросам.

3. Анализ предварительных результатов внедрения цифрового продукта *DeepTalk* в учебный процесс

Проведение всех видов занятий показало, что *Deep Talk*, сохранив все достоинства ставших общепризнанными приемов «классического» дистанционного обучения, усиливает результативность получения знаний, формирования умений и выработки навыков.

После объяснения преподавателем на установочном занятии методики работы с «Цифровым преподавателем» обучающиеся быстрее

осваивают теоретический материал и увереннее выполняют задания лабораторных работ (ЛР) и практических занятий (ПЗ). Студенты имеют возможность сократить количество ошибок из-за неточного понимания отдельных аспектов темы, вернуться к любому моменту лекции и к любому пункту задания на ПЗ (ЛР). Достоинствами *DeepTalk* являются доступность всех электронных ресурсов в любое внеаудиторное время и возможность работы параллельно с несколькими источниками. Важнейшее достоинство «Цифрового преподавателя» — нейросетевая способность к самообучению, благодаря которой исключается риск применения набора шаблонных электронных демонстрационных материалов, не изменяемых от занятия к занятию.

Методика итерационной корректировки ЦП заключается в следующем.

На первом этапе внедрения *DeepTalk* обучение нейронной сети проводится по текстовым и презентационным материалам, разработанным преподавателями кафедры ИВС в соответствии с рабочими программами дисциплин «Информатика» и «Информационные технологии». На основании этого материала генерируется первая версия «Цифрового преподавателя».

На втором этапе сгенерированный материал проверяется преподавателями кафедры на наличие ошибок и неточностей. Формулируются требования для более четкой подачи изучаемого материала. Все замечания фиксируются и отправляются разработчику.

На третьем этапе разработчик исправляет ошибки, генерируется новая версия, которая отправляется на проверку преподавателям.

Процесс проходит несколько итераций.

При этом за счет наращивания массива ситуационных данных последовательно устраняется неизбежно возникающее противоречие между требованием по репрезентативности и изначально малым объемом формируемой обучаю-

щей выборки, т. е. реализуется принцип рандомизации логически связанных запросов, ответов и замечаний преподавателей по лекционным вопросам и задачам практических занятий.

В итоге система настраивается на конкретного студента и начинает работать принцип «учить не всех, а каждого». Первая апробация имеющейся версии «Цифрового преподавателя» показала, что в рамках последовательной корректировки *DeepTalk* должно быть проведено не менее 5 итераций.

Первым шагом в «Дорожной карте» создания системы цифровых сервисов университета является внедрение *DeepTalk* в процесс преподавания на первом курсе дисциплин «Информатика» и «Информационные технологии», так как они закладывают основы общей цифровой культуры и основы освоения компетенций, необходимых для выполнения плана цифровизации транспортной отрасли [4, 5].

Кроме того, следует отметить, что значимость ускоренного внедрения *DeepTalk* обусловлена расширенным набором на заочное обучение студентов-целевиков ОАО «РЖД». Представляется целесообразным проведение педагогического эксперимента по оцениванию эффективности использования *DeepTalk* в процессе изучения различных сложных технических дисциплин на выпускающих кафедрах. Следует отметить также, что внедрение «Цифрового преподавателя» в обеспечение преподавания на старших курсах будет способствовать формированию индивидуальной образовательной траектории (ИОТ) обучающегося и развитию его когнитивных способностей [6].

В дальнейшем, в ходе получения дополнительного профессионального образования (EdTech), применение *DeepTalk* обеспечит приобретение выпускником навыков взаимодействия с ИИ, используемого как средство поддержки принятия решений в условиях неопределенности [7, 8].

Заключение

Технологии ИИ являются одним из самых быстроразвивающихся направлений в науке и технике. На первых этапах цифровизации экономики лидерами по использованию ИИ были финансовые организации, транспортные компании, предприятия топливно-энергетического комплекса и малые IT-компании. По данным Национального центра развития искусственного интеллекта, применение ИИ в различных отраслях уже в 2025 году может дать дополнительный прирост ВВП страны на 1 %. В настоящее время приоритетной государственной задачей стало внедрение технологий ИИ в сферу образования. На кафедре «Информационные и вычислительные системы» ПГУПС, впервые среди кафедр вузов, приступивших к цифровой трансформации образовательной деятельности, осуществляется применение в учебном процессе системы цифровых сервисов, что соответствует стратегии увязки образования, инноваций и науки. Разработанный «Цифровой преподаватель» позволяет «учить не всех, а каждого», что в дальнейшем обеспечит расширение комплекса компетенций выпускника и максимальную реализацию его потенциала.

Преподавание «Информатики» и «Информационных технологий» с использованием *DeepTalk* обеспечит цифровизацию изучения других дисциплин, направленных на формирование облика современного инженера, компетентного в области практического использования ИИ.

Библиографический список

1. Бураков М. В. Системы искусственного интеллекта: учебное пособие / М. В. Бураков. — М.: Проспект, 2017. — 440 с.
2. Николенко С. Глубокое обучение и погружение в мир нейронных сетей / С. Николенко, А. Кадури, Е. Архангельская. — СПб.: Питер, 2018. — 480 с.
3. Сиренко С. Н. Применение информационных технологий как средства интенсификации процесса обуче-

ния в вузе / С. Н. Сиренко // Открытое образование. — 2009. — № 3. — С. 20–29.

4. Рабочая программа учебной дисциплины «Информатика» / Сост. Н. А. Шедько. — СПб.: ПГУПС, 2023. — 27 с.

5. Ендовицкий Д. А. Университетская наука и образование в контексте искусственного интеллекта / Д. А. Ендовицкий, К. М. Гайдар // Высшее образование в России. — 2021. — Т. 30. — № 6. — С. 121–131.

6. Фурс С. П. Искусственный интеллект в сфере образования — помощник педагога или «подрывная» технология? / С. П. Фурс // Преподаватель XXI век. — 2023. — № 1. — Часть 1. — С. 40–49.

7. Мартышенко Н. С. Исследование процессов, влияющих на удовлетворенность студентов выбором специ-

альности / Н. С. Мартышенко // Современное образование. — 2017. — № 4. — С. 131.

8. Васильева Е. В. Оценка экономической эффективности конкурирующих ИТ-проектов: подходы и математический инструментарий / Е. В. Васильева, Е. А. Деева // Управление. Вызовы и угрозы. — 2017. — № 4(18). — С. 40–46.

Дата поступления: 15.10.2023

Решение о публикации: 10.11.2023

Контактная информация:

ЕРМАКОВ Сергей Геннадьевич — д-р техн. наук, проф.; ermakov@pgups.ru

ШЕДЬКО Наталья Адамовна — ст. преподаватель; shedkonatalia@yandex.ru

The Use of Neural Network Technologies Using the Example of the Domestic Software Platform DeepTalk in the Educational Process of PGUPS at the Department "Information and Computing Systems"

S. G. Ermakov, N. A. Shedko

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

For citation: Ermakov S. G., Shedko N. A. The Use of Neural Network Technologies Using the Example of the Domestic Software Platform DeepTalk in the Educational Process of PGUPS at the Department "Information and Computing Systems" // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 843–852. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-843-852

Summary

Purpose: To develop a methodology for using artificial intelligence to solve the problem of intensifying the process of developing students' professional competencies. To show the need to improve teaching technologies due to a reduction in classroom time allocated to general education disciplines when reconfiguring the curricula for training specialists. To consider the issue of rethinking the effectiveness of the existing distance learning system (DLS) as a means of rationalizing educational procedures in connection with the continuing risk of students acquiring only a minimum level of knowledge due to the use of template electronic demonstration materials in the DLS. **Methods:** To achieve the stated goals, data from the analysis of the results of the implementation of the "Digital Teacher" (DT) product, developed on the basis of the domestic DeepTalk platform, into the educational process of the ICS Department are used. An algorithm for training a neural network as a mathematical core of the DT has been developed. When used at the first stages of loading the DT with text and presentation materials, the principle of randomization of logically related queries, answers and comments from teachers on lectures and practical assignments is implemented. **Results:** A technique for iterative adjustment of the DT has been developed and tested when increasing the array of situational data with

the following elimination of the contradiction between the requirement for representativeness and the initially small volume of the generated training sample. **Practical significance:** The creation of a developed neural network product is the first step in the deployment of the University's digital services system, the hierarchical structure of which according to areas of training, qualifications and specializations should include "Digital Teacher", "Digital Applicant Curator" and other similar products. The introduction of DT into providing teaching in senior years will contribute to the formation of the student's individual educational trajectory and the development of his cognitive abilities. Further, in the course of obtaining additional professional education, the use of *DeepTalk* will ensure the acquisition of skills in interacting with AI, used as a means of supporting decision-making under conditions of uncertainty. *DeepTalk* allows you to assess the predisposition of applicants to the main types of professional activities at JSCo "Russian Railways".

Keywords: System of digital services, generation of educational content, training sample, digital teacher, additional training of models, individualization of education.

References

1. Burakov M. V. *Sistemy iskusstvennogo intellekta: uchebnoe posobie* [Systems of artificial intelligence: a textbook]. Moscow: Prospekt Publ., 2017, 440 p. (In Russian)
2. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. *Glubokoe obuchenie i pogruzhenie v mir neyronnykh setey* [Deep learning and immersion in the world of neural networks]. St. Petersburg: Piter Publ., 2018, 480 p. (In Russian)
3. Sirenko S. N. *Primenenie informatsionnykh tekhnologiy kak sredstva intensivatsii protsessu obucheniya v vuze* [Application of information technologies as a means of intensifying the learning process at the university]. *Otkrytoe obrazovanie* [Open Education]. 2009, Iss. 3, pp. 20–29. (In Russian)
4. *Rabochaya programma uchebnoy distsipliny "Informatika"* [Work program of the academic discipline "Informatics"]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2023, 27 p. (In Russian)
5. Endovitsky D. A., Gaidar K. M. *Universitetskaya nauka i obrazovanie v kontekste iskusstvennogo intellekta* [University science and education in the context of artificial intelligence]. *Vysshee obrazovanie v Rossii* [Higher Education in Russia]. 2021, vol. 30, Iss. 6, pp. 121–131. (In Russian)
6. Furs S. P. *Iskusstvennyy intellekt v sfere obrazovaniya — pomoshchnik pedagoga ili "podryvnaya" tekhnologiya?* [Artificial intelligence in the field of education — a teacher's assistant or a "subversive" technology?]. *Prepodavatel' XXI vek* [Teacher of the XXI century]. 2023, Iss. 1, Part 1, pp. 40–49. (In Russian)
7. Martishenko N. S. *Issledovanie protsessov, vliyayushchikh na udovletvorennost' studentov vyborom spetsial'nosti* [Study of processes affecting students' satisfaction with the choice of specialty]. *Sovremennoe obrazovanie* [Modern Education]. 2017, Iss. 4, p. 131. (In Russian)
8. Vasilieva E. V., Deeva E. A. *Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti konkuriruyushchikh IT-proektov: podkhody i matematicheskiy instrumentariy* [Evaluation of the economic efficiency of competing IT projects: approaches and mathematical tools]. *Upravlenie. Vyzovy i ugrozy* [Management. Challenges and Threats]. 2017, Iss. 4(18), pp. 40–46. (In Russian)

Received: October 15, 2023

Accepted: November 10, 2023

Author's information:

Sergey G. ERMAKOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; ermakov@pgups.ru

Natalia A. SHEDKO — Senior Lecturer; shedkonatalia@yandex.ru

УДК 691.5

Механические характеристики реставрационных растворов при использовании в их составах метакеолинов

Л. Ф. Казанская, А. А. Сметанин

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

Для цитирования: Казанская Л. Ф., Сметанин А. А. Механические характеристики реставрационных растворов при использовании в их составах метакеолинов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 853–859. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-853-859

Аннотация

Цель: Проанализировать возможность использования высокоактивных метакеолинов в составах гипсоизвестковых вяжущих для реставрационных работ. Рассмотреть совместимость компонентов реставрационных растворов на основе воспроизводимости их основных характеристик, таких как минералогический и химический состав, физико-механические свойства и долговечность. **Методы:** В работе использованы физико-химические методы исследования, а также методы сравнительного анализа в соответствии с руководящими принципами ГОСТ 125—2018 «Вяжущие гипсовые. Технические условия». **Результаты:** Показано, что введение метакеолина в составы вяжущих обеспечивает повышение прочности камня вяжущего. Оптимальное количество метакеолина составляет 20 % в гипсоизвестковой смеси. Экспериментально установлено, что увеличение содержания Al_2O_3 в метакеолине от 39 до 44 % ведет к возрастанию ранней прочности при сжатии камня из модифицированного гипсоизвесткового вяжущего. Повышение содержания Al_2O_3 приводит к возрастанию прочностных характеристик. **Практическая значимость:** Проведенные исследования демонстрируют, что такие показатели, как средний размер частиц, удельная поверхность, оказывают влияние на гидравлическую активность пуццолановой добавки. Качество высокоактивных метакеолинов находится в прямой зависимости от степени чистоты каолина. Однако добавки могут различаться массовым содержанием оксидов, в частности содержанием основных оксидов SiO_2 и Al_2O_3 . Использование высокоактивных метакеолинов в составах гипсоизвестковых вяжущих позволяет реставрировать памятники архитектуры.

Ключевые слова: Гипс, известь, метакеолин, пуццолановая активность, модифицированное вяжущее.

Введение

Растворы на основе гипса использовались в казенном и дворцовом строительстве в Санкт-Петербурге в XVIII–XIX вв. Смеси на основе извести и гипса широко использовались не только для швов наружных стен, но и оштукатуривания исторических зданий [1, 2].

Данные строительные материалы постоянно подвергаются износу по различным причинам, что требует разработки программы

восстановления. В течение прошлого века растворы на гипсовой основе из древних кладок были заменены портландцементными, что нанесло еще больший ущерб этим каменным конструкциям [3, 4].

Известно, что как старые, так и новые (реставрационные) материалы должны иметь одинаковые характеристики. Совместимость компонентов нового ремонтного раствора для реставрационных работ и оригинального должна основываться

на воспроизводимости его основных характеристик, таких как минералогический и химический состав, физико-механические свойства и долговечность [5–7].

Преимуществами гипсоизвестковых строительных растворов по сравнению с гипсовыми растворами являются благоприятное схватывание, улучшение обрабатываемости, большая адгезия, более высокая начальная и конечная прочность на сжатие, возрастание долговечности с течением времени [8–10].

Активные минеральные добавки в реставрационных растворах применяют как средство повышения стабильности структуры искусственного камня на основе воздушного вяжущего. В качестве активных минеральных добавок для реставрационных растворов используют традиционные пуццоланы, такие как зола-унос, микрокремнезем, доменные гранулированные шлаки и натуральные пуццоланы (высокоактивный метакеолин (ВМК), пемза, перлит, опока) вместе с новыми пуццоланами, включая молотое стекло (высокощелочное и низкощелочное) и измельченную золу [11, 12].

Самое раннее сообщение об экспериментах с ВМК в консервации относится к 1990-м годам, когда на Международном конгрессе RILEM/UNESCO в 1993 г. был заслушан доклад «Интерес к искусству метакеолина, к сохранению камня и других материалов». ВМК, являясь прокаленной при высоких температурах глиной, представляет собой *обновленную версию* древнего строительного материала.

Присутствие ВМК в известковой смеси приводит к образованию гидратированных фаз, таких как CSH, CASH и CASH. ВМК является компонентом, который приводит к образованию пор с радиусом от 0,01 до 0,1 мкм [13, 14]. Это семейство пор присутствует только в растворах, приготовленных с содержанием ВМК 20 % от общего количества вяжущего, в то время как система

пор в растворах с содержанием ВМК 10 % ближе к системе воздушных известковых растворов без добавок. Добавление 20 % ВМК также приводит к большему повышению прочности.

Проведенные авторами исследования демонстрируют, что такие показатели, как средний размер частиц, удельная поверхность, оказывают влияние на гидравлическую активность пуццолановой добавки. Качество ВМК находится в прямой зависимости от степени чистоты каолина. Однако добавки могут различаться массовым содержанием оксидов, в частности содержанием основных оксидов SiO_2 и Al_2O_3 .

Анализу влияния химического состава ВМК на физико-механические свойства камня из модифицированного гипсоизвесткового вяжущего посвящено данное научно-экспериментальное исследование.

Материалы, методы и принципы исследования

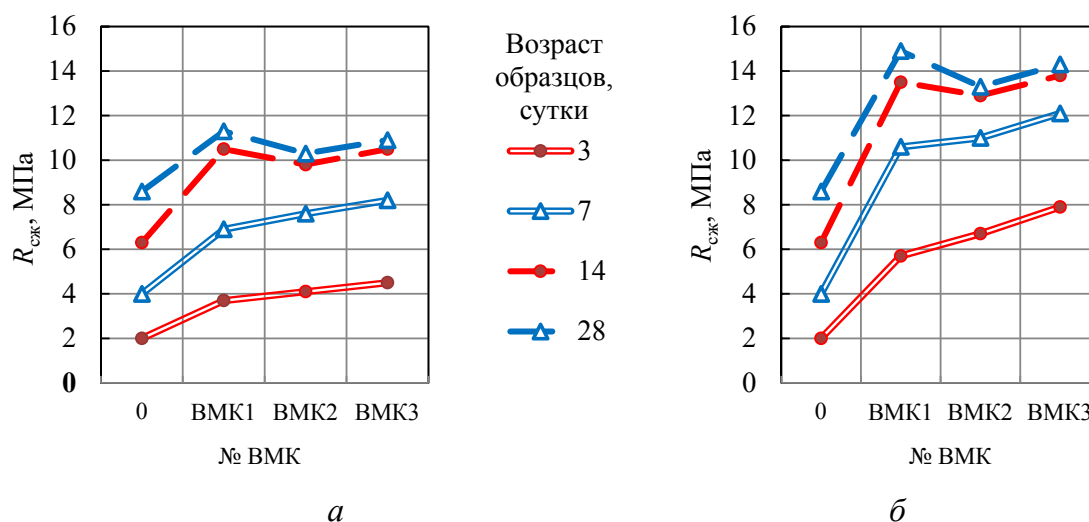
1. Смешанное вяжущее приготовлено с использованием гипса марки Г-6Б ООО «Майкопгипсстрой», извести строительной гидратной ГОСТ 9179—77 (Угловский известковый комбинат). Одинаковое водотвердое отношение вяжущего урегулировано введением суперпластификатора С-3 ООО «Суперпласт» по ТУ 5745-004-43184789-05.

2. Для оценки эффективности метакеолинов, присутствующих на отечественном рынке, сравнивали метакеолины разных производителей:

- Metacem-85 (Индия) — ВМК-1;
- ЗАО «Пласт-Рифей» (Россия) — ВМК-2;
- ООО «Мета-Д» (Украина) — ВМК-3.

3. В работе использованы физико-химические методы исследования, а также методы сравнительного анализа.

4. Исследование соответствует руководящим принципам ГОСТ 125—2018 «Вяжущие гипсовые. Технические условия».



Кинетика изменения прочности на сжатие камня из гипсоизвесткового вяжущего, модифицированного ВМК разного химического состава: при количестве ВМК в смеси вяжущего: а — 10 мас.%; б — 20 мас.%

Таблица 1. Основные характеристики тонкодисперсных активных добавок

ВМК	Средний размер частиц, мкм	Удельная поверхность, см ² /г	Пуццолановая активность (мг Ca(OH) ₂ /г)	Содержание оксидов, мас.%								
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂
ВМК-1	1,5	12000	~	56,8	38,4	1,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0
ВМК-2	1	10000	~	50,7	41,8	0,6	0,4	след	0,1	0,8	0	0,5
ВМК-3	1	10000	~	53,4	43,8	0,75	0	0,45	0	0	0	0

Обсуждение

Основные характеристики использованных метакеолинов представлены в табл. 1.

Для установления вероятности повышения (понижения) скорости набора прочности камня в настоящей работе были исследованы смеси из гипсоизвесткового вяжущего, модифицированного метакеолинами разного химического состава при водотвердом отношении, равном 0,56. Содержание компонентов гипс — известь — ВМК составляло 78 — 12 — 10 мас.% и 68 — 12 — 20 мас.% соответственно. Опробованы ВМК, содержание в которых Al₂O₃ составляло: 38,4; 41,8 и 43,8 %. Произведены испытания на прочность на образцах-балочках размером 40 × 40 × 160 мм. С-3 вводили в смесь в процессе предваритель-

ной подготовки вяжущего. Образцы тестировали в возрасте 3, 7, 14 и 28 суток.

Кинетика изменения прочности на сжатие камня из гипсоизвесткового вяжущего, модифицированного ВМК разного химического состава, представлена на рисунке.

Основные результаты

На основании экспериментальных данных установлено, что:

1. С увеличением количества всех трех ВМК, опробованных в смесях модифицированного гипсоизвесткового вяжущего, скорость набора ранней прочности камня возрастает (табл. 2).
2. Для образцов возраста 3 и 7 суток самые низкие показатели прочности камня на сжатие из

Таблица 2. Скорость набора прочности (МПа/сут) камня из гипсоизвесткового вяжущего, модифицированного ВМК разного химического состава

№ ВМК	Период (сутки)			
	0–3	3–7	7–14	14–28
без ВМК	0,67	0,5	0,33	0,16
Количество ВМК в смеси вяжущего 10 мас. %				
ВМК-1	1,23	0,8	0,51	0,06
ВМК-2	1,37	0,88	0,31	0,04
ВМК-3	1,5	0,93	0,33	0,03
Количество ВМК в смеси вяжущего 20 мас. %				
ВМК-1	1,9	1,22	0,41	0,1
ВМК-2	2,23	1,08	0,27	0,03
ВМК-3	2,63	1,05	0,24	0,04

вяжущего, модифицированного ВМК-1 с содержанием Al_2O_3 , равным 38,4 %, самые высокие — из вяжущего, модифицированного ВМК-3 с содержанием Al_2O_3 , равным 43,8 %.

3. Для образцов возраста 28 суток самый высокий показатель прочности камня на сжатие из вяжущего, модифицированного ВМК-1 с содержанием Al_2O_3 , равным 38,4 %, что, вероятно, свидетельствует о более высоком качестве этого ВМК, а также низком процентном содержании в нем примесей, самый низкий — из вяжущего, модифицированного ВМК-2.

4. Оксидами, составляющими основу ВМК, являются SiO_2 и Al_2O_3 ; анализ модульных характеристик применяемых в исследовании добавок выявил, что наивысшую корреляцию с показателем ранней прочности имеет модуль активности, т. е. отношение Al_2O_3 к SiO_2 .

Минералогический состав выявляет, что ВМК-1 богаче кварцем, тогда как ВМК-2 и ВМК-3 богаче каолиновыми минералами.

С химической точки зрения содержание кремнезема высокое для всех ВМК.

ВМК-3 характеризует самое высокое содержание оксида алюминия.

Заключение

Твердение камня на основе известкового вяжущего характеризуется длительным наборо

ром прочностных характеристик. Добавка ВМК повышает механические характеристики известковых и гипсоизвестковых смесей.

Тип использованного ВМК следует принимать во внимание, поскольку он обеспечивает разные результаты прочностных характеристик камня из-за различий в производственном процессе и сырье.

Все образцы из модифицированного ВМК гипсоизвесткового вяжущего имеют меньшую прочность, чем эквивалентные образцы из модифицированного ВМК цементного вяжущего. Этот факт, связанный с совместимостью реставрационной смеси с оригинальным компонентом, делает воздушное вяжущее, модифицированное ВМК, более подходящим для использования в работах по консервации памятников архитектуры.

Библиографический список

1. Носов К. С. Строительные растворы русских крепостей XVI–XVII вв. / К. С. Носов // Российская археология. — 2009. — № 1. — С. 152–161.
2. Пухаренко Ю. В. Реставрация исторических объектов с применением современных сухих строительных смесей / Ю. В. Пухаренко, А. М. Харитонов, Н. Н. Шангина и др. // Вестник гражданских инженеров. — 2011. — № 1. — С. 98–103.
3. Рахимов Р. З. Гипс в строительстве с древних веков до современности / Р. З. Рахимов // Academia. Архитектура и строительство. — 2021. — № 4. — С. 120–124.

4. Сафонова Т. Ю. Исторический опыт и современные перспективы производства метакеолина в России и за рубежом / Т. Ю. Сафонова // ФЭН-Наука. — 2012. — № 3(6). — С. 15–16.
 5. Сафонова Т. Ю. Структурообразование и твердение композиций с добавкой метакеолина / Т. Ю. Сафонова // Сб. трудов I международной научно-практической конференции «Достижения и перспективы естественных и технических наук». — Ставрополь. — 2012. — С. 3–8.
 6. Сафонова Т. Ю. Влияние реактивного пуццолана на свойства смешанного воздушного вяжущего / Т. Ю. Сафонова // Вестник гражданских инженеров. — 2012. — № 2(31). — С. 174–179.
 7. Шангина Н. Н. Особенности производства и применения сухих строительных смесей для реставрации памятников архитектуры / Н. Н. Шангина, А. М. Харитонов // Сухие строительные смеси. — 2012. — С. 45–47.
 8. Cotrim H. Freixo palace: rehabilitation of decorative gypsum plasters / H. Cotrim, M. R. Veiga, J. Brito // Construction and Building Materials. — 2008. — Vol. 22(1). — Pp. 41–49.
 9. Gameiro A. Hydration products of lime-metakaolin pastes at ambient temperature with ageing / A. Gameiro, A. S. Silva, R. Veiga et al. // Thermochimica Acta. — 2012. — Vol. 535. — Pp. 36–41.
 10. Romera J. I. Assessment of the physico-mechanical behavior of gypsum-lime repair mortars as a function of curing time / J. I. Romera, S. Martinez-Ramirez, P. Lapuente et al. // Environmental Earth Sciences. — 2013. — Vol. 70. — P. 1605–1618.
 11. Slavid I. Development and evaluation of a lime-metakaolin grout / I. Slavid, M. L. Thomson, J. Wathne et al. // Proceedings of the 3rd Historic Mortars Conference. HMC13. — 2013. — University of the West of Scotland. Glasgow. — Pp. 1–7.
 12. Velosa A. Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortar characteristics / A. Velosa, F. Rocha, R. Veiga // Acta Geodynamica et Geomaterialia. — 2009. — Vol. 6.(153). — Pp. 121–126.
 13. Ventola L. Traditional organic additives improve lime mortars: new old materials for restoration and building natural stone fabrics / L. Ventola, M. Vendrell, P. Giraldez et al. // Construction and Building Materials. — 2011. — Vol. 25(8). — Pp. 3313–3318.
 14. Proceedings of the 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop. 22–24 September. — 2010. — Prague. Czech Republic. — Pp. 917–926.
- Дата поступления: 02.10.2023
Решение о публикации: 27.11.2023
- Контактная информация:**
КАЗАНСКАЯ Лилия Фаатовна — д-р техн. наук, проф.; yalifa@inbox.ru
СМЕТАНИН Алексей Алексеевич — аспирант кафедры «Строительные материалы и технологии»; citysell1@gmail.com

Mechanical Characteristics of Restoration Solutions When Metacaolines Are Used in Their Compositions

L. F. Kazanskaya, A. A. Smetanin

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

For citation: Kazanskaya L. F., Smetanin A. A. Mechanical Characteristics of Restoration Solutions When Metacaolines Are Used in Their Compositions // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 853–859. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-853-859

Summary

Purpose: To analyze the possibility of using highly active metacaolines in the compositions of gypsum-lime binders for restoration work. To consider the compatibility of the components of restoration solutions based on the reproducibility of their main characteristics, such as mineralogical and chemical composition, physical and mechanical properties and durability. **Methods:** The work uses physico-chemical research methods, as well as methods of comparative analysis, in accordance with the guidelines of GOST 125-2018 “Gypsum binders. Technical conditions”. **Results:** It is shown that the introduction of metacaolin into the binder compositions provides an increase in the strength of the binder stone. The optimal amount of metacaolin is 20% in a gypsum-lime mixture. It has been experimentally established that an increase in the content of Al_2O_3 in metacaolin from 39 to 44% leads to an increase in the early compressive strength of a stone made of modified gypsum-lime binder. An increase in the content of Al_2O_3 leads to an increase in strength characteristics. **Practical significance:** The conducted studies demonstrate that such indicators as the average particle size, specific surface area, have an impact on the hydraulic activity of the pozzolan additive. The quality of highly active metakaolins is directly dependent on the degree of purity of kaolin. However, additives may differ in the mass content of oxides, in particular the content of the main oxides SiO_2 and Al_2O_3 . The use of highly active metacaolines in the compositions of gypsum-lime binders makes it possible to restore architectural monuments.

Keywords: Gypsum, lime, metacaolin, pozzolan activity, modified binder.

References

1. Nosov K. S. Stroitel'nye rastvory russkih krepostej XVI–XVII vv. [Mortars of Russian fortresses of the XVI–XVII centuries]. *Rossiyskaya arheologiya* [Russian Archaeology]. 2009, Iss. 1, pp. 152–161. (In Russian)
2. Puharenko Yu. V. Restavraciya istoricheskikh ob'ektov s primeneniem sovremennyh suhikh stroitel'nyh smesej [Restoration of historical objects using modern dry building mixes]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2011, Iss. 1, pp. 98–103. (In Russian)
3. Rahimov R. Z. Gips v stroitel'stve s drevnih vekov do sovremennosti [Gypsum in construction from ancient centuries to the present]. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo* [The academy. Architecture and construction]. 2021, Iss. 4, pp. 120–124. (In Russian)
4. Safonova T. Yu. Istoricheskij opyt i sovremennye perspektivy proizvodstva metakaolina v Rossii i za rubezhom. [Historical experience and modern prospects of metacaolin production in Russia and abroad]. *FEN-Nauka* [FEN-Science]. 2012, Iss. 3(6), pp. 15–16. (In Russian)
5. Safonova T. Yu. Strukturoobrazovanie i tverdenie kompozicij s dobavkoj metakaolina. [Structure formation and hardening of compositions with the addition of metakaolin]. *Sb. trudov I mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii “Dostizheniya i perspektivy estestvennyh i tekhnicheskikh nauk”* [Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference “Achievements and prospects of natural and technical sciences”]. Stavropol', 2012, pp. 3–8. (In Russian)

6. Safonova T. Yu. Vliyaniye reaktivnogo puccolana na svoystva smeshannogo vozdukhnoy vyazhushchego [The effect of reactive pozzolan on the properties of a mixed air binder]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2012, Iss. 2(31), pp. 174–179. (In Russian)
 7. Shangina N. N. Osobennosti proizvodstva i primeniya sukhikh stroitel'nykh smesey dlya restavracii pamyatnikov arhitektury [Features of production and application of dry building mixes for restoration of architectural monuments]. *Sukhie stroitel'nye smesi* [Dry building mixes]. 2012, Iss. 3, pp. 35–38. (In Russian)
 8. Cotrim H., Veiga M. R., Brito J. Freixo palace: rehabilitation of decorative gypsum plasters. *Construction and Building Materials*, 2008, vol. 22(1), pp. 41–49.
 9. Gameiro A., Silva A. S., Veiga R. et al. Hydration products of lime-metakaolin pastes at ambient temperature with ageing. *Thermochimica Acta*, 2012, vol. 535, pp. 36–41.
 10. Romera J. I., Martinez-Ramirez S., Lapuente P. et al. Assessment of the physico-mechanical behavior of gypsum-lime repair mortars as a function of curing time. *Environmental Earth Sciences*, 2013, vol. 70, pp. 1605–1618.
 11. Slavid I., Thomson M. L., Wathne J. et al. Development and evaluation of a lime-metakaolin grout. *Proceedings of the 3rd Historic Mortars Conference. HMC13*. 2013. University of the West of Scotland. Glasgow, pp. 1–7.
 12. Velosa A., Rocha F., Veiga R. Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortar characteristics. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2009, vol. 6(153), pp. 121–126.
 13. Ventola L., Vendrell M., Giraldez P. et al. Traditional organic additives improve lime mortars: new old materials for restoration and building natural stone fabrics. *Construction and Building Materials*, 2011, vol. 25(8), pp. 3313–3318.
 14. *Proceedings of the 2nd Historic Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop*. 22–24 September, 2010, Prague, Czech Republic, pp. 917–926.
- Received: October 02, 2023
Accepted: November 27, 2023
- Author's information:**
Liliya F. KAZANSKAYA — Dr. Sci. in Engineering, Professor; yalifa@inbox.ru
Aleksey A. SMETANIN — Postgraduate Student of the Department “Building Materials and Technologies”; citysell1@gmail.com

УДК 666.9

Проектирование состава высокопрочного самоуплотняющегося бетона с использованием нейронной сети

В. А. Ходаковский, М. А. Шварц, Ф. М. Шварц

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

Для цитирования: Ходаковский В. А., Шварц М. А., Шварц Ф. М. Проектирование состава высокопрочного самоуплотняющегося бетона с использованием нейронной сети // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 860–867. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-860-867

Аннотация

Цель: Расширить возможность интерпретации результатов ограниченного числа физических экспериментов при подборе компонентов для создания бетонной смеси и бетона на ее основе с требуемыми выходными свойствами. **Методы:** С помощью нейронной сети в аналитической среде LogiPlot построена модель с шестью входными переменными, отображающими вводимые специальные добавки, и семью выходными переменными, представляющими параметры качества бетонной смеси и бетона. **Результаты:** В процессе обучения сформирована трехслойная сетевая модель, с помощью которой получены прогнозные выходные характеристики бетонной смеси и бетона. Произведено сравнение экспериментальных данных и прогноза нейронной модели для каждой выходной переменной в наглядной графической форме. **Практическая значимость:** Прогнозирование требуемых характеристик, синтезируемого материала с помощью реакции нейронной модели на различные комбинации входных данных позволяет осуществить оптимальное количество физических экспериментов. Возможно применение предложенного способа моделирования для различных многокомпонентных материалов.

Ключевые слова: Нейронная сеть, множественная регрессия, бетонная смесь, числовой эксперимент, физический эксперимент.

В настоящее время создание бетонных смесей и получение высокоэффективных бетонов с заданными свойствами на их основе требует использования значительного количества компонентов [1], взаимодействующих друг с другом. Соответствующий подбор компонентов смеси обеспечивает требуемые подвижность, текучесть, связность смеси, а также требуемую прочность, свойства долговечности, стойкость к воздействию окружающей среды и т. п.

Очевидно, что получение материала с соответствующим набором свойств связано с проведением большого количества экспериментов, изучающих влияние каждого компонента и их

взаимосвязь на конечный результат. Данный процесс требует значительного количества времени, учитывая общий экспериментальный объем и время выдерживания образцов. Построение теоретической модели процессов взаимодействия совокупности компонентов представляет собой весьма сложную задачу. Известны работы по моделированию свойств бетонных материалов различного состава [2–11], но базовой основой создания высокопрочного самоуплотняющегося бетона является экспериментальный подбор компонентов состава. Сочетая полученные экспериментальные данные и вычислительный эксперимент, возможно ускорить синтез необходимого

Таблица 1. Составы для экспериментального определения рационального соотношения компонентов и эффективности их действия

№ п/п	Расход цемента на 1 м ³ бетонной смеси, кг	Компоненты комплексной химической добавки, % от массы цемента					Водоцементное соотнош. (В/Ц)
		Водн. р-р поликарбосолим. акриловой кислоты с $\rho = 1,025 \text{ г/см}^3$ и pH = 6,0–6,5	Водн. р-р поликарб. сополим. ангидрида акриловой и малеиновой к-ты с $\rho = 1,027 \text{ г/см}^3$ и pH = 6,0–6,5	Золь кремниевой кислоты, $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, с $\rho = 1,021 \text{ г/см}^3$ и pH = 3,5–4,0	$\text{NaC}_6\text{H}_{11}\text{O}_7$	$\text{KC}_6\text{H}_{11}\text{O}_7$	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	460	контрольный состав					0,58
2	460	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47
3	460	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45
4	460	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45
5	460	0,60	0,10	0,00	0,00	0,00	0,43
6	460	0,60	0,20	0,00	0,00	0,00	0,42
7	460	0,60	0,30	0,00	0,00	0,00	0,41
8	460	0,60	0,20	0,50	0,00	0,00	0,39
9	460	0,60	0,20	0,60	0,00	0,00	0,38
10	460	0,60	0,20	0,70	0,00	0,00	0,37
11	460	0,60	0,20	0,60	0,30	0,00	0,38
12	460	0,60	0,20	0,60	0,50	0,00	0,37
13	460	0,60	0,20	0,60	0,70	0,00	0,37
14	460	0,60	0,20	0,60	0,00	0,30	0,38
15	460	0,60	0,20	0,60	0,00	0,50	0,37
16	460	0,60	0,20	0,60	0,00	0,70	0,38

Таблица 2. Результаты физико-механических показателей бетонной смеси и бетона в присутствии компонентов комплексной химической добавки

№ п/п	Расплав конуса, мм	Оценка вязкости бетонной смеси (время достиж. диам. расплава 500 мм, с)	Растворотделение, %	Водоотделение, %	Возраст, 28 суток		
					Прочность на сжатие, МПа	Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Коэффициент трещиностойкости
1	2	3	4	5	6	7	8
1	560,00	3,10	4,20	0,80	63,50	7,20	0,1134
2	560,00	3,00	4,00	0,80	64,30	7,60	0,1182
3	560,00	2,90	4,00	0,80	64,90	7,80	0,1202
4	590,00	1,90	4,00	0,80	65,80	7,80	0,1185
5	595,00	1,50	4,00	0,80	66,70	7,90	0,1184
6	600,00	1,30	4,00	0,80	68,10	8,10	0,1189
7	640,00	6,00	3,60	0,60	71,10	8,90	0,1252
8	642,00	6,00	3,60	0,60	72,00	9,00	0,1250
9	644,00	6,00	3,60	0,60	72,20	9,20	0,1274
10	630,00	6,00	3,50	0,56	72,80	9,00	0,1236
11	636,00	6,00	3,50	0,56	73,70	9,10	0,1235
12	630,00	6,00	3,50	0,56	73,80	9,10	0,1233
13	633,00	6,00	3,50	0,56	75,10	9,20	0,1225
14	638,00	6,00	3,50	0,56	76,00	9,40	0,1237
15	634,00	6,00	3,50	0,56	76,40	9,50	0,1243

материала. Ниже рассмотрен пример экспериментального подбора компонентов (табл. 1) и его результатов (табл. 2).

Подбор оптимального состава смеси был осуществлен путем последовательного добавления компонентов, показано их влияние на свойства смеси и затвердевшего бетона. Таким образом, можно говорить о наличии шести входных параметров и семи выходных.

В ходе планирования экспериментов исследовалось влияние пяти добавок при их последовательном вводе после достижения оптимального результата на предыдущем этапе. Всего в эксперименте предусмотрено пять этапов по три эксперимента в каждом. На каждом этапе анализируется влияние одной из добавок.

На первом этапе исследуется влияние сополимера акриловой кислоты, а ее процентное содержание в растворе изменяется следующим образом: 1-й эксперимент — 0,5 %, 2-й — 0,6 %, 3-й — 0,7 %. В ходе последующих этапов берутся медианные значения каждой из добавок.

Далее исследуется дополнительное влияние сополимера акриловой кислоты с добавлением малеиновой кислоты с процентным ее содержанием: 4-й эксперимент — 0,1 %, 5-й — 0,2 % и 6-й — 0,3. На третьем этапе исследуется дополнительное влияние золя кремниевой кислоты; $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, с $\rho = 1,021 \text{ г/см}^3$ и $\text{pH} = 3,5\text{--}4,0$ с ее процентным содержанием в экспериментах: 7-й — 0,5 %, 8-й — 0,6 %, 9-й — 0,7 %. В ходе четвертого этапа исследуется влияние добавки: $\text{NaC}_6\text{H}_{11}\text{O}_7$ с процентным ее содержанием в экспериментах: 10-й — 0,3 %, 11-й — 0,5 %, 12-й — 0,7 %. На заключительном пятом этапе исследуется влияние добавки: $\text{KC}_6\text{H}_{11}\text{O}_7$ с процентным ее содержанием в экспериментах: 13-й — 0,3 %, 14-й — 0,5 %, 15-й — 0,7 %.

С целью расширения интерпретации результатов влияния различных компонентов на бетонную смесь было принято решение построения

модели множественной регрессии с помощью нейросети. В данном случае входными независимыми переменными являются массовые (объемные) доли вводимых компонентов (шесть переменных), а зависимыми выходными переменными являются параметры качества бетонной смеси и бетона (семь переменных). Данная модель позволяет проводить как аппроксимацию данных, так и экстраполяцию результатов вычислительного эксперимента.

Ниже приводятся результаты обработки данных в аналитической среде «Дедуктор» (Loginom).

На рис. 1. представлено входное окно среды аналитической обработки «Дедуктор», где слева в окне изображен сценарий обработки данных, справа изображена таблица данных эксперимента, столбцы 2–7 являются входными переменными, столбцы 8–14 — выходные переменные.

Последовательно применяя режимы настройки исходных данных нейронной сети: параметры структурной сети, настройка процесса обучения, настройка параметров остановки процесса обучения, режима обучения сети, запуск процесса обучения, получаем таблицу результатов работы сетевой модели. Отметим, что максимальные достигнутые погрешности имеют порядок 10^{-2} . В тексте погрешности не приводятся.

Важно заметить, что линейная регрессия с использованием режима нейросети «что если» позволяет оценить реакцию модели на различные комбинации входных данных.

Произведено сравнение экспериментальных данных и результатов прогноза нейронной модели для каждой выходной переменной с граничной оценкой 0,015. Графики сравнения экспериментальных данных и результатов прогноза модели представлены последовательно, начиная с выходной переменной 8 (рис. 2) до переменной 14 (рис. 8).

Дедуктор Studio Academic (F:\ПГУПС\SHvarcFilipp.ded) - [Текстовый файл (F:\ПГУПС\Data.csv)]

Сценарии: 1/15

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0,5	0	0	0	0	0,47	560	3,1	4,2	0,8	63,5	7,2	0,113	
2	0,6	0	0	0	0	0,45	560	3	4	0,8	64,3	7,6	0,118	
3	0,7	0	0	0	0	0,45	560	2,9	4	0,8	64,9	7,9	0,12	
4	0,6	0,1	0	0	0	0,43	590	1,9	4	0,8	65,8	7,9	0,119	
5	0,6	0,2	0	0	0	0,42	595	1,5	4	0,8	66,7	7,9	0,118	
6	0,6	0,3	0	0	0	0,41	600	1,3	4	0,8	68,1	8,1	0,119	
7	0,6	0,2	0,5	0	0	0,39	640	6	3,6	0,6	71,1	8,9	0,125	
8	0,6	0,2	0,6	0	0	0,38	642	6	3,6	0,6	72	9	0,125	
9	0,6	0,2	0,7	0	0	0,37	644	6	3,6	0,6	72,2	9,2	0,127	
10	0,6	0,2	0,6	0,3	0	0,38	630	6	3,5	0,56	72,8	9	0,124	
11	0,6	0,2	0,6	0,5	0	0,37	636	6	3,5	0,56	73,7	9,1	0,123	
12	0,6	0,2	0,6	0,7	0	0,37	630	6	3,5	0,56	73,8	9,1	0,123	
13	0,6	0,2	0,6	0	0,3	0,38	633	6	3,5	0,56	75,1	9,2	0,124	
14	0,6	0,2	0,6	0	0,5	0,37	638	6	3,5	0,56	76	9,4	0,124	
15	0,6	0,2	0,6	0	0,7	0,38	634	6	3,5	0,56	76,4	9,5	0,124	

Рис. 1. Входное окно среды аналитической обработки «Дедуктор»

Таблица 3. Результаты работы сетевой модели

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	8 OUT	9 OUT	10 OUT	11 OUT	12 OUT	13 OUT	14 OUT
1	0,5	0	0	0	0	0,47	560	3,1	4,2	0,8	63,5	7,2	0,113	560	3,2	4,2	0,8	63,5	7,2	0,113
2	0,6	0	0	0	0	0,45	560	3	4	0,8	64,3	7,6	0,119	566	2,9	4	0,9	64,4	7,6	0,116
3	0,7	0	0	0	0	0,45	560	2,9	4	0,8	64,9	7,9	0,12	560	3,0	4	0,9	64,9	7,9	0,120
4	0,6	0,1	0	0	0	0,43	590	1,9	4	0,8	65,8	7,9	0,119	593	2,1	4	0,9	65,9	7,9	0,119
5	0,6	0,2	0	0	0	0,42	595	1,5	4	0,8	66,7	7,9	0,119	593	1,7	4	0,9	67	9	0,119
6	0,6	0,3	0	0	0	0,41	600	1,3	4	0,8	68,1	6,1	0,119	604	1,4	4	0,79	69,2	9,1	0,119
7	0,6	0,2	0,5	0	0	0,39	640	6	3,6	0,6	71,1	6,9	0,125	630	5,3	3,7	0,63	71,1	9,9	0,124
8	0,6	0,2	0,6	0	0	0,38	642	6	3,6	0,6	72	9	0,125	640	5,9	3,6	0,6	72	9	0,125
8	0,6	0,2	0,7	0	0	0,37	644	6	3,6	0,6	72,2	9,2	0,127	650	6,5	3,5	0,57	72,9	9,2	0,127
10	0,6	0,2	0,6	0,3	0	0,38	630	6	3,5	0,56	72,8	9	0,124	633	6,1	3,6	0,57	72,7	9	0,124
11	0,6	0,2	0,6	0,5	0	0,37	636	6	3,5	0,56	73,7	9,1	0,123	634	5,9	3,5	0,57	73,5	9,1	0,124
12	0,6	0,2	0,6	0,7	0	0,37	630	6	3,5	0,56	73,8	9,1	0,123	630	6	3,5	0,55	74	9,1	0,123
13	0,6	0,2	0,6	0	0,3	0,38	633	6	3,5	0,56	75,1	9,2	0,123	636	6	3,5	0,59	74,1	9,2	0,124
14	0,6	0,2	0,6	0	0,5	0,37	638	6	3,5	0,56	76	9,4	0,124	640	5,8	3,5	0,57	75,9	9,4	0,124
15	0,6	0,2	0,6	0	0,7	0,38	634	6	3,5	0,56	76,4	9,5	0,124	631	6,1	3,5	0,55	77	9,5	0,123

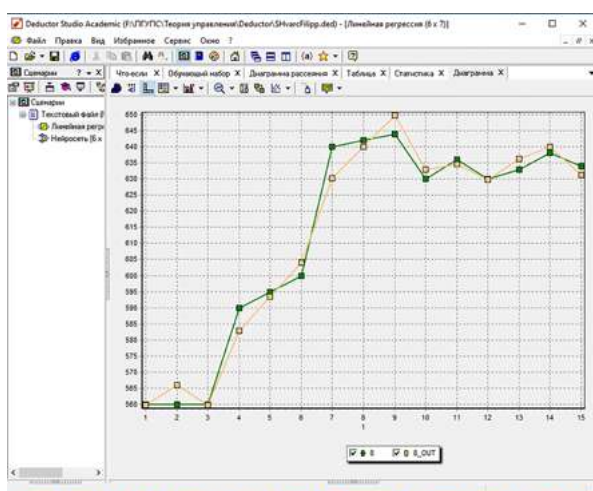


Рис. 2. Выход 8

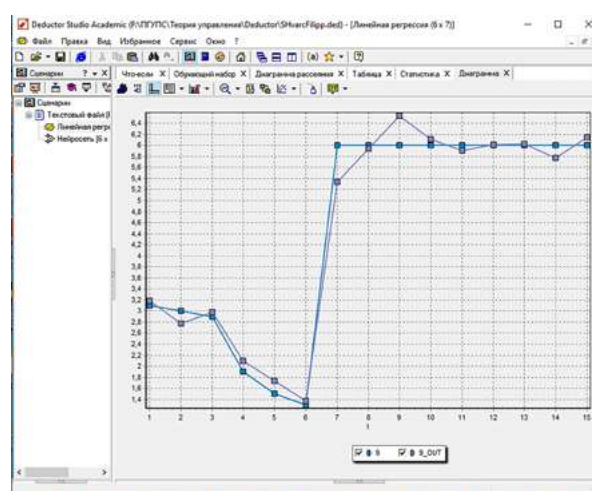


Рис. 3. Выход 9

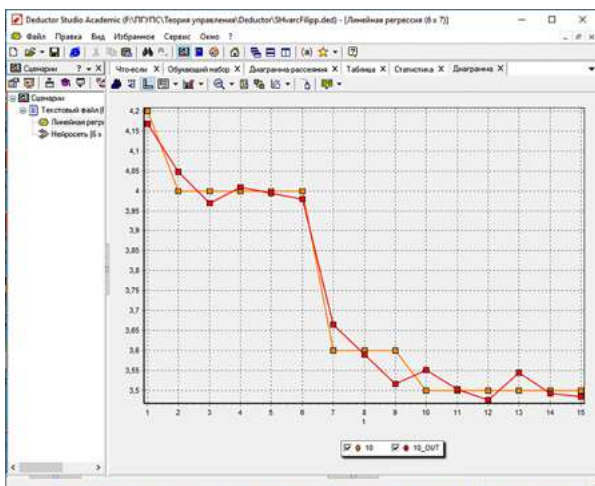


Рис. 4. Выход 10

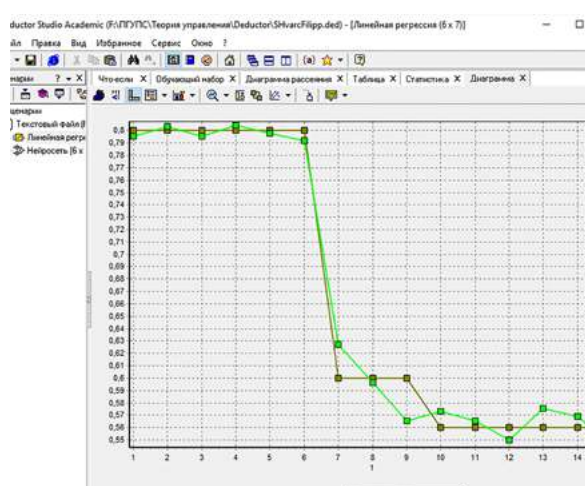


Рис. 5. Выход 11

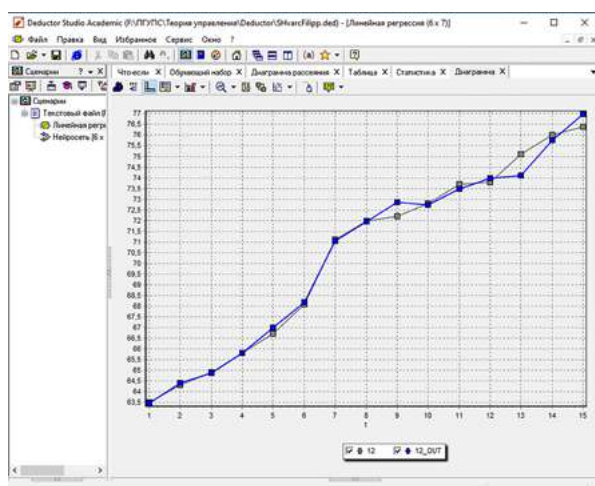


Рис. 6. Выход 12

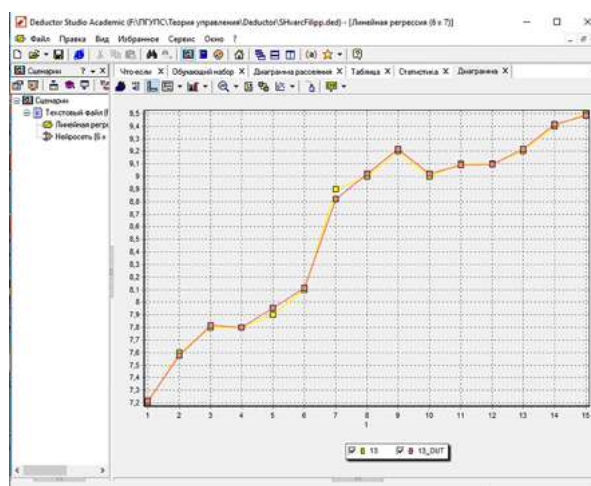


Рис. 7. Выход 13

Выводы

1. Результаты полученной нейронной модели хорошо согласуются с результатами физических экспериментов.
2. Предложенный способ моделирования может быть применен при синтезе различных композитных материалов.

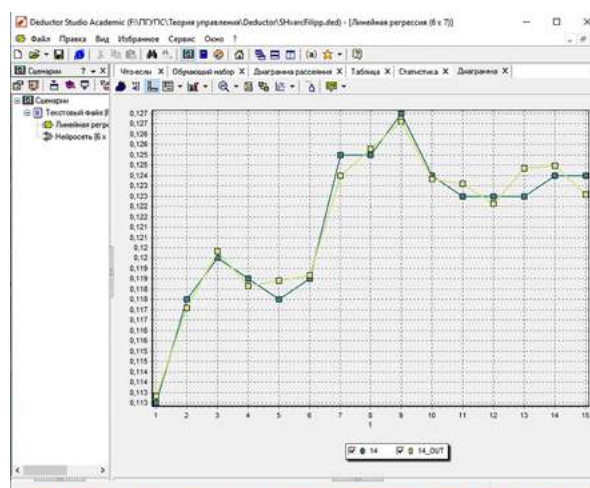


Рис. 8. Выход 14

Библиографический список

1. Калашников В. И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего / В. И. Калашников // Строительные материалы. — 2016. — № 1/2. — С. 96–103.
2. Белов В. В. Теоретическое обоснование оптимальных зерновых составов композиционных материалов с минеральными наполнителями / В. В. Белов, П. В. Куляев // Строительство и реконструкция. — 2017. — № 5(73). — С. 94–101.
3. Резаев Р. О. Применение комплексного подхода к оптимизации производственных составов на примере товарного бетона / Р. О. Резаев, А. А. Дмитриев, Н. А. Бородуля и др. // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие Смеси. — 2021. — № 2(63). — С. 42–55.
4. Низина Т. А. Построение экспериментально-статистических моделей «состав — свойство» физико-механических характеристик модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов / Т. А. Низина, А. С. Балыков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2016. — С. 54–66.
5. Низина Т. А. Экспериментально-статистические модели свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов / Т. А. Низина, А. С. Балыков // Инженерно-строительный журнал. — 2016. — № 2. — С. 13–24.
6. Низина Т. А. Применение моделей «состав — свойство» для исследования свойств модифицированных дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов / Т. А. Низина, А. С. Балыков, Л. В. Макарова // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2016. — № 12. — С. 15–21.
7. Дворкин Л. И. Оптимальное проектирование составов бетона / Л. И. Дворкин. — Львов: Вища школа, 1981. — 159 с.
8. Вознесенский В. А. Статистические решения в задачах анализа и оптимизации качества строительных материалов (методология и опыт применения): автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / В. А. Вознесенский. — М., 1970. — 44 с.
9. Вознесенский В. А. Компромиссная многофакторная оптимизация гарантированного качества шлакощелочных вяжущих / В. А. Вознесенский, Т. В. Ляшенко, А. Д. Довгань // Современное промышленное и гражданское строительство. — 2007. — Т. 3. — № 1. — С. 5–15.
10. Комохов П. Г. Структура и свойства цементного камня с позиции компьютерного материаловедения / П. Г. Комохов, А. М. Харитонов // Academia. Архитектура и строительство. — 2007. — № 4. — С. 63–66.
11. Комохов П. Г. Имитационно-численная модель структуры и свойств цементного камня / П. Г. Комохов, А. М. Харитонов // Известия вузов. Строительство. — 2008. — № 4(592). — С. 10–16.

Дата поступления: 04.10.2023

Решение о публикации: 21.11.2023

Контактная информация:

ХОДАКОВСКИЙ Валентин Аветикович — д-р техн. наук, проф.

ШВАРЦ Михаил Александрович — канд. техн. наук, доц.; shvarts4545@mail.ru

ШВАРЦ Филипп Михайлович — аспирант; films@mail.ru

Designing the Composition of High-Strength Self-Compacting Concrete Using Neural Network

V. A. Khodakovsky, M. A. Shvarts, F. M. Shvarts

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

For citation: Khodakovsky V. A., Shvarts M. A., Shvarts F. M. Designing the Composition of High-Strength Self-Compacting Concrete Using Neural Network // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 860–867. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-860-867

Summary

Purpose: To extend the possibility of interpreting the results of a limited number of physical experiments while selecting the components for the creation of concrete mixes and concrete on its basis with the required output properties. **Methods:** Using a neural network in the analytical environment Logitom, a model with six input variables representing introduced special additives and seven output variables representing the quality parameters of the concrete mix and concrete has been built. **Results:** In the process of training a three-layer network model has been formed, with the help of which the predicted output characteristics of concrete mix and concrete have been obtained. Experimental data and neural model prediction for each output variable have been compared in a clear graphical form. **Practical significance:** Prediction of the required characteristics of the synthesized material by means of the neural model response to various combinations of input data allows to carry out an optimal number of physical experiments. It is possible to apply the proposed modeling method for various multicomponent materials.

Keywords: Neural network, multiple regression, concrete mix, numerical experiment, physical experiment.

References

1. Kalashnikov V. I. Evolyuciya razvitiya sostavov i izmenenie prochnosti betonov. Betony nastoyashchego i budushchego [Evolution of the development of compositions and changes in the concrete strength. Concretes of the present and future]. *Stroitel'nye materialy* [Building Materials]. 2016, Iss. 1/2, pp. 96–103. (In Russian)
2. Belov V. V., Kulyaev P. V. Teoreticheskoe obosnovanie optimal'nyh zernovyh sostavov kompozitsionnyh materialov s mineral'nymi napolnitelyami [Theoretical substantiation of optimal grain compositions of composite materials with mineral fillers]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Construction and reconstruction]. 2017, Iss. 5(73), pp. 94–101. (In Russian)
3. Rezaev R. O., Dmitriev A. A., Borodulya N. A. et al. Primenenie kompleksnogo podhoda k optimizatsii proizvodstvennyh sostavov na primere tovarnogo betona [Application of an integrated approach to optimization of production compositions on the example of ready-mixed concrete]. *ALITinform: Tsement. Beton. Sukhie Smesi* [ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes]. 2021, Iss. 2(63), pp. 42–55. (In Russian)
4. Nizina T. A., Balykov A. S. Postroenie eksperimentalno-statisticheskikh modelej "sostav — svojstvo" fiziko-mekhanicheskikh harakteristik modifitsirovannyh dispersno-armirovannyh melkozernistykh betonov [Construction of experimental and statistical models "composition — property" of physical and mechanical characteristics of modified dispersed-reinforced fine-grained concrete]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture]. 2016, pp. 54–66. (In Russian)

5. Nizina T. A., Balykov A. S. Eksperimental'no-statisticheskie modeli svoystv modificirovannykh dispersno-armirovannykh melkozernistykh betonov [Experimental and statistical models of the properties of modified dispersed-reinforced fine-grained concrete]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Construction Engineering Journal]. 2016, Iss. 2, pp. 13–24. (In Russian)
6. Nizina T. A., Balykov A. S., Makarova L. V. Primenenie modelej “sostav — svoystvo” dlya issledovaniya svoystv modificirovannykh dispersno-armirovannykh melkozernistykh betonov [application of “composition-property” models to study the properties of modified dispersed-reinforced fine-grained concrete]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhova]. 2016, Iss. 12, pp. 15–21. (In Russian)
7. Dvorkin L. I. *Optimalnoe proektirovanie sostavov betona* [Optimal design of concrete compositions]. Lvov: Visha shkola Publ., 1981, 159 p. (In Russian)
8. Voznesenskij V. A. *Statisticheskie resheniya v zadachah analiza i optimizatsii kachestva stroitel'nykh materialov (metodologiya i opyt primeneniya): avtoref. dis. d-ra tehn. nauk* [Statistical solutions in problems of analysis and optimization of the quality of building materials (methodology and application experience): Abstract of thesis. dis. Dr. Tech. Sciences]. Moscow, 1970, 44 p. (In Russian)
9. Voznesenskij V. A., Lyashenko T. V., Dovgan A. D. Kompromissnaya mnogofaktornaya optimizatsiya garantirovannogo kachestva shlakoshelochnykh vyazhushih [Compromise multifactor optimization of guaranteed quality of slag-alkali binders]. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Modern industrial and civil construction]. 2007, vol. 3, Iss. 1, pp. 5–15. (In Russian)
10. Komohov P. G., Haritonov A. M. Struktura i svoystva cementnogo kamnya s pozitsii kompyuternogo materialovedeniya [Structure and properties of cement stone from the perspective of computer materials science]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo* [Academia. Architecture and construction]. 2007, Iss. 4, pp. 63–66. (In Russian)
11. Komohov P. G., Haritonov A. M. Imitatsionno-chislennaya model struktury i svoystv cementnogo kamnya [Simulation-numerical model of the structure and properties of cement stone]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News from universities. Construction]. 2008, Iss. 4(592), pp. 10–16. (In Russian)

Received: October 04, 2023

Accepted: November 21, 2023

Author's information:

Valentin A. KHODAKOVSKY — Dr. Sci. in Engineering, Professor

Mikhail A. SHVARTS — PhD in Engineering, Associate Professor; shvarts4545@mail.ru

Philipp M. SHVARTS — Postgraduate Student; films@mail.ru

УДК 624.13

Изучение параметров деформации оттаивающих грунтов на основе дисперсионного анализа и метода анализа иерархий

Синь Вэньшао, А. Ф. Колос, А. В. Петряев

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

Для цитирования: Вэньшао Синь, Колос А. Ф., Петряев А. В. Изучение параметров деформации оттаивающих грунтов на основе дисперсионного анализа и метода анализа иерархий // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 868–877. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-868-877

Аннотация

Цель: Изучить статистическую значимость исследуемых факторов — начальной температуры образца грунтов T_0 , влажности ω , всестороннего давления σ_3 и частоты нагружения f на параметры деформации оттаивающих грунтов методом ортогональных испытаний. На основе метода весового анализа изучить влияние веса различных факторов на результаты динамических трехосных испытаний. Установить уравнение регрессии для параметров деформации. **Метод:** Дисперсионный анализ (ANOVA) используется для проверки статистической значимости факторов по результатам ортогональных испытаний. С помощью метода анализа иерархий (МАИ) вес влияния факторов на результаты испытаний определяется посредством матричного расчета. **Результаты:** Факторы испытания: T_0 , ω , σ_3 и f имеют сильную значимость для результатов испытаний. Влияние влажности на результаты испытаний составляет более 50 %. Множественное уравнение линейной регрессии хорошо соответствует результатам испытаний. **Практическая значимость:** метод ортогональных испытаний, основанный на ANOVA и МАИ, имеет преимущества, выраженные в небольшом количестве испытаний, широком охвате факторов и анализе весов влияния. Результаты ANOVA и весового анализа показывают, что наибольшее влияние на деформацию земляного полотна оттаивающих грунтов оказывает влажность. Следует обращать внимание на изменение влажности грунтов для предотвращения инженерно-технических аварий при эксплуатации земляного полотна.

Ключевые слова: Деформационные характеристики, оттаивающий грунт, дисперсионный анализ, метод анализа иерархий, экспериментальное исследование.

Введение

Оттаивающий грунт — это грунт, в котором при переходе из мерзлого состояния в талое разрушаются криогенные структурные связи [1]. Непредсказуемое оттаивание грунта может произойти в любой момент во время строительства и эксплуатации инженерного сооружения по разным причинам [2]. Когда слой сезонного оттаивания многолетней мерзлоты подвергается воздействию положительной температуры,

микроструктура мерзлоты поверхностного слоя изменяется под действием гравитационной нагрузки. В этом случае наблюдается тенденция к переходу в состояние оттаивания, что приводит к изменению механических свойств многолетнемерзлых грунтов [3]. Осадка оттаивающего грунта основания земляного полотна, особенно неравномерная, может привести к деформации и повреждению конструкции земляного полотна [4].

Большинство китайских ученых изучает прямое влияние влажности, температуры образца, амплитуды динамических напряжений на деформацию грунта [5, 6]. Некоторые российские ученые считают, что деформационные характеристики оттаивающего грунта представлены коэффициентом оттаивания A_{th} и коэффициентом сжимаемости m [1, 7]. Коэффициент оттаивания определяет осадку мерзлых грунтов при оттаивании под действием собственной массы грунта. Коэффициент сжимаемости определяет осадку оттаявшего грунта под действием приложенной внешней нагрузки [8–12].

Оттаивание грунта под нагрузкой всегда сопровождается сложными процессами: взаимным перемещением между твердыми частицами, сжатием воды и воздуха в порах грунтов, изменением толщины водяной пленки, выдавливанием свободной воды из пор грунта [13]. Пористость оттаивающих грунтов уменьшается, и осадка происходит под двойным воздействием оттаивания и нагружения [14]. Деформация земляного полотна вызвана сочетанием теплофизических, механических и физико-химических изменений оттаивающих грунтов [15].

В качестве объекта исследования в этой работе взяты параметры характеристик деформации оттаивающих грунтов (модули E_d^c и E_d^y). Проведено динамическое трехосное испытание при циклическом нагружении методом ортогонального испытания. Проведен анализ статистической значимости влияющих факторов: T_0 , ω , σ_3 и f на основе дисперсионного анализа (ANOVA). Изучено влияние начальной температуры образца грунта T_0 , влажности ω , всестороннего давления σ_3 и частота нагрузки f на динамический модуль деформации (E_d^c) и динамический модуль упругости (E_d^y) на основе метода анализа иерархий (МАИ). Полученные уравнения линейной регрессии модулей E_d^c и E_d^y могут использоваться при проектировании земляного полотна в районах распространения вечной мерзлоты.

Метод испытаний

Испытания проведены с использованием динамического трехосного стабилометра производства компании «Геотек». Прибор разработан в соответствии с ГОСТ Р 56353—2015 и может выполнять динамическое трехосное испытание [16]. Трехосевой прибор в основном состоит из следующих основных частей: камеры трехосного сжатия, устройства нагрузочного, дегазатора жидкости и т. д., как показано на рис. 1. Результаты измерения обрабатываются с помощью системы АСИС и программного обеспечения GeotekStudio.

Испытательный грунт взят с буровой площадки № 340в российской высокоскоростной железнодорожной магистрали (ВСЖМ).

Определение гранулометрического состава проводилось в соответствии с ГОСТ 12536—2014 [17]. Полученная кривая показана на рис. 2. Данные результатов испытания приведены в табл. 1.

Лабораторное определение максимальной плотности и оптимальной влажности проводилось в соответствии с ГОСТ 22733—2016 [18], результаты испытаний приведены на рис. 3. Оптимальная влажность — 9,2 %, максимальная плотность в сухом состоянии — 2,105 г/см³.

Определение критической влажности и классификация грунта получены по ГОСТ 25100—2020 [8] и представлены в табл. 2.

С целью анализа влияния различных факторов на деформационные характеристики оттаивающего грунта проведены исследования для четырех факторов и трех уровней на основе метода ортогональных испытаний. Уровни представляют собой разные значения для каждого фактора. Например, три уровня для фактора T_0 : –5, –2 и 0 °С.

Испытательные факторы включают: начальную температуру образца грунтов T_0 , влажность ω , всестороннее давление σ_3 и частоту нагрузки f .

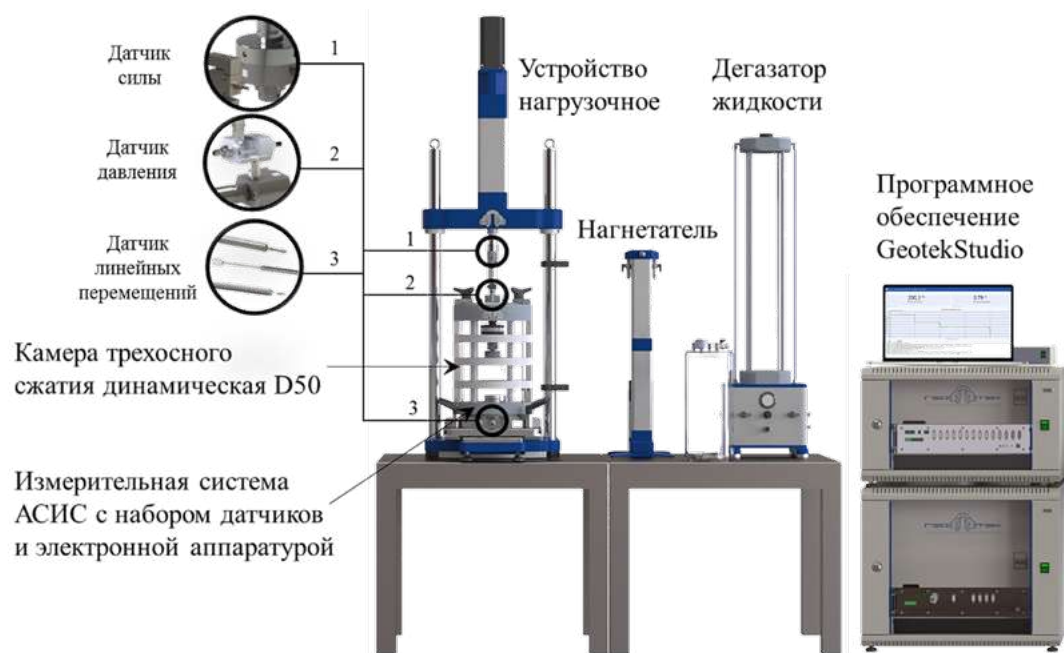


Рис. 1. Прибор для динамического трехосного испытания

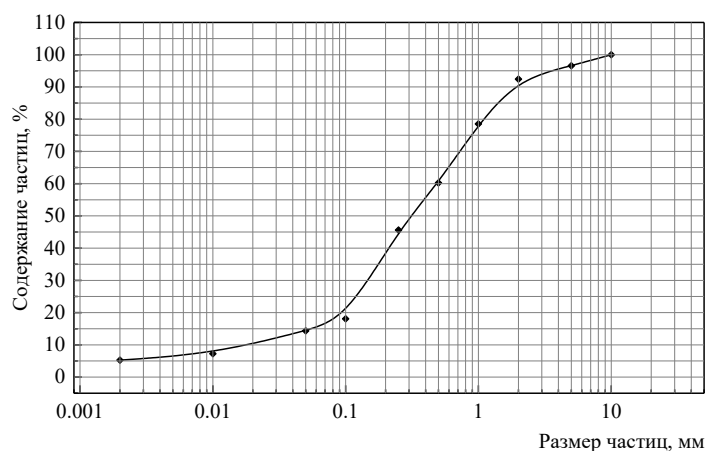


Рис. 2. Кривая гранулометрического состава грунтов

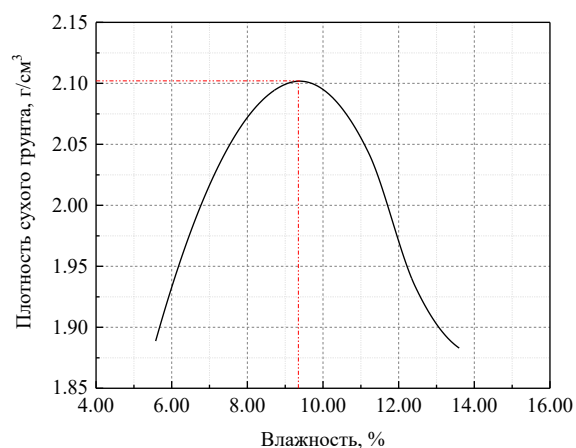


Рис. 3. Зависимость плотности грунта от влажности

Таблица 1. Результаты гранулометрического анализа

Размер фракции, мм	10–5	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,002	< 0,002
Содержание, %	3,44	4,13	13,88	18,30	14,63	27,55	3,71	7,21	1,97	5,18

Таблица 2. Физические характеристики испытательноно грунта

Параметры	Влажность на границах текучести, ω_L , %	Влажность на границах раскатывания, ω_p , %	Число пластичности, I_p , %	Естественная влажность, ω_e , %	Показатель текучести, I_L , д. ед.
Значение	20,78	14,37	6,41	3,24	< 0
По ГОСТ 25100—2020 — супесь песчаная					

Таблица 3. Величины уровней каждого фактора

Уровень	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\omega, \%$	$\sigma_3, \text{кПа}$	$f, \text{Гц}$
	A	B	C	D
1	A1 (–5)	B1 (9,2)	C1 (10)	D1 (1)
2	A2 (–2)	B2 (12,0)	C2 (20)	D2 (2)
3	A3 (0)	B3 (14,3)	C3 (30)	D3 (4)

Таблица 4. Результат испытаний

№		$T_0, ^\circ\text{C}$	$\omega, \%$	$\sigma_3, \text{кПа}$	$f, \text{Гц}$	$E^c_{d^p}, \text{МПа}$	$E^y_{d^p}, \text{МПа}$
Д-1	1	–5	9,2	30	2	78,85	86,45
	2					69,50	80,33
Д-2	1	–2	9,2	10	1	69,49	79,42
	2					69,35	77,87
Д-3	1	0	9,2	20	4	52,92	65,74
	2					42,23	56,41
Д-4	1	–5	12,0	20	1	62,90	70,26
	2					59,94	67,48
Д-5	1	–2	12,0	30	4	34,43	50,95
	2					34,08	43,41
Д-6	1	0	12,0	10	2	27,67	38,05
	2					27,07	37,56
Д-7	1	–5	14,3	10	4	11,57	17,26
	2					7,56	11,53
Д-8	1	–2	14,3	20	2	20,52	24,23
	2					17,23	23,09
Д-9	1	0	14,3	30	1	25,37	33,49
	2					24,19	31,16

В соответствии с методом ортогональных испытаний принят четырехфакторный и трехуровневый план испытаний ($L_9 3^4$), всего проведено 9 испытаний. Величины уровней каждого фактора приведены в табл. 3. Для уменьшения погрешности проводятся два испытания в одинаковых условиях. Поскольку вибрационная нагрузка на основание земляного полотна невелика, амплитуда вибродинамического воздействия на образец грунта принята равной 10 кПа, а количество циклов — 1000 раз.

Процесс испытания основан на соответствующих стандартах (ГОСТ 59597—2021, ГОСТ 56353—2015). Некоторые фотографии испыта-

тельного процесса показаны на рис. 4. Основные этапы теста следующие:

1. Приготовление воды и льда при 0 °C: во время теста необходимо следить за тем, чтобы температура жидкости, заполненной в трехосной камере, поддерживалась постоянной на уровне 0 °C.

2. Подготовка образцов грунта: нарушенный грунт необходимо уплотнять послойно. Сделать образец грунта диаметром 50 мм и высотой 100 мм. Подготовленные образцы грунта помещать в холодильник и замораживать на 12–24 часа для обеспечения полного замораживания. На следующий день доставать замороженный образец. Начинать следующий этап испытания, когда температура образца достигнет температуры испытания.

3. Установка образца грунтов: поместить фильтровальную бумагу на оба торца образца, установить образец в резиновую мембрану, а затем установить его на плунжер. В это время подготовленный лед следует поместить в камеру и затянуть винты для фиксации колбы.

4. Заполнение жидкостью: заполнить воду в дегазаторе жидкости в трехосную камеру через нагнетатель. При этом температура рабочей жидкости в трехосной камере поддерживается постоянной на уровне 0 °C.

5. Размещение датчиков: установить в держатель камеры датчик линейных перемещений, предназначенный для измерения вертикальной деформации образца. Наконечник датчика должен упираться в крышку камеры. Зафиксировать датчик в держателе винтом. Установить датчик линейных перемещений. Подсоединить фитинг для подачи давления воздуха в камеру к штуцеру в верхней поверхности камеры.

6. Запуск теста: в приложении GeotekStudio запустить испытания после настройки параметров.

7. Завершение испытания: когда достигается установленное количество циклов нагрузки, испытание завершается. После испытания нагрузочное устройство автоматически разгружается, давле-



Рис. 4. Процессы испытания

Таблица 5. Результаты дисперсионного анализа факторов, влияющих на динамический модуль E_d^c и E_d^y

Источник отклонений		E_d^c		E_d^y	
		F	p	F	p
Начальная температура	$T_0, ^\circ\text{C}$	56,969	0,000**	46,120	0,000**
Влажность	$\omega, \%$	177,074	0,000**	218,551	0,000**
Всестороннее давление	$\sigma_3, \text{кПа}$	35,695	0,000**	57,677	0,000**
Частота	$f, \text{Гц}$	56,789	0,000**	54,635	0,000**
R^2		0,986		0,988	
** $p < 0,01$ (существенно)		**		**	

ние в трехосной камере сбрасывается и рабочая жидкость опорожняется. Достать образцы грунтов и очистить испытательный стенд.

8. Сбор данных: экспортировать данные испытаний в измерительную систему АСИС.

Результаты испытаний и анализ статистической значимости

Результаты испытаний представлены в табл. 4. По результатам испытаний обнаружено, что в разных условиях испытаний они весьма различаются. Статистическая значимость влияния каждого фактора на результаты испытаний определена методом дисперсионного анализа.

Целью ANOVA является проверка значимости различия между средними значениями исследуемых факторов в разных группах с помощью сравнения дисперсий этих групп [19]. Определенные с помощью программного обеспечения SPSSAU результаты дисперсионного анализа факторов, влияющие на динамический модуль деформации и динамический модуль упругости, приведены в табл. 5.

Значения F , p и R^2 определяются в соответствии с [20].

По результатам ANOVA можно сделать вывод, что четыре влияющих фактора имеют существенное значение для динамического модуля деформации E_d^c и динамического модуля упругости E_d^y .

Графики зависимости двух модулей E_d^c и E_d^y от различных факторов представлены на рис. 5 и 6.

Из рис. 5 и 6 видно, что влияние одного и того же фактора на модуль E_d^c и E_d^y одинаково. Модуль E_d^c — это отношение увеличения напряжения к деформации сжатия на этапе нагрузки в течение одного цикла, E_d^y — это отношение снижения напряжения к обратной упругой деформации на этапе разгрузки в течение одного цикла. Траектории напряжения у них сходны. Следовательно, закономерности изменения двух модулей одинаковы.

Влияние температуры на характеристики деформации: когда температура постепенно увеличивается, оба модуля E_d^c и E_d^y уменьшаются. Причина в том, что при повышении температуры лед внутри образца грунта превращается в воду, сильная цементация льда ослабевает, а также снижается способность оттаивающего грунта сопротивляться деформации.

Влияние влажности на характеристики деформации: начальное состояние образца — грунт заморожен, в ходе испытания температура постепенно повышается, в результате чего количество жидкой воды внутри образца грунта с высокой влажностью (льдистостью) увеличивается. Эффективное напряжение уменьшается под смазывающим действием молекул воды, а модули E_d^c и E_d^y уменьшаются.

Влияние всестороннего давления на характеристики деформации: наличие всестороннего давления уменьшает пористость грунтов и усиливает

взаимодействие между частицами грунтов. Следовательно, с увеличением всестороннего давления оба модуля увеличиваются.

Влияние частоты нагружения на характеристики деформации: при низкочастотном нагружении частицы грунта имеют достаточно времени, чтобы перестроиться и приспособиться, более полно реагируя на нагрузку, и, следовательно, модули увеличиваются. При высокочастотном нагружении время перестройки и приспособления частиц грунта меньше, модули ниже.

Весовой анализ

На основе МАИ можно количественно оценить степень влияния значения каждого фактора на результаты испытаний. Вес влияния различных факторов или уровней факторов на результаты испытаний определяется посредством матричного расчета [21].

Согласно МАИ, вес влияния каждого уровня фактора на показатель теста равен $\beta = ASC^T$ [21], а вектор β представляет влияние каждого уровня фактора на тест по очереди.

Для простоты понимания даны следующие определения.

Матрица A : матрица эффекта влияния уровней факторов на тест.

Матрица AS : стандартная матрица воздействия влияния слоя факторного уровня на тест.

Матрица C : матрица весов влияния факторов на тест.

Весовой вектор β_c влияния уровня фактора для динамического модуля деформации:

$$\beta_c^T = [0,0654 \quad 0,0552 \quad 0,0449 \quad 0,2615 \quad 0,1683 \quad 0,0728 \\ 0,0283 \quad 0,0341 \quad 0,0355 \quad 0,0991 \quad 0,0767 \quad 0,0582]. \quad (1)$$

Весовой вектор β_y влияния уровня фактора для динамического модуля упругости:

$$\beta_y^T = [0,0476 \quad 0,0427 \quad 0,0375 \quad 0,2746 \quad 0,1893 \quad 0,0866 \\ 0,0338 \quad 0,0397 \quad 0,0421 \quad 0,0829 \quad 0,0667 \quad 0,0565]. \quad (2)$$

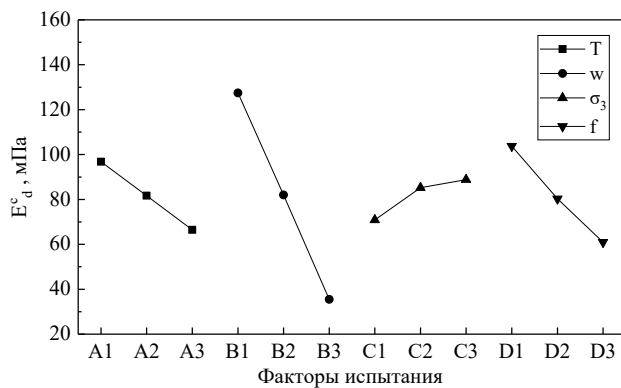


Рис. 5. Графики зависимости E_d^c от различных факторов

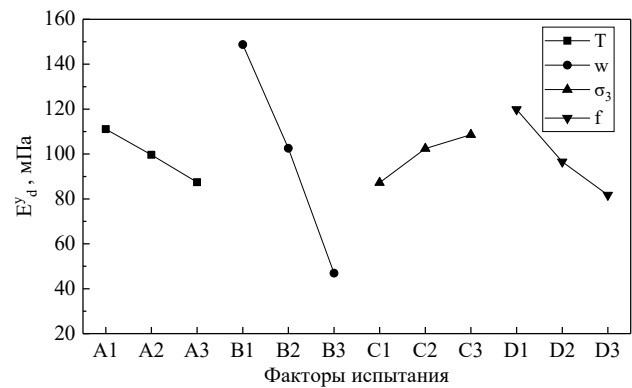
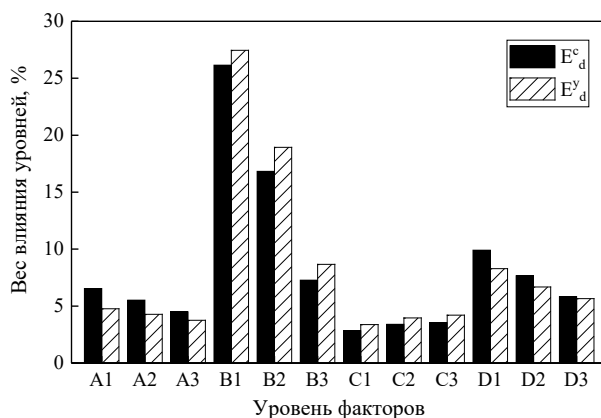
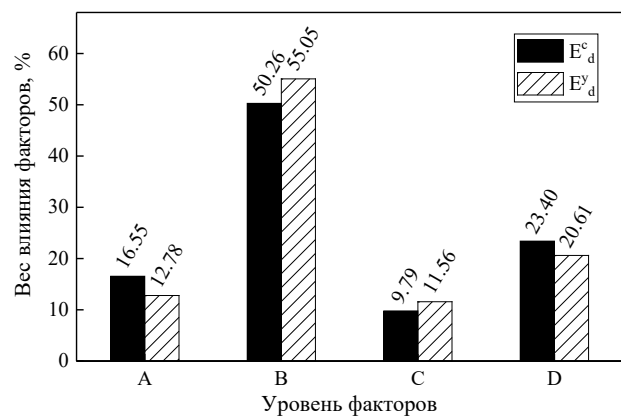


Рис. 6. Графики зависимости E_d^y от различных факторов



а



б

Рис. 7. Гистограмма веса:
а — вес влияния уровней факторов; б — вес влияния факторов

После расчета всех результатов ортогонального теста $L_9(3^3)$ с использованием МАИ получены веса влияния каждого уровня фактора на модули E_d^c и E_d^y (рис. 7).

Веса влияния температуры, влажности, всестороннего давления и частоты нагружения на модуль E_d^c составляют 16,55, 50,26, 9,79 и 23,40 % соответственно, на модуль E_d^y — 12,78, 55,05, 11,56 и 20,61 %. Влажность оказывает наибольшее влияние на модули E_d^c и E_d^y .

Уравнение регрессии

Согласно результатам ANOVA, четыре фактора имеют существенное значение для результатов испытаний. Следует учитывать

совместное действие четырех факторов при построении уравнения модулей E_d^c и E_d^y . На основе методологии поверхности отклика (RSM) построены множественные уравнения линейной регрессии:

$$E_d^c = -2,988T_0 - 8,984w + 0,448\sigma_3 - 6,808f + 147,096. \quad (3)$$

$$E_d^y = -2,327T_0 - 9,920w + 0,534\sigma_3 - 5,975f + 164,923. \quad (4)$$

Степень соответствия уравнения (3) $R^2 = 0,970$, уравнения (4) $R^2 = 0,965$ — обе превышают 0,95. Это указывает на то, что модули E_d^c и E_d^y имеют хорошую линейную связь с четырьмя факторами.

Заключение

Получены с помощью ортогональных испытаний значения динамического модуля деформации и динамического модуля упругости под влиянием многих факторов. Результаты ANOVA доказывают, что влажность, частота нагружения, начальная температура образца грунта и всестороннее давление имеют влияние на модули E_d^c и E_d^y . Вес воздействия влажности составляет наибольшую долю среди четырех факторов, превышающую 50 %. Следовательно, влажность грунта земляного полотна в районах распространения вечной мерзлоты во многом определяет степень деформации земляного полотна в процессе эксплуатации. Множественные уравнения линейной регрессии имеют высокую степень соответствия для параметров деформации.

Библиографический список

1. ГОСТ 12248—2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. — М.: Стандартинформ, 2011. — 82 с.
2. Мельников П. И. Оттаивающие грунты как основания сооружений / П. И. Мельников, С. С. Вялов. — М.: Наука, 1981. — 95 с.
3. Liu G. Deformation properties of thawing silty clay under cyclic loading / G. Liu, P. Yang, T. Zhang et al. // *Forest engineering*. — 2014. — Iss. 30(05). — Pp. 118–121.
4. Стрелецкий Д. А. Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири / Д. А. Стрелецкий, Н. И. Шикломанов, В. И. Гребенец // *Криосфера Земли*. — 2012. — № 1. — С. 22–32.
5. Peng L. Deformation properties of thawing silty clay under cyclic loading / L. Peng, J. Liu // *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. — 2010. — Iss. 32(04). — Pp. 567–572.
6. Xing Ch. Study on static and dynamics of thawing silty clay in seasonal freezing area: Master's Thesis / Ch. Xing. — Hebei: Hebei University of Architecture, 2020. — 74 p.
7. Вахрин И. С. Деформационные характеристики оттаивающих грунтов естественного сложения / И. С. Вахрин, Г. П. Кузьмин, В. В. Спектр // *Успехи современного естествознания*. — 2020. — № 8. — С. 37–42.
8. ГОСТ 25100—2011. Грунты. Классификация. — М.: Стандартинформ, 2018. — 45 с.
9. ГОСТ 5180—2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — М.: Стандартинформ, 2016. — 23 с.
10. Трофимов В. Т. Инженерная геология России. Т. 1. Грунты России / В. Т. Трофимов, Е. А. Вознесенский, В. А. Королев. — М.: КДУ, 2011. — 672 с.
11. Ложкин В. В. Диагностика минералов россыпей. Практическое руководство / В. В. Ложкин. — М.: Государственное научнотехническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1962. — 243 с.
12. Вахрин И. С. Деформационные характеристики оттаивающих грунтов о. Котельный (новосибирские острова) / И. С. Вахрин // *Theory and Methods of Polar Science: Proceedings of International youth scientific conference on the polar geodesy, glaciology, hydrology and geophysics*. — Санкт-Петербург, 2018. — С. 69–75.
13. Царапов М. Н. Современные проблемы исследований механических свойств оттаивающих грунтов / М. Н. Царапов, П. И. Котов // *Ломоносовские чтения* — 2012: сб. статей. — М., 2012.
14. Хрусталева Л. Н. Основы геотехники в криолитозоне: учебник / Л. Н. Хрусталева. — М.: ИНФРА-М, 2019. — 543 с.
15. Роман Л. Т. Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов / Л. Т. Роман, М. Н. Царапов и др. — М.: Университетская книга, 2018. — 188 с.
16. ГОСТ Р 56353—2015. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов. — М.: Стандартинформ, 2015. — 39 с.
17. ГОСТ 12536—2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. — М.: Стандартинформ, 2019. — 22 с.
18. ГОСТ 22733—2016. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов. — М.: Стандартинформ, 2019. — 15 с.

19. Wang Y. Mathematical Statistics and MATLAB Engineering Data Analysis / Y. Wang., S. Sui, A. Wang. — Beijing: Tsinghua University Press, 2006. — 328 c.

20. Zhuang C. Basics of applied mathematical statistics / C. Zhuang, C. He. — Guangzhou: South China University of Technology Press, 2013. — 426 p.

21. Guo S. The AHP Method of Orthogonal Trial / S. Guo, R. Huang // College mathematics. — 2004. — Iss. 20(01). — Pp. 114–117.

Дата поступления: 12.09.2023

Решение о публикации: 25.10.2023

Контактная информация:

СИНЬ Вэньшао — аспирант; wsxin9607@163.com

КОЛОС Алексей Федорович — канд. техн. наук, доц.; kolos2004@inbox.ru

ПЕТРЯЕВ Андрей Владимирович — д-р. техн. наук, ст. науч. сотр.; pgups60@mail.ru

Experimental Studies of Deformation Parameters of Thawing Soils Based on ANOVA and AHP

Xin Wenshao, A. F. Kolos, A. V. Petryaev

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

For citation: Wenshao Xin, Kolos A. F., Petryaev A. V. Experimental Studies of Deformation Parameters of Thawing Soils Based on ANOVA and AHP // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 868–877. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-868-877

Summary

Purpose: To study the statistical significance of many factors: the initial temperature of the soil sample T_0 , humidity ω , confining pressure σ_3 and loading frequency f on the deformation parameters of thawing soils by the method of orthogonal tests. Based on the method of weight analysis, to study the influence of the weight of various factors on the results of dynamic triaxial tests. To set the regression equation for the deformation parameters. **Method:** Analysis of Variance (ANOVA) is used to test the statistical significance of factors based on orthogonal tests. Using the Analytic Hierarchy Process (AHP), the influence weights of factors on test results are determined through matrix calculations. **Results:** Test factors: T_0 , ω , σ_3 and f have strong statistical significance for test results. The influence of humidity on test results is more than 50%. The multiple linear regression equation fits the test results well. **Practical significance:** The orthogonal testing method, based on ANOVA and AHP, has the advantage expressed in a small number of trials, a wide coverage of factors, and the analysis of influence weights. The results of ANOVA and weight analysis show that moisture has the greatest influence on the deformation of the subgrade of thawing soils. During the operation of the subgrade, changes in soil moisture must be strictly controlled to prevent engineering accidents.

Keywords: Deformation characteristics, thawing soil, Analysis of Variance, Analytic Hierarchy Process, experimental study.

References

1. GOST 12248—2010. *Grunt. Metody laboratornogo opredeleniya kharakteristik prochnosti i deformiruemo-sti* [GOST 12248—2010. Soils. Methods for laboratory determination of strength and deformability characteristics]. Moscow: Standartinform Publ., 2011, 82 p. (In Russian)

2. Melnikov P. I., Vyalov S. S. *Ottavayushchie grunty kak osnovaniya sooruzheniy* [Thawing soils as foundations for structures]. Moscow: Nauka Publ., 1981. 95 p. (In Russian)

3. Liu G., Yang P., Zhang T. et al. Deformation properties of thawing silty clay under cyclic loading. *Forest engineering*, 2014, Iss. 30(05), pp. 118–121.

4. Streletsky D. A., Shiklomanov N. I., Grebenets V. I. *Izmenenie nesushchey sposobnosti merzlykh gruntov v svyazi s potepleniem klimata na severe Zapadnoy Sibiri* [Changes in the bearing capacity of frozen soils due to climate warming in the north of Western Siberia]. *Kriosfera Zemli* [Earth's cryosphere]. 2012, Iss. 1 pp. 22–32. (In Russian)
5. Peng L., Liu J. Deformation properties of thawing silty clay under cyclic loading. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, Iss. 32(04), pp. 567–572.
6. Xing Ch. Study on static and dynamics of thawing silty clay in seasonal freezing area: Master's Thesis. Hebei: Hebei University of Architecture, 2020, 74 p.
7. Vakhnin I. S., Kuzmin G. P., Spektr V. V. *Deformatsionnye kharakteristiki ottaivayushchikh gruntov este-stvennogo slozheniya* [Deformation characteristics of thawing soils of natural composition]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Successes of modern natural science]. 2020, Iss. 8, pp. 37–42. (In Russian)
8. *GOST 25100—2011. GOST 25100—2011. Grunty. Klassifikatsiya* [GOST 25100—2011. Soils. Classification]. Moscow: Standartinform Publ., 2018, 45 p. (In Russian)
9. *GOST 12248—2010. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik* [GOST 12248—2010. Soils. Methods for laboratory determination of physical characteristics]. Moscow: Standartinform Publ., 2016, 23 p. (In Russian)
10. Trofimov V. T., Voznesensky E. A., Korolev V. A. *Inzhernaya geologiya Rossii. T. 1. Grunty Rossii* [Engineering geology of Russia. T. 1. Soils of Russia]. Moscow: KDU Publ., 2011, 672 p. (In Russian)
11. Lozhkin V. V. *Diagnostika mineralov rossypey. Prakticheskoe rukovodstvo* [Diagnostics of placer minerals. Practical guide]. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo literatury po geologii i okhrane nedr Publ., 1962, 243 p. (In Russian)
12. Vakhnin I. S. *Deformatsionnye kharakteristiki ottaivayushchikh gruntov o. Ko-tel'nyy (novosibirskie ostrova)* [Deformation characteristics of thawing soils on the island. Boiler room (Novosibirsk Islands)]. *Theory and Methods of Polar Science: Proceedings of International youth scientific conference on the polar geodesy, glaciology, hydrology and geophysics*. St. Petersburg, 2018, pp. 69–75. (In Russian)
13. Tsarapov M. N., Kotov P. I. *Sovremennye problemy issledovaniya mekhanicheskikh svoystv ottaivayushchikh gruntov* [Modern problems of research into the mechanical properties of thawing soils]. *Lomonosovskie chteniya — 2012: sb. statey* [Lomonosov readings — 2012: collection of articles]. Moscow, 2012.
14. Khrustalev L. N. *Osnovy geotekhniki v kriolitozone: uchebnik* [Fundamentals of geotechnics in permafrost: textbook]. Moscow: INFRA-M Publ., 2019, 543 p. (In Russian)
15. Roman L. T., Tsarapov M. N. et al. *Posobie po opredeleniyu fiziko-mekhanicheskikh svoystv promerzayushchikh, merzlykh i ottaivayushchikh dispersnykh gruntov* [Manual for determining the physical and mechanical properties of freezing, frozen and thawing dispersed soils]. Moscow: Universitetskaya kniga, 2018, 188 p. (In Russian)
16. *GOST R 56353—2015. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya dinamicheskikh svoystv dispersnykh gruntov* [GOST R 56353—2015. Soils. Methods for laboratory determination of the dynamic properties of dispersed soils]. Moscow: Standartinform Publ., 2015, 39 p. (In Russian)
17. *GOST 12536—2014. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava* [GOST 12536—2014. Soils. Methods for laboratory determination of granulometric (grain) and microaggregate composition]. Moscow: Standartinform Publ., 2019, 22 p. (In Russian)
18. *GOST 22733—2016. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya dinamicheskikh svoystv dispersnykh gruntov* [GOST 22733—2016. Soils. Methods for laboratory determination of the dynamic properties of dispersed soils]. Moscow: Standartinform Publ., 2019, 15 p. (In Russian)
19. Wang Y., Sui S., Wang A. *Mathematical Statistics and MATLAB Engineering Data Analysis*. Beijing: Tsinghua University Press, 2006, 328 p.
20. Zhuang C., He C. *Basics of applied mathematical statistics*. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2013, 426 p.
21. Guo S., Huang R. *The AHP Method of Orthogonal Trial*. *College mathematics*, 2004, Iss. 20(01), pp. 114–117.

Received: September 12, 2023

Accepted: October 25, 2023

Author's information:

Wenshao XIN — Postgraduate Student;
wsxin9607@163.com

Alexey F. KOLOS — PhD in Engineering, Associate Professor; kolos2004@inbox.ru

Andrey V. PETRYAEV — Dr. Sci. in Engineering, Senior Researcher; pgups60@mail.ru

УДК 699.841:624.139

Особенности проектирования и строительства зданий в сейсмоопасных районах с многолетнемерзлыми грунтами

П. А. Пегин, Д. С. Филимонов

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

Для цитирования: Пегин П. А., Филимонов Д. С. Особенности проектирования и строительства зданий в сейсмоопасных районах с многолетнемерзлыми грунтами // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 878–890. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-878-890

Аннотация

Цель: Анализ накопленного опыта проектирования и строительства зданий в районах с многолетнемерзлыми грунтами и сейсмической активностью. **Методы:** Применены статистические и аналитические методы. **Результаты:** Рассмотрены районы совместного распространения многолетнемерзлых грунтов и сеймики на территории России. Приведен обзор и анализ принципов строительства на многолетнемерзлых грунтах. Рассмотрены и проанализированы 2 основных способа сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии при использовании I принципа строительства и 3 комбинированных варианта при сочетании свайного фундамента с проветриваемым подпольем, подсыпкой и охлаждающими устройствами. Сделан вывод о строительстве с использованием I принципа, где в качестве фундамента предпочтителен свайный фундамент с высоким свайным ростверком и проветриваемым подпольем, так как сваи данного фундамента выступают в роли гибкой связи между надземной частью здания и основанием. При сейсмическом воздействии данный фундамент воспринимает действие вертикальной и горизонтальной сейсмической нагрузки, а также действие опрокидывающего момента. В случае, когда сохранять основание в мерзлом состоянии под зданиями невозможно, необходимо использовать принцип II, который реализуется за счет запаса прочности и жесткости строительных конструкций, а также предпостроечных мероприятий, направленных на оттаивание, предварительное уплотнение или частичную замену природных просадочных грунтов, повышение глубины заложения фундаментов или регулирование зоны оттаивания за счет планировочных решений или применения устройств для отвода тепла. Выявлено, что пространственные фундаментные платформы являются эффективными сейсмостойкими конструкциями фундаментов на многолетнемерзлых грунтах с использованием II принципа в условиях сейсмической активности. Выполнен анализ опыта проектирования на многолетнемерзлых грунтах в сейсмически активных районах. **Практическая значимость:** Предлагается использовать I принцип строительства сейсмостойких зданий на многолетнемерзлых грунтах (в случаях, если сохранение мерзлоты возможно).

Ключевые слова: Многолетнемерзлые грунты, сейсмическая активность, свайный фундамент, ростверк, проветриваемое подполье, крупнопанельные здания.

Введение

Зона распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) занимает около 60–65 % территории России. Кроме того, часть этой зоны характеризуется сложными инженерно-геологическими

условиями в совокупности с сейсмической активностью, интенсивность которой варьируется от 6 до 10 баллов. Являясь в достаточной степени перспективными территориями с высоким потенциалом развития, а также с богатым запасом

полезных ископаемых в северной климатической зоне, значительное внимание уделяется вопросам строительства объектов различного назначения, функционирующих в рассматриваемых условиях, так как обеспечение их надежности и безопасности представляет собой достаточно сложную инженерную задачу [1].

Районы совместного распространения многолетнемерзлых пород и сейсмической активности

Зона Крайнего Севера занимает значительные территории Российской Федерации, к которым относятся: вся территория Якутии, часть городских округов Республики Коми, весь Камчатский край, северные части Красноярского и Хабаровского краев, Иркутская (частично), Сахалинская (частично), Мурманская и Магаданская области, также часть Тюменской и Архангельской областей, вся территория Ненецкого, Чукотского Ямало-Ненецкого автономных округов и некоторые районы Ханты-Мансийского автономного округа [2]. В области многолетнемерзлых пород (ММП) находится более половины сейсмоактивных районов территории России.

К таким территориям относятся:

- районы Байкальской сейсмической зоны (Иркутская и Читинская области, Республика Бурятия), характеризующиеся сейсмичностью с интенсивностью 6–10 баллов;
- районы Северной (побережье моря Лаптевых) и Южной Якутии, характеризующиеся сейсмичностью 6–9 баллов, наибольшая сейсмичность наблюдается именно в южной части Якутии, на границе с Байкальской зоной;
- прибрежные районы Тихого океана, Охотского и Берингова морей (Магаданская и Камчатская области) характеризуются сейсмичностью 6–9 баллов.

Данные районы обладают значительными залежами полезных природных ископаемых —

газа, редких металлов, нефти и угля и находятся в условиях влияния сурового климата, характеризующегося холодными зимами, коротким летом, сильными ветрами и сложными инженерно-геологическими условиями, вследствие чего особое внимание уделяется вопросам строительства объектов различного назначения в данных условиях и принципам использования ММП в качестве оснований.

Принципы использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований

В районах распространения ММП принимаются несколько принципов использования грунтов в качестве оснований [3]:

- I принцип — грунты основания сохраняются вечномерзлом состоянии на весь период строительства и эксплуатации зданий и сооружений;
- II принцип — грунты используются в оттаявшем состоянии как при возведении объектов, так и при их эксплуатации.

Выбор принципа напрямую зависит от инженерно-геологических условий площадки строительства, конструктивных и технологических особенностей здания. При выборе принципа необходимо провести детальный анализ данных инженерно-геоэкологических изысканий и произвести расчет глубины чаши оттаивания с учетом возможных деформаций основания [4].

В условиях повышенной сейсмичности района предпочтение стоит отдавать I принципу строительства согласно действующей нормативной документации — СП 25.13330, а также руководству по проектированию оснований и фундаментов на вечномерзлых грунтах [5]. Использование данного принципа позволяет снизить расчетную сейсмичность площадки строительства, как отмечают Т. А. Белаш и Д. А. Сергеев в исследованиях [6, 7].

Реализация I принципа может выполняться различными решениями, но устройство высокого

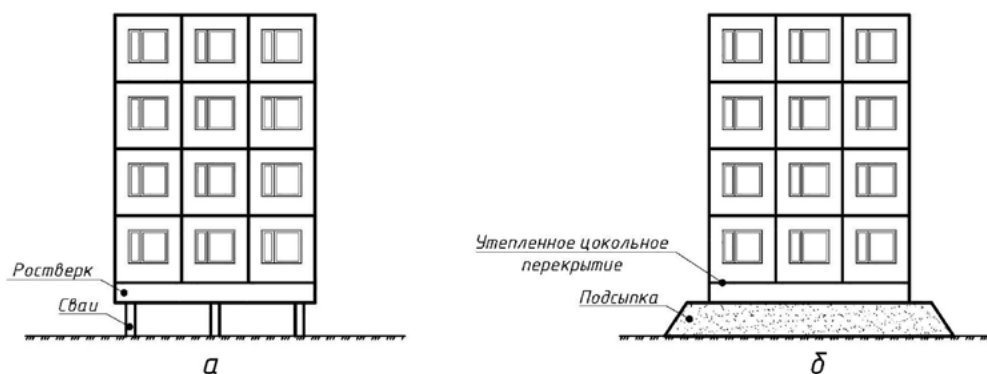


Рис. 1. Способ сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии с использованием высокого свайного ростверка с проветриваемым подпольем (а) и подсыпки (б)

свайного ростверка с проветриваемым подпольем (открытые, закрытые и с регулируемым проветриванием) для сохранения грунта в мерзлом состоянии является наиболее распространенным способом по регулированию температурного режима, влияющего на грунтовое основание.

Сваи данного фундамента выступают в роли гибкой связи между надземной частью здания и основанием и являются своего рода сейсмоизоляцией. При сейсмическом воздействии данный фундамент воспринимает действие вертикальной и горизонтальной сейсмической нагрузки, а также действие опрокидывающего момента [8].

Выявлено, что при увеличении свободной длины свай происходит увеличение периода собственных колебаний здания, что, в свою очередь, уменьшает сейсмическую нагрузку, действующую на здание, но приводит к увеличению их армирования [9]. При увеличении податливости свайного фундамента происходит рост усилий в месте сопряжения ростверка со сваями, следовательно, при сейсмических воздействиях интенсивностью более 7 баллов сейсмоизоляция в виде рассматриваемой системы может быть достигнута при внедрении в конструкцию дополнительных демпфирующих устройств, обеспечивающих достаточную податливость, или же при изменении конструкций свай, например при их исполнении в виде трубчатых элементов кольцевого сечения [10].

Помимо проветриваемого подполья, также возможно устройство подсыпок (рис. 1, б) в качестве основания, целесообразность использования которых обуславливается довольно большой мощностью пород подземного льда. Подсыпки выполняются для нешироких зданий в плане, как для отдельно стоящих, так и для групп зданий и сооружений. Материалом подсыпки выступают непучинистые грунты, чтобы при действии нагрузки от здания грунт не выветривался с откосов. Наилучшим вариантом являются крупные, средней крупности пески и крупнообломочные грунты, а также шлаки [11].

Использование пористых подсыпок может быть эффективным способом по гашению сейсмических воздействий интенсивностью не более 8 баллов, так как сама подсыпка выступает в роли сейсмоизолирующей подушки.

Возможны и комбинированные способы (рис. 2) использования подсыпок совместно с проветриваемым подпольем, системой охлаждающих труб, а также устройством сезонно-охлаждающего устройства (СОУ).

Вариант с охлаждающими трубами и СОУ используется в случаях, когда простое зимнее охлаждение через проветриваемое подполье не обеспечивает сохранение основания в мерзлом состоянии, а оттаивание грунтов удорожает строительство. Охлаждающие трубы устраиваются в подсыпке под всем зданием и объединяются кол-

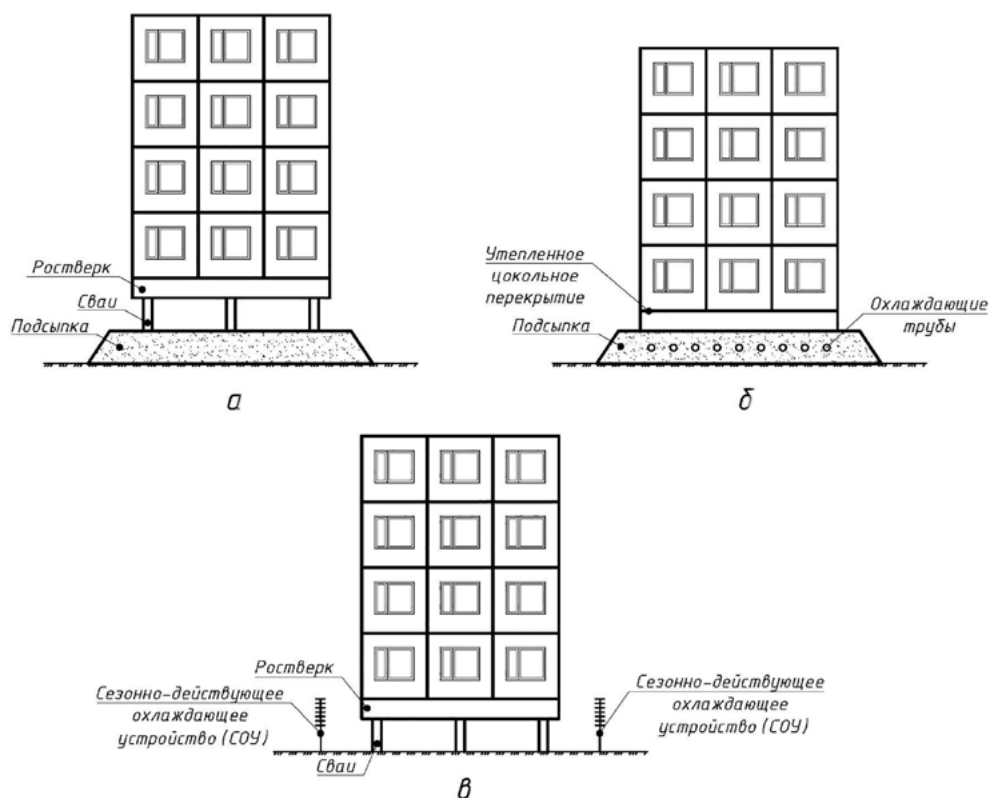


Рис. 2. Комбинированные способы сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии:

- а* — с использованием подсыпки и проветриваемого подполья;
- б* — с использованием подсыпки с охлаждающими трубами;
- в* — с использованием проветриваемого подполья и СОУ

лекторами, по которым подается хладоноситель (в жидком или газообразном состоянии).

Движение хладоносителя по трубкам может осуществляться естественным образом за счет законов физики и атмосферного давления, а также при помощи аммиачных или фреоновых холодильных установок. Допускается использовать воздушное охлаждение, но в летний период систему необходимо закрывать, иначе при попадании в трубы воды в них может произойти закупоривание в зимний период. Трубы располагают параллельно короткой части здания, с уклоном для стока воды, которая может образоваться в них при таянии инея или попадания в летнее время.

СОУ или термосифоны/термостабилизаторы используются для охлаждения пластичномерзлых и промораживания талых грунтов. Работа СОУ основана на силе тяжести и разницы тем-

ператур и заключается в переносе холодного атмосферного воздуха к грунтам основания за счет циркуляции паров от хладогента (керосин, аммиак, углекислота и др.) внутри СОУ, благодаря чему в грунтах поддерживается необходимая проектная температура. Подробно методы и технологии термостабилизации ММГ представлены в технической литературе и научных исследованиях. Например, в работах А. Р. Урманова [12], Е. С. Лихачева [13], М. Д. Константинова [14] освещены виды, особенности и методы технологии термостабилизации грунтов. В исследованиях Н. Ю. Ермиловой [15], И. И. Сахарова [16] представлены виды конструктивных решений систем термостабилизации.

В случае, когда сохранять основание в мерзлом состоянии под зданиями невозможно, необходимо использовать принцип II. Особенно он

актуален для районов, где в течение срока эксплуатации здания возможен переход грунта из мерзлого в талое состояние или наоборот [17]. Особое внимание необходимо уделять учету совместной работы надземной части и оттаивающего основания. Опасность для надземной части представляет относительная разность осадок, вызванная в результате оттаивания грунтов, в результате чего эта разность может регулироваться с помощью различных конструктивных мероприятий, например — смещение наружных фундаментов внутрь здания или обогрев грунта вокруг здания, но данные подходы требуют обязательного решения пространственных температурно-влажностных задач и задач напряженно-деформированного состояния в системе «здание — оттаивающее состояние» [18].

Обычно проект допускает неравномерную осадку здания в течение долгих лет эксплуатации, в результате чего особенно важно подготовить здание к неравномерным деформациям, поэтому фундаментные конструкции, возводимые с учетом II принципа, следует проектировать массивными и жесткими, с большим запасом прочности, способными воспринимать достаточные неравномерные осадки. К таким конструкциям могут относиться пространственные фундаментные платформы (ПФП) в различных конструктивных исполнениях [19–21]. Особенностью данных конструкций является способность воспринимать деформации, которые возникают из-за нестабильного грунта и действия сейсмической нагрузки, за счет жесткой пространственной платформы, путем жесткого соединения верхних и нижних плит с системой связей — поперечных стоек и ферм, которые придают платформе дополнительную жесткость. За счет большей площади опирания платформа имеет низкое давление на грунт, что делает ее малочувствительной к неравномерным осадкам грунта.

Данные фундаменты эффективно работают на ММГ с использованием II принципа в усло-

виях сейсмической активности, а также в слабых грунтовых условиях, что подтверждено научными исследованиями Т. А. Белаш и Т. А. Ивановой [22], А. А. Грузкова, П. Е. Соляник и Н. А. Вернина [23].

Стоит добавить, что добиться устойчивости сооружения только за счет запаса прочности и жесткости строительных конструкций не всегда предоставляется возможным, поэтому принимают более эффективные методы с использованием предпостроечных мероприятий (мероприятий по уменьшению деформируемости грунта основания) [24].

Предпостроечные мероприятия при II принципе направлены на оттаивание, предварительное уплотнение или частичную замену природных просадочных грунтов, повышение глубины заложения фундаментов или регулирование зоны оттаивания за счет планировочных решений или применения устройств для отвода тепла. Для предпостроечного оттаивания грунтов можно применить естественное солнечное тепло, гидравлический метод, паро- и электроотопление [25].

Исходя из анализа и обзора вышепредставленного, авторы предлагают классификационную схему принципов использования ММГ в качестве оснований (рис. 3).

Опыт проектирования на многолетнемерзлых грунтах в сейсмически активных районах

При проектировании зданий в районах совместного распространения ММГ и сейсмичности необходимо принимать симметричные конструктивные схемы с равномерным распределением жесткостей и масс, чтобы в плане имели простую и компактную форму, а в случае достаточной протяженности — разделялись на самостоятельные отсеки антисейсмическими швами.

В данной статье опыт проектирования на ММГ в сейсмически активных районах отражен на примере жилых крупнопанельных зданий, так как

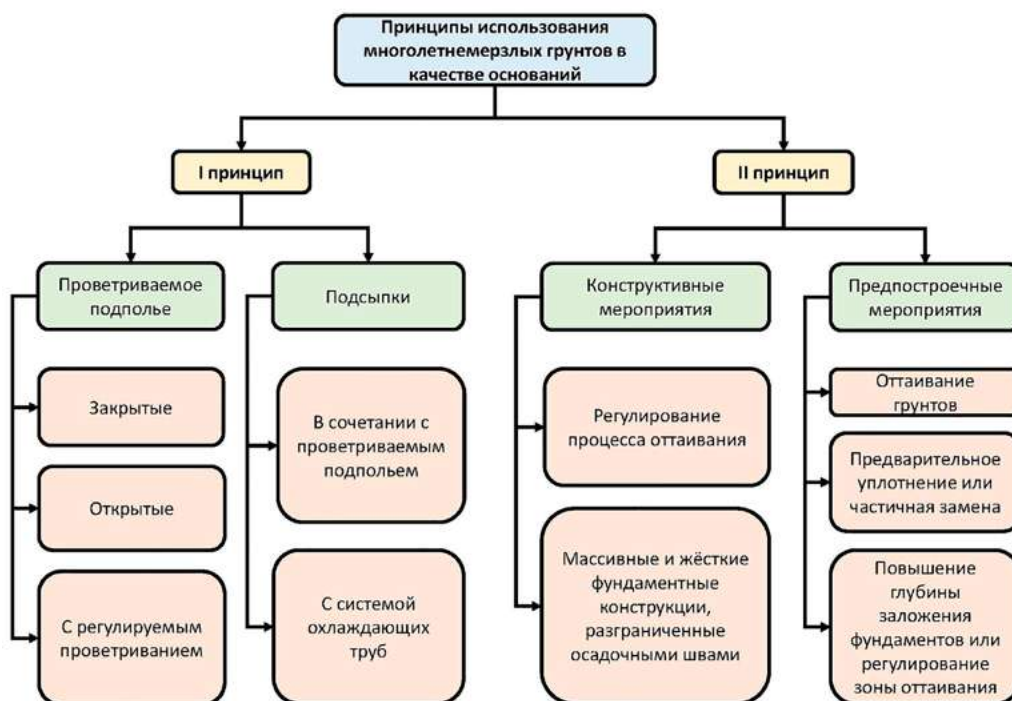


Рис. 3. Принципы использования ММГ в качестве оснований

Серии жилых крупнопанельных зданий для северных районов с сейсмической активностью

Серия и район строительства	Принцип строительства	Сейсмичность	Фундаменты
1-464ВМу, Якутск	I	7	Железобетонные сваи, ростверк монолитный, фундаменты ленточные из бетонных блоков с антисейсмическим поясом высотой 30 см
1-464АСП-1/72, Магадан	I/II	7–8	
111-122, Северобайкальск, Магадан, Тында, Нерюнгри	I	7, 8, 9	Железобетонные сваи, ростверк монолитный
	II		Пространственный рамный каркас — «гибкий этаж»
123, Магаданская область	I	до 8	Железобетонные сваи с камуфлетной пятой, ростверк монолитный
	II		

именно их в данных районах большинство. Крупнопанельные жилые здания — это здания условно «жесткой» конструкции, которые имеют стеновую (бескаркасную) конструктивную систему с продольным, поперечным или продольно-поперечным расположением несущих стен, это связано с их высоким резервом сопротивляемости к сейсмическим воздействиям, а именно [26]:

- крупнопанельные здания обладают значительной сдвиговой жесткостью;
- швы между панелями выступают в роли демпферов при сейсмических воздействиях, т. е.

смещения, возникающие вдоль швов, приводят к появлению сил трения;

- образование трещин в швах при землетрясении не приводит к мгновенной потере несущей способности, в результате чего крупнопанельные здания имеют высокий резерв к сопротивляемости к сейсмическим колебаниям, локальное разрушение одного элемента не приведет к обрушению всего здания.

Крупнопанельные здания в северной климатической зоне возводились по типовым сериям, но с некоторыми особенностями в конструктиве в



Рис. 4. Аэрофотосъемка жилых домов 122 серии в г. Северобайкальске [27, с. 25]

зависимости от принципа строительства, а также сейсмичности площадки строительства. Наиболее распространенные серии и их отличительные особенности представлены в таблице.

Серия 111-122 проектировалась специально под особые климатические и геологические особенности — наличие ММГ и высокой сейсмической активности, которыми обладал г. Северобайкальск (в дальнейшем 122 серия строилась в Магадане, Тынде, Нерюнгри). Жилые здания данной серии имеют бескаркасную конструктивную систему, а несущая способность обеспечивается за счет массивных поперечных стен, которые устанавливались с шагом 3 и 3,6 м. Для защиты дворовой части от сильных ветров они застраивались полукольцом, с ломанной формой и со скошенными торцами (рис. 4).

Для предотвращения сейсмических воздействий жилые дома 122 серии в г. Северобайкальске строили на мощном пространственном монолитном фундаменте (отметка подошвы фундамента составляет минус 4,6 м). В роли антисейсмических мероприятий предусматри-

вались системы резервных выключающихся связей, представляющие собой специальные конструктивные элементы, которые увеличивают жесткость здания до сейсмического воздействия и выключаются после достижения критической сейсмической нагрузки на здание [28].

Выключающиеся связи выполнены в виде двух контрфорсов, расположенных между зданием и фундаментом и в зоне их касания, оборудованы пакетом металлических пластин, соединенных между собой болтами или заклепками. При возникновении сейсмического воздействия нижний контрфорс начинает движение, в результате — болтовые соединения или заклепки срезаются, пластины смещаются относительно друг друга, происходит выключение связи и здание меняет периоды колебания, подстраиваясь под землетрясение. При небольших воздействиях, не приводящих к разрушению несущих элементов, возможно восстановление самовыключающихся связей и повторное использование системы.

Выключающиеся связи относятся к адаптивным системам, и помимо них в зданиях в качестве податливых элементов возможно использование и других решений систем сейсмозащиты, например — гибкий этаж, кинематические системы с качающимися опорами, пружинные гасители колебаний и демпферы различного исполнения.

Заключение

Обобщая все вышесказанное, можно сделать следующие выводы:

1. Северная климатическая зона занимает значительные территории Российской Федерации. В области распространения ММГ находится более половины сейсмоактивных районов территории России.

2. Данные районы обладают значительными залежами полезных природных ископаемых — газа, редких металлов, нефти, угля и являются в достаточной степени перспективными территориями с высоким потенциалом развития.

3. В районах распространения ММГ принимается несколько принципов использования грунтов в качестве оснований — грунты основания сохраняются в вечномерзлом состоянии на весь период строительства и эксплуатации зданий и сооружений (I принцип); грунты используются в оттаявшем состоянии как при возведении объектов, так и при их эксплуатации (II принцип).

4. В условиях повышенной сейсмичности района предпочтение стоит отдавать I принципу строительства, где в качестве фундамента оптимальным вариантом является высокий свайный ростверк с проветриваемым подпольем, так как сваи данного фундамента выступают в роли гибкой связи между надземной частью здания и основанием. При сейсмическом воздействии данный фундамент воспринимает действие вертикальной и горизонтальной сейсмической нагрузки, а также действие опрокидывающего момента. Также при высоких сейсмических воздействиях сейсмоизо-

ляция в виде рассматриваемой системы может быть достигнута при внедрении в конструкцию дополнительных демпфирующих устройств.

5. В случае, когда сохранять основание в мерзлом состоянии под зданиями невозможно, необходимо использовать принцип II, который реализуется за счет запаса прочности и жесткости строительных конструкций, а также предпостроечных мероприятий, направленных на оттаивание, предварительное уплотнение или частичную замену природных просадочных грунтов, повышение глубины заложения фундаментов или регулирование зоны оттаивания за счет планировочных решений или применения устройств для отвода тепла.

6. Пространственные фундаментные платформы являются эффективными сейсмостойкими фундаментами на многолетнемерзлых грунтах с использованием II принципа в условиях сейсмической активности.

Библиографический список

1. Ivanova Z. V. Use of earthquake-proof foundations in the design of residential buildings for the areas of the northern climate zone / Z. V. Ivanova, D. S. Filimonov // E3S Web Conf. International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) “Actual Problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution”. — 2023. — Iss. 383. — Article № 02001. — DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338302001>.
2. Постановление Правительства РФ от 16 ноября 2021 г. № 1946 «Об утверждении перечня районов Крайнего Севера и местностей, приравненных к районам Крайнего Севера, в целях предоставления государственных гарантий и компенсаций для лиц, работающих и проживающих в этих районах и местностях, признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации и признании не действующими на территории Российской Федерации некоторых актов Совета Министров СССР».

3. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2020 г. № 915/пр. — М.: Стандартинформ, 2021.
4. Майструк А. Г. Анализ конструкции фундаментов, устраиваемых на вечномёрзлых грунтах / А. Г. Майструк, П. А. Пегин // Заметки ученого. — 2021. — № 9-1. — С. 31–35.
5. Руководство по проектированию оснований и фундаментов на вечномёрзлых грунтах / НИИ оснований и подземных, сооружений им. Н. М. Герсеванова Госстроя СССР. — М.: Стройиздат, 1980. — С. 303.
6. Белаш Т. А. Сейсмостойкий фундамент в районах вечной мерзлоты / Т. А. Белаш, Д. А. Сергеев // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2013. — № 6. — С. 40–42.
7. Белаш Т. А. Реализация принципа сейсмоизоляции в зданиях на вечномёрзлых грунтах / Т. А. Белаш, Д. А. Сергеев // Жилищное строительство. — 2016. — № 1-2. — С. 47–50.
8. Гриб С. И. Проектирование свайных фундаментов на вечномёрзлых грунтах в сейсмических районах / С. И. Гриб // Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. — 1976. — № 38.
9. Белаш Т. А. О возможности использования высокого свайного ростверка в качестве элемента сейсмоизоляции для зданий, возводимых в районах вечной мерзлоты / Т. А. Белаш, Д. А. Сергеев // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2015. — № 4. — С. 45–47.
10. Belash T. A. Effects of permafrost on earthquake resistance of transport facilities in the Baikal — Amur mainline area / T. A. Belash, A. M. Uzdin // Transportation Soil Engineering in Cold Regions: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019 (Series: Lecture Notes in Civil Engineering, volume 49). — Vol. 1. — Singapore: Springer, 2020. — Pp. 79–95.
11. Справочник по строительству на вечномёрзлых грунтах / Под ред. Ю. Я. Велли, В. И. Докучаев, Н. Ф. Федорова. — Ленинград: Стройиздат, 1997. — 552 с.
12. Урманова А. Р. Технология термостабилизации грунта / А. Р. Урманова // Аллея науки. — 2018. — Т. 8 — № 4 — С. 59–63.
13. Лихачев Е. С. Методы термостабилизации вечномёрзлых грунтов и разработка перспективных установок замораживания грунтов / Е. С. Лихачев, С. А. Молчанов // Академическая публицистика. — 2018. — № 10 — С. 14–19.
14. Константинов М. Д. Виды термостабилизации многолетнемёрзлых грунтов и особенности их применения / М. Д. Константинов // Наука, техника и образование. — 2020. — № 4. — С. 67–71.
15. Ермилова Н. Ю. Термостабилизация многолетнемёрзлых грунтов: технологии и оборудование / Н. Ю. Ермилова, А. В. Журавлев, В. Ю. Тянь // Инженерный вестник Дона. — 2021. — № 5 — С. 424–432.
16. Sakharov I. I. Modern approaches to the design of bases and foundations at permafrost zone sites with account for the effects of global warming / I. I. Sakharov // E3S Web Conf. International Scientific Conference “Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East” (AFE-2022). — 2023. — Iss. 371. — Article №. 02031. — DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337102031>.
17. Охлопкова Т. В. Строительство и проектирование зданий и сооружений в условиях вечной мерзлоты / Т. В. Охлопкова, Г. Р. Гурьянов, А. А. Плотников // Инженерный вестник Дона. — 2018. — № 4. — С. 184–196.
18. Кудрявцев С. А. Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечноэлементные расчеты): книга для работников научно-исследовательских и проектных организаций, преподавателей, аспирантов и студентов строительных и транспортных вузов / С. А. Кудрявцев, И. И. Сахаров, В. Н. Парамонов. — Санкт-Петербург: группа компаний «Геореконструкция», 2014. — 247 с.
19. Патент № 38789 Российская Федерация, МПК E04D 27/32, 27/34, 27/35. Сборная пространственная железобетонная фундаментная платформа для строительства многоэтажных зданий в особых грунтовых условиях и сейсмичности: № 2004107322/22: заявл. 11.03.2004: опубл. 10.07.2004 / Н. П. Абовский, С. Н. Абовская, В. А. Матюшенко др.; патентообладатель: Красноярская государственная архитектурно-строительная академия. — 31 с.
20. Патент № 45410 Российская Федерация, МПК E04D 27/32, 27/34, 27/35. Монолитная пространственная фундаментная платформа: № 2004135990/22: заявл.

08.12.2004: опублик. 10.05.2005 / Н. П. Абовский, В. И. Сапкалов, В. А. Сиделев; патентообладатель: Красноярская государственная архитектурно-строительная академия КрасГАСА. — 11 с.

21. Патент № 55388 Российская Федерация, МПК E04D 27/34. Пространственная железобетонная фундаментная платформа для малоэтажных зданий для строительства в особых грунтовых условиях и сейсмичности в сборном и монолитном вариантах: № 2006113951/22: заявл. 24.04.2006: опублик. 10.08.2006 / В. А. Сиделев, Н. П. Абовский, А. П. Попович и др.; патентообладатель: Красноярская государственная архитектурно-строительная академия КрасГАСА. — 13 с.

22. Belash T. A. Earthquake resistance of buildings on thawing permafrost grounds / T. A. Belash, T. V. Ivanova // Magazine of civil engineering. — 2020. — Iss. 1(93). — DOI: 10.18720/MCE.93.5.

23. Грузков А. А. Пространственные платформы как эффективные и экономичные фундаменты для зданий в сложных грунтовых условиях и сейсмичности строительных площадок / А. А. Грузков, П. Е. Соляник, Н. А. Вернин // Инновации и инвестиции. — 2020. — № 5. — С. 207–211.

24. Ибрагимов Э. В. Оптимизация устройства оснований и фундаментов в криолитозоне с использованием термостабилизации грунтов: дисс. ... канд. техн. наук / Э. В. Ибрагимов; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. — М., 2020. — 30 с.

25. Никитенко А. В. Устройство фундаментов в районах вечной мерзлоты / А. В. Никитенко, И. Г. Выродова //

Сборник статей международной научно-практической конференции «Экологические, инженерно-экономические, правовые и управленческие аспекты развития строительства и транспортной инфраструктуры». — 2017. — С. 183–185.

26. Белаш Т. А. Сейсмостойкие конструкции крупнопанельных зданий / Т. А. Белаш, Д. В. Зенченко // Academia. Архитектура и строительство. — 2019. — № 3. — С. 130–137.

27. Муратова Т. Северобайкальск — ленинградский город на БАМе. Часть 1. Книга о строителях ПМК «ЛенинградБАМстрой» / Т. Муратова — М.: Издательские решения, 2020. — 472 с.

28. Филимонов Д. С. Применение сейсмоизоляции в зданиях на вечномёрзлых грунтах / Д. С. Филимонов // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования — 2022: сборник докладов Третьей Национальной научной конференции, Москва, 19 декабря 2022 года. — М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2023. — С. 652–657.

Дата поступления: 06.09.2023

Решение о публикации: 23.10.2023

Контактная информация:

ПЕГИН Павел Анатольевич — д-р техн. наук, доц.;
ppavel.khv@gmail.com

ФИЛИМОНОВ Даниил Сергеевич — аспирант;
daniilo.filimonov@yandex.ru

Features of Design and Construction of Buildings in Seismically Hazardous Areas with Permafrost Soils

P. A. Pegin, D. S. Filimonov

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

For citation: Pegin P. A., Filimonov D. S. Features of Design and Construction of Buildings in Seismically Hazardous Areas with Permafrost Soils // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 878–890. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-878-890

Summary

Purpose: Analysis of accumulated experience in the design and construction of buildings in areas with permafrost and seismic activity. **Methods:** Statistical and analytical methods have been applied. **Results:** The areas of distribution of both permafrost soils and seismics on the territory of Russia are considered. The review and analysis of the principles of construction on permafrost soils is given. 2 main methods of preserving the foundation soils in a frozen state using principle I of construction and 3 combined options when pairing a pile foundation with a ventilated underground, filling and cooling devices are considered and analyzed. The conclusion is made about the construction using principle I, where a pile foundation with a high pile grillage and a ventilated underground is preferred as a foundation, since the piles of this foundation act as a flexible connection between the aboveground part of the building and the base. In case of seismic impact, this foundation perceives the action of vertical and horizontal seismic loads, as well as the action of the tipping moment. In the case when it is impossible to keep the foundation in a frozen state under buildings, it is necessary to use principle II, which is implemented due to the coefficient of safety and rigidity of building structures, as well as pre-construction measures aimed at thawing, pre-compaction or partial replacement of natural subsidence soils, increasing the depth of foundation laying or regulation of the thawing zone due to planning decisions or applications of devices for heat removal. It is revealed that spatial foundation platforms are effective earthquake-resistant structures of foundations on permafrost soils using principle II in conditions of seismic activity. The analysis of the design experience on permafrost soils in seismically active areas is carried out. **Practical significance:** It is proposed to use principle I of construction of earthquake-resistant buildings on permafrost soils (in cases where permafrost preservation is possible).

Keywords: Permafrost soils, seismic activity, pile foundation, grillage, ventilated underground, large-panel buildings.

References

1. Ivanova Z. V., Filimonov D. S. Use of earthquake-proof foundations in the design of residential buildings for the areas of the northern climate zone. E3S Web Conf. International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) "Actual Problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution", 2023, Iss. 383, article № 02001. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338302001>.
2. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 16 noyabrya 2021 g. № 1946 "Ob utverzhdenii perechnya rayonov Krajnego Severa i mestnostej, priravnennyh k rayonam Krajnego Severa, v celyah predostavleniya gosudarstvennyh garantij i kompensacij dlya lic, rabotayushchih i prozhivayushchih v etih rayonah i mestnostyah, priznanii utrativshimi silu nekotoryh aktov Pravitel'stva Rossijskoj Federacii i priznanii ne dejstvuyushchimi na territorii Rossijskoj Federacii nekotoryh aktov Soveta Ministrov SSSR"* [Decree of the Government of the Russian Federation of November 16, 2021 № 1946 "On approval of the list of regions of the Far North and localities equated to regions of the Far North, in order to provide state guarantees and compensation for persons work-
- ing and living in these areas and localities, recognition as lost the force of certain acts of the Government of the Russian Federation and the recognition of certain acts of the Council of Ministers of the USSR as invalid on the territory of the Russian Federation"]. (In Russian)
3. SP 25.13330.2020. *Osnovaniya i fundamente na vechnomerzlyh gruntah. Utverzhden prikazom Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Rossijskoj Federacii ot 30 dekabrya 2020 g. № 915/pr.* [SP 25.13330.2020. Foundations and foundations on permafrost soils. Approved by order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 30, 2020 № 915/pr]. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian)
4. Majstruk A. G., Pegin P. A. *Analiz konstrukcii fundamentov, ustraivaemyh na vechnomerzlyh gruntah* [Analysis of the construction of foundations arranged on permafrost soils]. *Zametki uchenogo* [Scientist's notes]. 2021, Iss. 9-1, pp. 31–35. (In Russian)
5. *Rukovodstvo po proektirovaniyu osnovanij i fundamentov na vechnomerzlyh gruntah* [Guidelines for the design of foundations and foundations on permafrost soils]. *III osnovanij*

i podzemnyh, sooruzhenij im. N. M. Gersevanova Gosstroya SSSR [Research Institute of Foundations and underground structures named after N. M. Gersevanov Gosstroy of the USSR]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1980, p. 303. (In Russian)

6. Belash T. A., Sergeev D. A. Sejsmostojkij fundament v rajonah vечноj merzloty [Earthquake-resistant foundation in permafrost areas]. *Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij* [Earthquake-resistant construction. Safety of structures]. 2013, Iss. 6, pp. 40–42. (In Russian)

7. Belash T. A., Sergeev D. A. Realizaciya principa sejsmoizolyacii v zdaniyah na vечноmerzlyh gruntah [Implementation of the principle of seismic isolation in buildings on permafrost]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing construction]. 2016, Iss. 1-2, pp. 47–50. (In Russian)

8. Grib S. I. Proektirovanie svajnyh fundamentov na vечноmerzlyh gruntah v sejsmicheskikh rajonah [Design of pile foundations on permafrost soils in seismic areas]. *Stroitel'stvo v rajonah Vostochnoj Sibiri i Krajnego Severa* [Construction in the regions of Eastern Siberia and the Far North]. 1976, Iss. 38. (In Russian)

9. Belash T. A., Sergeev D. A. O vozmozhnosti ispol'zovaniya vysokogo svajnogo rostverka v kachestve elementa sejsmoizolyacii dlya zdaniy, vozvodimyh v rajonah vечноj merzloty [About the possibility of using a high pile grillage as an element of seismic insulation for buildings erected in permafrost areas]. *Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij* [Earthquake-resistant construction. Safety of structures]. 2015, Iss. 4, pp. 45–47. (In Russian)

10. Belash T. A., Uzdin A. M. Effects of permafrost on earthquake resistance of transport facilities in the Baikal — Amur mainline area. *Transportation Soil Engineering in Cold Regions: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019*. (Series: Lecture Notes in Civil Engineering, volume 49), vol. 1. Singapore: Springer, 2020, pp. 79–95.

11. *Spravochnik po stroitel'stvu na vечноmerzlyh gruntah* [Handbook of construction on permafrost soils]. Leningrad: Stroyizdat Publ., 1997, 552 p. (In Russian)

12. Urmanova A. R. Tekhnologiya termostabilizacii grunta [Technology of thermal stabilization of the soil]. *Alleya nauki* [Alley of Science]. 2018, vol. 8, Iss. 4, pp. 59–63. (In Russian)

13. Lihachev E. S., Molchanov S. A. Metody termostabilizacii vечноmerzlyh gruntov i razrabotka perspektivnyh ustanovok zamorazhivaniya gruntov [Methods of thermal stabilization of permafrost soils and development of advanced soil freezing plants]. *Akademicheskaya publicistika* [Academic journalism]. 2018, Iss. 10, pp. 14–19. (In Russian)

14. Konstantinov M. D. Vidy termostabilizacii mnogoletnemerzlyh gruntov i osobennosti ih primeneniya [Types of thermal stabilization of permafrost soils and features of their application]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie* [Science, technology and education]. 2020, Iss. 4, pp. 67–71. (In Russian)

15. Ermilova N. U., Zhuravlev A. V., Tyan V. U. Termostabilizaciya mnogoletnemerzlyh gruntov: tekhnologii i oborudovanie [Thermal stabilization of permafrost soils: technologies and equipment]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2021, Iss. 5, pp. 424–432. (In Russian)

16. Sakharov I. I. Modern approaches to the design of bases and foundations at permafrost zone sites with account for the effects of global warming. *E3S Web Conf. International Scientific Conference “Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East” (AFE-2022)*, 2023, Iss. 371, article № 02031. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337102031>.

17. Ohlopkova T. V., Gur'yanov G. R., Plotnikov A. A. Stroitel'stvo i proektirovanie zdaniy i sooruzhenij v usloviyah vечноj merzloty [Construction and design of buildings and structures in permafrost conditions]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2018, Iss. 4, pp. 184–196. (In Russian)

18. Kudryavcev S. A., Saharov I. I., Paramonov V. N. *Promerzanie i ottaivanie gruntov (prakticheskie primery i konechnoelementnye raschety): kniga dlya rabotnikov nauchno-issledovatel'skih i proektnyh organizacij, prepodavatelej, aspirantov i studentov stroitel'nyh i transportnyh vuzov* [Freezing and thawing of soils (practical examples and finite element calculations): a book for employees of research and design organizations, teachers, graduate students and students of construction and transport universities]. Saint Petersburg: gruppa kompanij “Georekonstrukciya” Publ., 2014, 247 p. (In Russian)

19. Abovsky N. P., Abovskaya S. N., Matyushenko V. A. et al. *Sbornaya prostranstvennaya zhelezobonnaya fundamentnaya platforma dlya stroitel'stva mnogoetazhnykh zdaniy v osobykh gruntovykh usloviyakh i seysmichnosti* [Prefabricated spatial reinforced concrete foundation platform for the construction of multi-storey buildings in special ground conditions and seismicity]. Patent RF, no. 38789, 2004. (In Russian)
20. Abovsky N. P., Sapkalov V. I., Sidelev V. A. *Monolitnaya prostranstvennaya fundamentnaya platforma* [Monolithic spatial foundation platform]. Patent RF, no. 45410, 2005. (In Russian)
21. Sidelev V. A., Abovsky N. P., Popovich A. P. et al. *Prostranstvennaya zhelezobonnaya fundamentnaya platforma dlya maloetazhnykh zdaniy dlya stroitel'stva v osobykh gruntovykh usloviyakh i seysmichnosti v sbornom i monolitnom variantakh* [Spatial reinforced concrete foundation platform for low-rise buildings for construction in special ground conditions and seismicity in prefabricated and monolithic]. Patent RF, no. 55388, 2006. (In Russian)
22. Belash T. A., Ivanova T. V. Earthquake resistance of buildings on thawing permafrost grounds. Magazine of civil engineering, 2020, Iss. 1 (93). DOI: 10.18720/MCE.93.5.
23. Gruzkov A. A., Solyannik P. E., Vernin N. A. Prostranstvennye platformy kak effektivnye i ekonomichnye fundamenty dlya zdaniy v slozhnykh gruntovykh usloviyakh i seysmichnosti stroitel'nykh ploshchadok [Spatial platforms as effective and economical foundations for buildings in difficult ground conditions and seismicity of construction sites]. *Innovacii i investicii* [Innovations and investments]. 2020, Iss. 5, pp. 207–211. (In Russian)
24. Ibragimov E. V. *Optimizatsiya ustroystva osnovaniy i fundamentov v kriolitozone s ispol'zovaniem termostabilizatsii gruntov: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Optimization of the construction of bases and foundations in the permafrost zone using thermal stabilization of soils: diss. ...Cand. Tech. Sciences]. Moscow, 2020, 30 p. (In Russian)
25. Nikitenko A. V., Vyrodova I. G. Ustroystvo fundamentov v rajonah vечноy merzloty [The construction of foundations in permafrost areas]. *Sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Ekologicheskie, inzhenerno-ekonomicheskie, pravovye i upravlencheskie aspekty razvitiya stroitel'stva i transportnoj infrastruktury"* [Collection of articles of the International scientific and practical Conference "Environmental, engineering, economic, legal and managerial aspects of the development of construction and transport infrastructure"]. 2017, pp. 183–185. (In Russian)
26. Belash T. A., Zenchenkova D. V. Sejsmostojkie konstrukcii krupnopanel'nykh zdaniy [Earthquake-resistant structures of large-panel buildings]. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo* [Architecture and construction]. 2019, Iss. 3, pp. 130–137. (In Russian)
27. Muratova T. *Severobajkal'sk — leningradskij gorod na BAME. CHast' I. Kniga o stroitelyah PMK "LeningradBAMstroj"* [Severobaikalsk — Leningrad city on the Baikal-Amur mainline. Part 1. The book about the builders of PMK "Leningradbamstroy"]. Moscow: *Izdatel'skie resheniya* Publ., 2020, 472 p. (In Russian)
28. Filimonov D. S. Primenenie sejsmoizolyacii v zdaniyakh na vechnomerzlykh gruntah [The use of seismic insulation in buildings on permafrost soils]. *Aktual'nye problemy stroitel'noj otrasli i obrazovaniya — 2022: sbornik dokladov Tret'ej Nacional'noj nauchnoj konferencii, Moskva, 19 dekabrya 2022 goda. Nacional'nyj issledovatel'skij Moskovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet* [Actual problems of the construction industry and education — 2022: Collection of reports of the Third National Scientific Conference, Moscow, December 19, 2022. National Research Moscow State University of Civil Engineering]. Moscow, 2023, pp. 652–657. (In Russian)

Received: September 06, 2023

Accepted: October 23, 2023

Author's information:

Pavel A. PEGIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; ppavel.khv@gmail.com

Daniil S. FILIMONOV — Postgraduate Student; daniilo.filimonov@yandex.ru



УДК 628.81:629.48

Результаты моделирования смешанной конвекции для оценки целесообразности использования тепловых пушек в обогреве сварочного поста локомотивного депо

И. Г. Киселев, М. Ю. Кудрин, С. Б. Комиссаров, Д. Я. Монастырский

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

Для цитирования: Киселев И. Г., Кудрин М. Ю., Комиссаров С. Б., Монастырский Д. Я. Результаты моделирования смешанной конвекции для оценки целесообразности применения тепловых пушек в обогреве сварочного поста локомотивного депо // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 891–901. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-891-901

Аннотация

Цель: Численное исследование процесса смешанной конвекции с целью оценки возможности применения тепловых пушек для локального обогрева сварочных постов локомотивных депо при наличии системы механической локализирующей вентиляции. **Методы:** Исследование проведено при помощи метода конечных разностей в программном комплексе COMSOL Multiphysics с постановкой задачи смешанной конвекции и приведением области расчета к двумерной плоскости. **Результаты:** В результате исследования получены температурные поля и карты скоростей для рабочих мест при различных условиях и положениях тепловой пушки. Анализ результатов позволил предложить варианты использования тепловых пушек и места их установки, а также уточнить воздействие их работы на микроклимат рабочей зоны. Определены условия, в которых применение тепловых пушек целесообразно и безопасно. **Практическая значимость:** Полученные в ходе исследования результаты могут быть использованы для организации или оптимизации систем местного отопления сварочных постов локомотивных депо, а также схожих по устройству рабочих мест.

Ключевые слова: Местная вентиляция, системы теплоснабжения, воздушное отопление, организация сварочных постов, локомотивное депо.

Введение

Известно, что при организации системы отопления крупных производственных объектов возникают затруднения в области обеспечения оптимального температурного режима на рабочих местах в больших по объему помещениях. К таким помещениям в том числе относятся

сварочные посты локомотивных депо, вагоноремонтных и вагоностроительных предприятий.

Наиболее распространенными технологическими способами при восстановлении изношенных деталей и узлов локомотивов и вагонов являются сварка и наплавка. Оба способа сопровождаются интенсивным выделением

пыли, газов, теплоты и токсичных паров. Объем выделяемых вредностей зависит от количества используемых сварочных материалов, но применение локализирующей вентиляции позволяет значительно снизить уровень воздействия вредных веществ на организм человека. При этом обеспечение допустимых параметров микроклимата на рабочих местах, в больших по объему помещениях, как правило, сопровождается рядом сложностей. К ним относятся обеспечение кратности требуемого воздухообмена и ограничение скорости воздуха в рабочей зоне не более 0,9 м/с. При этом используемое инженерное оборудование должно поддерживать концентрацию вредных примесей в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.005—88, а содержание посторонних элементов в воздухе рабочей зоны на расстоянии 4 м от места проведения работ не должно превышать предельные допустимые концентрации.

Основные геометрические характеристики помещений и особенности технологических процессов в локомотивных депо привели к распространению потолочного и воздушного отопления [1–4]. Описанные выше требования безопасности не позволяют организовать отопление непосредственно над сварочным постом, что понижает тепловой комфорт сварщика. Подобные затруднения также наблюдаются на других рабочих местах производственных и вспомогательных помещений локомотивного депо.

Санитарные нормы допускают возможность поддерживать температуру рабочего места на минимальной отметке [5]. Однако нахождение персонала в течение рабочего дня при пониженной температуре может оказывать негативное влияние на общее состояние человека, на его внимательность и самочувствие, что, в свою очередь, сказывается на производительности и безопасности труда [6].

Для обеспечения оптимального температурного режима на рабочих местах, в соответствии

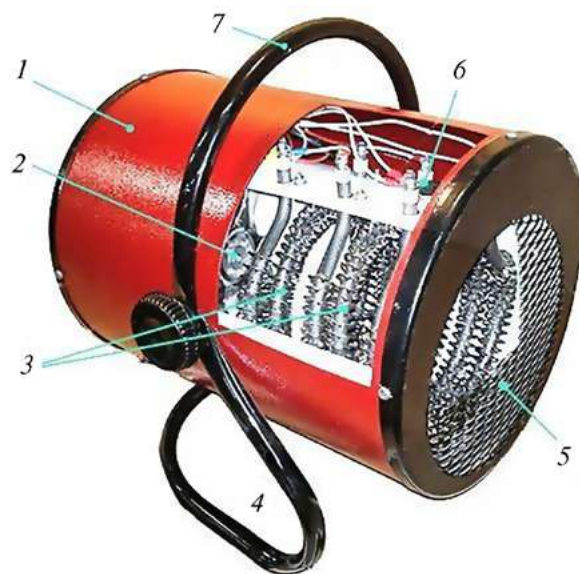


Рис. 1. Состав тепловой пушки:
1 — корпус; 2 — осевой вентилятор;
3 — электронагревательный элемент;
4 — стойка; 5 — металлическая
фильтровальная сетка; 6 — блок
управления; 7 — ручка для
транспортировки

с требованиями безопасности, широко используются локальные системы отопления. Одним из наиболее распространенных вариантов является установка тепловых пушек. Исходя из удобства монтажа и обслуживания, наибольшее распространение получили портативные электрические тепловые пушки с принудительным обдувом [7].

Конструктивные особенности тепловой пушки, представленной на рис. 1, гарантируют эффективность ее работы в замкнутых областях [8], однако проблема использования подобных устройств в больших по объему помещениях для обогрева рабочих мест, особенно с учетом наличия в рабочей зоне локализирующей вытяжной вентиляции, остается малоизученной.

Электрические тепловые пушки подключаются к сети 220 В и не требуют дополнительного или вспомогательного оборудования, не выбрасывают в окружающую среду продукты сгорания топлива и просты в эксплуатации. Для нагрева воздуха в качестве нагревательного элемента применя-

ются открытые спирали, керамические пластины, игольчатые (СТИЧ) и трубчатые (ТЭН) электронагреватели. Наиболее распространены модели с открытыми спиралями и ТЭНами (рис. 1).

Мощность доступных в широком обращении бытовых тепловых пушек редко превышает 5 кВт. Обычно у тепловых пушек три режима, переключаемые с помощью механического термостата — режим полной нагрузки, половины нагрузки и без нагрузки. В последнем варианте тепловая пушка работает как вентилятор без подогрева воздуха. Тепловые пушки в базовой комплектации устанавливаются на горизонтальных поверхностях в непосредственной близости к рабочему месту.

Постановка задачи

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования температурного режима и поля скоростей движения вентилируемого воздуха в рабочей зоне производственного цеха крупного промышленного предприятия. Моделирование проводилось с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics.

Целью работы является численное исследование процесса смешанной конвекции с целью оценки эффективности применения тепловых пушек для локального обогрева рабочих зон крупного производственного объекта при наличии системы локализирующей вентиляции. Полное моделирование всего производственного помещения нецелесообразно из-за несоразмерности здания и исследуемой зоны [9]. В данном случае достаточным условием является выделение рабочей зоны и задание корректных граничных условий. Однако для подобной зоны возникает проблема описания полости, в которой рассматриваются тепломассообменные процессы, так как она не представляет собой замкнутую геометрическую фигуру.

В задаче исследуются распределения тепловых потоков в рабочей зоне при стационарном режиме.

Уровень чистого пола в зоне неизменен. Постановка задачи подразумевает, что подаваемый тепловой пушкой нагретый воздух с относительно высокой скоростью распространяется вдоль нижней границы зоны, а в горизонтальном направлении движение воздуха более интенсивно, чем в вертикальном. Ввиду сложной геометрии зоны, для упрощения постановки краевой задачи и анализа результатов, принято решение о приведении области расчета к двумерной плоскости с рассмотрением двухмерного температурного поля.

Протяженность всех границ исследуемой области принята $l = 2$ м. Исследуемая плоскость приводится к прямоугольному виду, а в исследуемую область попадет только непосредственно зона возможного нахождения людей. Таким образом, задача сводится к моделированию турбулентного течения в кубоиде с двумя открытыми гранями в двумерном приближении. Область решения и граничные условия представлены на рис. 2.

Предполагается, что в рабочей зоне и на ее границах к моменту начала исследования устанавливается температурный режим, а теплофизические свойства среды (воздуха) линейны и не зависят от температуры. Воздух принят вязкой и теплопроводной жидкостью, удовлетворяющей приближению Буссинеска. Скорость движения воздуха варьируется в пределах от 0,2 до 0,5 м/с. Расчет ведется с учетом наиболее холодной температуры в климатической зоне, где расположено здание цеха (Ленинградская область). Начальные условия для исследуемой среды представлены в таблице.

При моделировании использовалась полуэмпирическая модель турбулентности Уилкокса, также известная как модель $k-\omega$ (кей-омега), исходя из ее оптимальности для моделирования протекания воздуха вдоль сильно искривленных границ [10]. Другим важным элементом модели является возможность учесть тепловые эффекты при турбулентном движении потоков воздуха. Модель Уилкокса основана на модели переноса

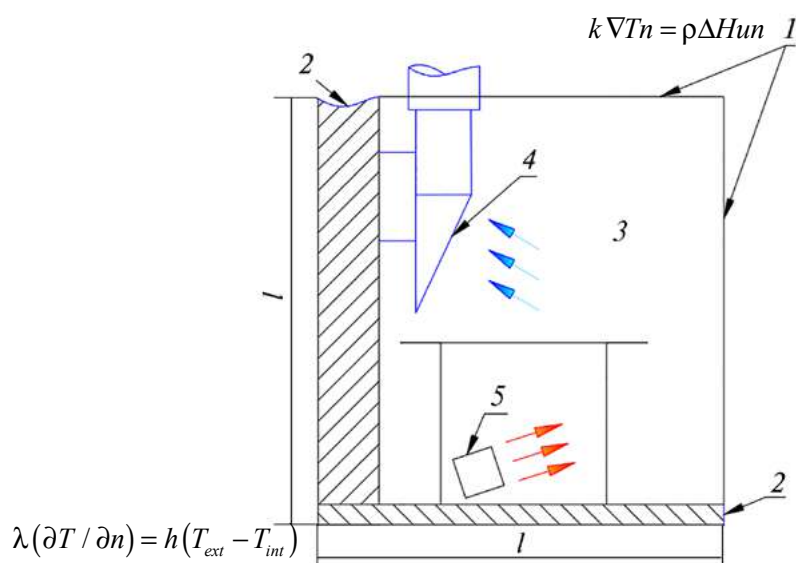


Рис. 2. Область решения:

1 — граница контакта воздуха области с внешним объемом воздуха; 2 — теплопроводная утепленная стена помещения; 3 — воздушная среда; 4 — вытяжная панель; 5 — тепловая пушка

Начальные условия для исследуемой среды

Начальные условия		
Величина	Единицы измерения	Значение
Давление, P	Па	101 325
Температура воздуха в помещении, T _{int}	К	291,15
Температура наружного воздуха, T _{ext}	К	247,15
Коэф. теплопередачи, h ₁ (стена)	Вт/(м ² · град)	0,6
Коэф. теплопередачи, h ₂ (пол)	Вт/(м ² · град)	0,49
Расход воздуха через вытяжную панель	м ³ /ч	2550
Ширина панели	м	0,9
Высота панели	м	0,585
Подача тепловой пушки	м ³ /ч	200–300
Диаметр тепловой пушки	м	0,2
Температура воздуха, подаваемого тепловой пушкой	К	303,15

кинетической энергии с учетом удельной диссипации, то есть перехода кинетической энергии турбулентного (вихревого) потока во внутреннюю энергию потока газа:

$$\varepsilon = C_{\mu} k \omega, \quad (1)$$

где ε — внутренняя энергия потока;

C_{μ} — коэффициент турбулентной вязкости;

k — кинетическая энергия;

ω — удельная диссипация, 1/с.

Подход Уилкокса позволяет рассмотреть процессы турбулентности в очень малых масштабах длины с учетом процессов, в результате которых кинетическая энергия завихрений переходит от больших вихрей к меньшим вихрям.

Условие термической изоляции задается как условие отсутствия потока теплоты через поверх-

ность (нулевой кондуктивный поток); аналогичным образом задаются границы, где возможна утечка теплоты вместе со воздушной средой:

$$-nq = 0, \quad (2)$$

где q — тепловой поток через твердую стенку, вычисляемый на основе моделирования, Вт/м²;
 n — направление потока.

Окончательное уравнение по модели k - ω , описывающее передачу теплоты в воздухе рабочей зоны, примет вид:

$$\begin{aligned} d_z \rho c_p u \nabla T_2 + \nabla q &= d_z Q + q_0 + d_z Q_p + d_z Q_{vd}; \\ q &= -d_z k_b \nabla T_2; \quad -nq = d_z q_0, \end{aligned} \quad (3)$$

где T_2 — заданная температура среды;
 ρ — плотность воздуха, кг/м³;
 c_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении, Дж/(кг · К);
 u — скорость, м/с;
 ∇ — градиент;
 d_z — толщина слоя потока, м;
 q_0 — тепловой поток от электронагревателя тепловой пушки, Вт/м²;
 k_b — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м · К);
 Q_{vd} — вязкая диссипация Вт/м³;
 Q — объемные тепловыделения от источника, Вт/м³.

Из уравнения (3) определим граничные условия для исследуемой области:

– потери теплоты через границу твердой стенки с условием нулевой скорости воздуха на границе:

$$q_0 = h(T_2 - T_{int}), \quad (4)$$

где h — коэффициент теплопередачи, Вт/(м² · К);
 $(T_{ext} - T_{int})$ — разность между температурой внутри и снаружи помещения;

– потери теплоты через границу соприкосновения воздуха исследуемой области с внешним объемом воздуха остального помещения при отсутствии фазового перехода и свободным течением воздуха на границе:

$$k \nabla T n = \rho \Delta H u n, \quad (5)$$

где ΔH — характеристика процесса, изменение энтальпии вещества при изменении температуры без совершения веществом фазового перехода.

Итоговая система уравнений по модели Уилкокса, описывающая характер движения воздуха в зоне с учетом диссипации и влияния гравитации на перемешивание потоков:

$$\begin{aligned} \rho(u_2 \nabla) u_2 &= \nabla[-p_2 l + K] + F + \rho g; \\ \nabla(\rho u_2) &= 0; \\ K &= (\mu + \mu_T) \left(\nabla_{u_2} + (\nabla_{u_2})^T \right) - \\ &\quad - \frac{2}{3} (\mu + \mu_T) (\nabla u_2) l - \frac{2}{3} \rho k_2 l; \\ \rho(u_2 \nabla) k_2 &= \nabla \left[(\mu + \mu_T \sigma_k^*) \nabla_{k_2} \right] + p_k - \beta_0^* \rho \omega k_2; \\ \rho(u_2 \nabla) \omega &= \nabla \left[(\mu + \mu_T \sigma_\omega^*) \nabla_\omega \right] + \\ &\quad + \alpha \frac{\omega}{k_2} P_k - \rho \beta_0 \omega^2, \end{aligned} \quad (6)$$

где μ_T — турбулентная вихревая вязкость, Па · с;
 l — турбулентная длина, связанная с шириной области перемешивания потоков воздуха;
 F — сила Архимеда, Н/м³; также в уравнении представлен ряд вспомогательных числовых констант [11].

Исследование проводится при помощи метода конечных разностей. Одна из основных про-

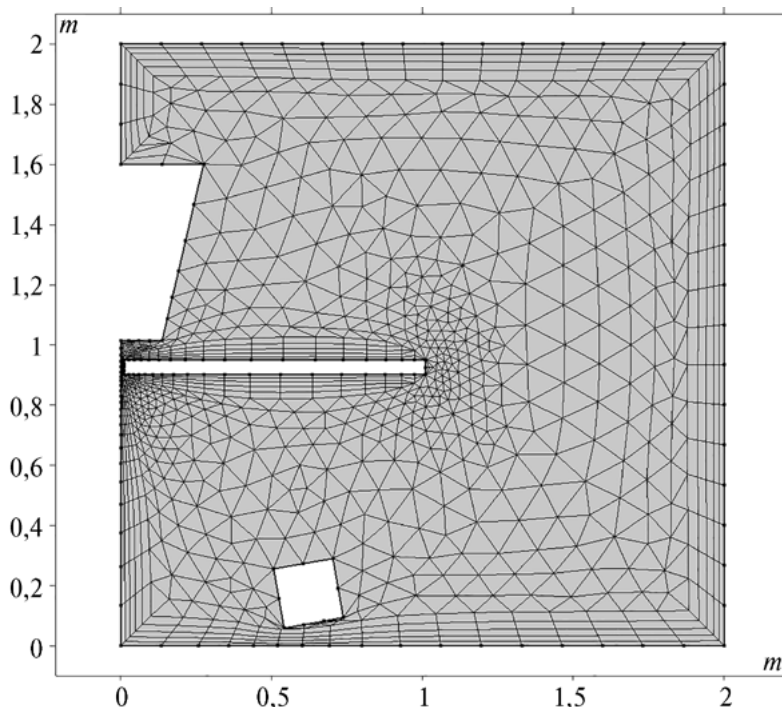


Рис. 3. Расчетная сетка области решения

блем при исследовании подобных областей — составление расчетной сетки. При исследовании смешанной конвекции слишком крупная сетка приводит к искажению результатов, особенно в областях обтекания потоком препятствий и в областях столкновения с жесткими стенками. Также необходимо минимизировать количество ячеек со слишком большим соотношением площадей граней. Слишком мелкая сетка, несмотря на повышение точности вычислений, многократно увеличивает время расчета. Подобранная сетка, разбивающая зону на области треугольной формы, отличается крупными ячейками в основной области и в местах подачи и вытяжки воздуха, но имеет более мелкую сетку в областях сужения и рядом с объектами, обтекаемыми быстрыми струями воздуха.

Результаты

В результате моделирования была проверена эффективность использования тепловой пушки при включенной системе локализующей вентиляции и при различных ее положениях относи-

тельно рабочего места. На рис. 4, *а* представлено поле скоростей вентиляционного воздуха при одновременной работе тепловой пушки, установленной на полу, и активированной панели локализующей вентиляции. На рис. 4, *б* приведено поле скоростей при тех же условиях, но с деактивированной системой локализующей вентиляции. На рисунках заметны следы закольцованности воздушных потоков в области работы тепловой пушки, а также увеличение скорости потоков в области контакта воздушного потока и ограничивающей поверхности с образованием воздушного «факела» непосредственно в области предполагаемого присутствия человека.

Поведение воздушных потоков отражается на распределении температур в исследуемой области (рис. 5). На полученном графике заметно, что при совместном действии тепловой пушки и работающей локализующей вентиляции создается более равномерное температурное поле (рис 5, *а*), которое находится в прямой зависимости от конфигурации рабочего места и места расположения тепловой пушки. Стоит отметить, что

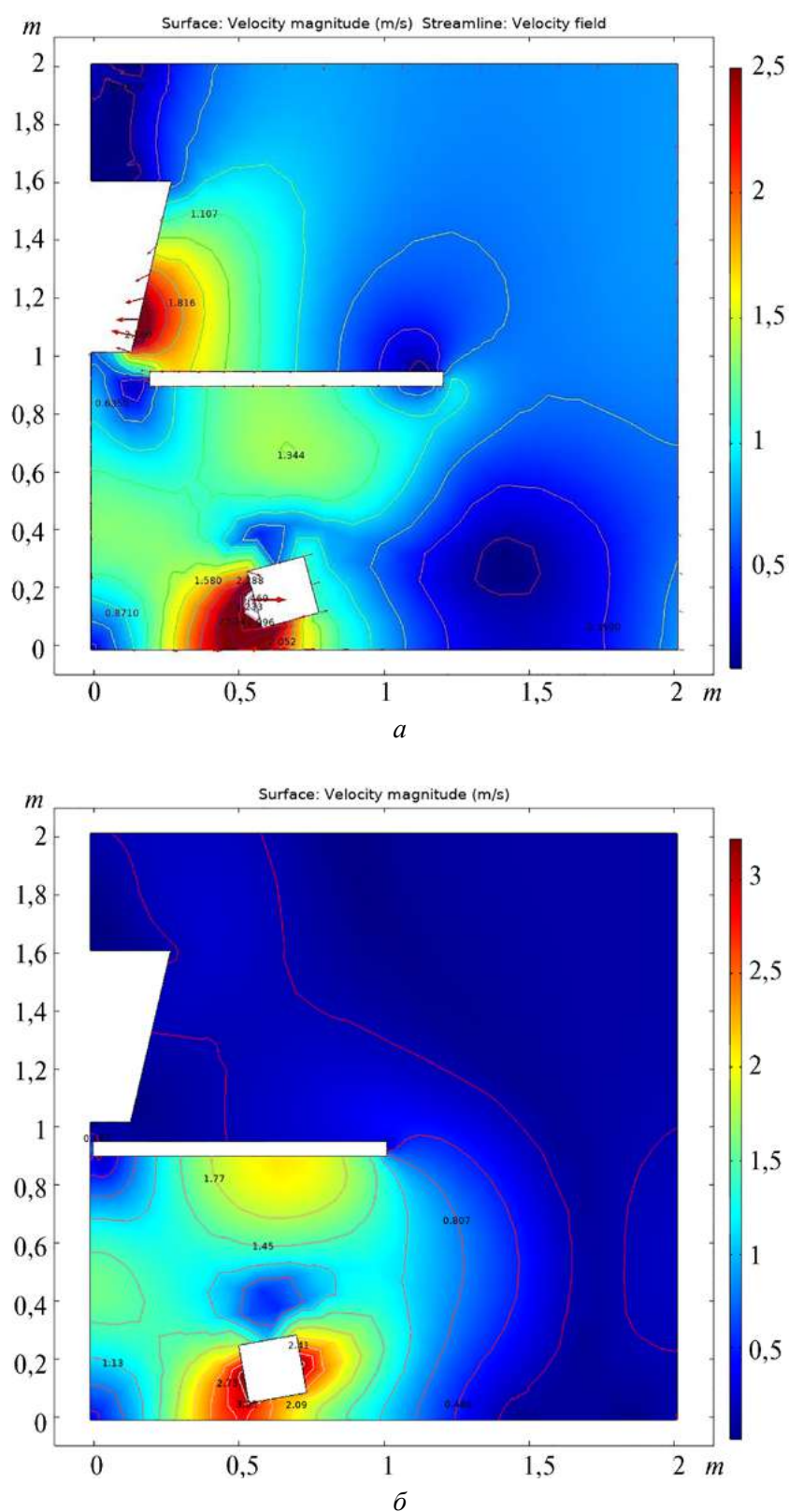


Рис 4. Поля скоростей:

a — с активированным локальным вытяжным устройством вентиляции;
 b — с отключенным локальным вытяжным устройством вентиляции

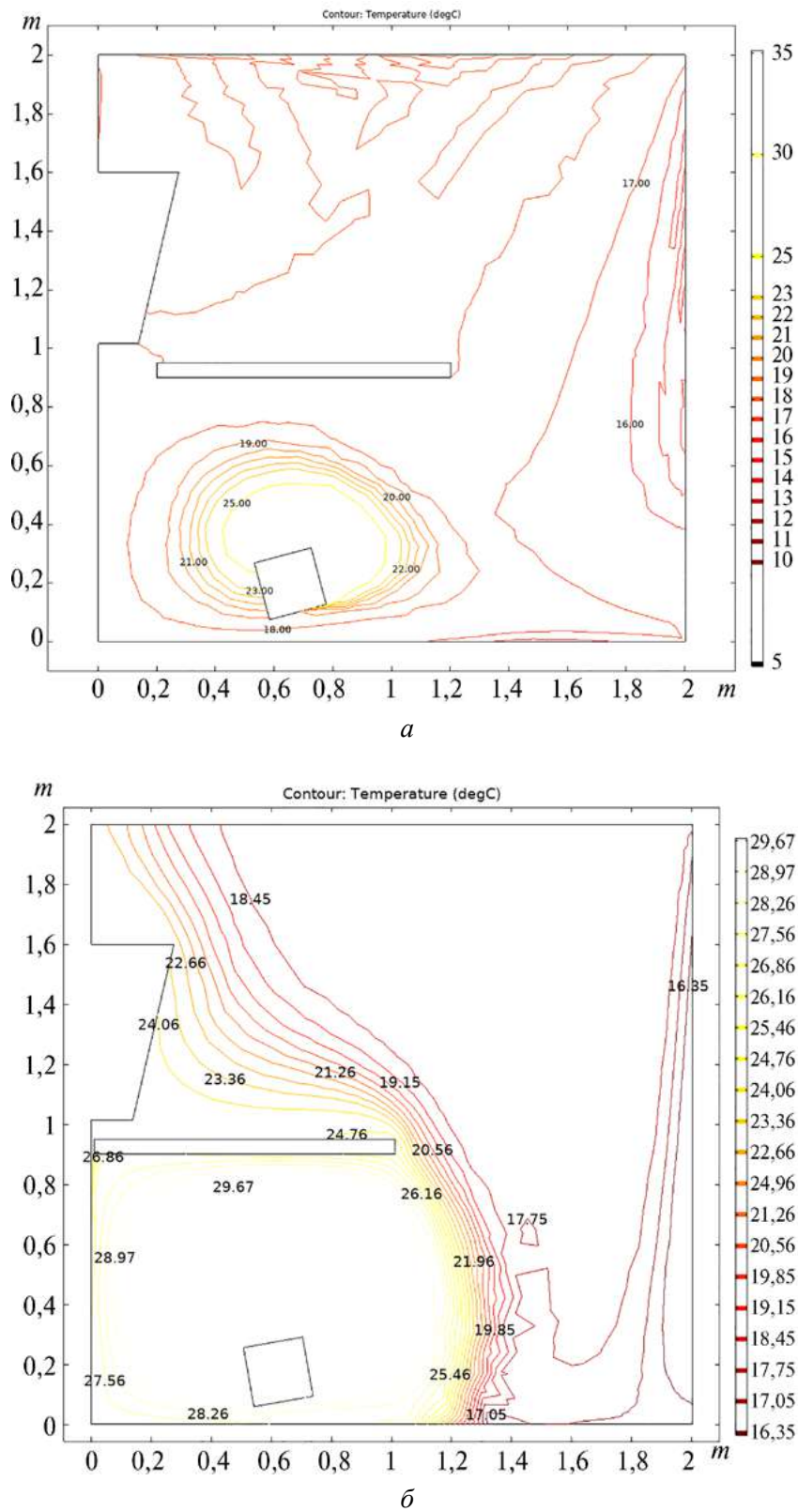


Рис. 5. Поля температур в рабочей зоне:

a — с активированной системой локализирующей вентиляции;

б — с деактивированной системой локализирующей вентиляции

в симуляциях предполагается, что нагреватель установлен под потенциальным рабочим местом. Рис. 5, б показывает, что использование тепловой пушки при неактивной локализирующей вентиляции создает зону повышенной температуры, ограниченную в верхней части препятствием — рабочим столом, который не позволяет нагретому воздуху подниматься и ассимилироваться с воздухом в помещении. При скоростях воздушных потоков до 0,5 м/с воздух в нижней зоне нагревается заметно выше и «факел» становится более заметным.

Выводы

1. Проведенное моделирование показало целесообразность применения электрических тепловых пушек для организации местной системы отопления и поддержания теплового комфорта в рабочих зонах локомотивного депо. Использование предлагаемой схемы позволяет обеспечивать нормативный воздухообмен при соблюдении комфортной температуры на участках в зоне предполагаемого нахождения человека.

2. Эффективность применения тепловой пушки в рассматриваемой схеме в большей степени зависит от организации воздухообмена и от геометрии помещения.

3. Обнаруженная тенденция к возникновению «факела» делает нежелательной установку тепловых пушек непосредственно под зонами проведения сварочных и других работ с установленными требованиями по воздухообмену и режиму скорости воздушных потоков.

4. Возможность образования локальных зон с повышенной температурой воздуха исключает возможность использования тепловых пушек вблизи от аэрозольных баллонов, емкостей с топливом и других взрыво- и пожароопасных объектов.

Библиографический список

1. Гильдебрандт А. А. Установки для обогрева помещений / А. А. Гильдебрандт, Р. Р. Зайнагабдинов, С. С. Воротилин // *Аллея науки*. — 2020. — Т. 1. — № 8. — С. 199–202.
2. Яковлев П. П. Влияние отопительных приборов на параметры микроклимата помещений / П. П. Яковлев, Е. А. Горбанева, Ю. А. Аляутдинова // *Вестник АГТУ*. — 2009. — № 1(48). — С. 19–21.
3. Михайлов Ф. С. Отопление и основы вентиляции: учебное пособие для техникумов / Ф. С. Михайлов. — М: Стройиздат, 1972. — 410 с.
4. Батурин В. В. Основы промышленной вентиляции / В. В. Батурин. — М.: Профиздат, 1990. — 448 с.
5. Кожевникова Н. Ю. Температура воздушной среды производственных помещений как вредный фактор условий труда / Н. Ю. Кожевникова // *Аграрное образование и наука*. — 2016. — № 6. — С. 3.
6. Васильев А. В. Влияние микроклимата на производительность труда рабочих в РМЦ / А. В. Васильев, Е. П. Одноров // *Молодой ученый*. — 2015. — № 1(105). — С. 138–141.
7. Лосев Д. П. Все о воздушном отоплении / Лосев Д. П. // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. — 2010. — № 7. — С. 50–52.
8. Корохова Е. Моделирование и алгоритмизация процедуры выбора автономной теплогенерирующей системы / Е. В. Корохова, И. С. Шабаршина, А. В. Петракова и др. // *Изв. ЮФУ. Техн. науки*. — 2015. — № 3(164). — С. 70–83.
9. Белостоцкий А. М. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства / А. М. Белостоцкий, П. П. Акимов, И. Н. Афанасьева. — М.: АСВ, 2017. — 720 с.
10. Teodosiu C. Appropriate CFD turbulence model for improving indoor air quality of ventilated

spaces / C. Teodosiu, V. Ilie, R. Teodosiu // *Mathematical Modeling in Civil Engineering*. — 2014. — Iss. 4. — Pp. 28–42.

11. Молчанов А. М. Математическое моделирование задач газодинамики и тепломассообмена / А. М. Молчанов. — М.: МАИ, 2013. — 208 с.

Дата поступления: 27.07.2023

Решение о публикации: 29.09.2023

Контактная информация:

КИСЕЛЕВ Игорь Георгиевич — д-р техн. наук, проф.;
toe@pgups.ru

КУДРИН Михаил Юрьевич — канд. техн. наук, доц.;
toe@pgups.ru

КОМИССАРОВ Сергей Борисович — канд. техн. наук,
доц.; s.b.komissarov@gmail.com

МОНАСТЫРСКИЙ Дмитрий Ярославович —
аспирант; monastyrskiy.dy@mail.ru

Results of Mixed Convection Modeling to Assess the Feasibility of Using Jet Heaters by the Heating of Locomotive Depot Welding Stations

I. G. Kiselev, M. Yu. Kudrin, S. B. Komissarov, D. Ya. Monastyrsky

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

For citation: Kiselev I. G., Kudrin M. Yu., Komissarov S. B., Monastyrsky D. Ya. Results of Mixed Convection Modeling to Assess the Feasibility of Using Jet Heaters by the Heating of Locomotive Depot Welding Stations // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 891–901. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-891-901

Summary

Purpose: Numerical investigation of mixed convection processes to assess the feasibility of using jet heaters for local heating in locomotive depot welding stations with a mechanical localized ventilation system. **Methods:** The research has been conducted using the finite difference method in the COMSOL Multiphysics software, with the problem of mixed convection formulated and the calculation domain reduced to a two-dimensional plane. **Results:** Temperature fields and velocity maps have been obtained for the workstations under various conditions and positions of the jet heater. The analysis of the results has allowed us to propose options for using jet heaters and their installation locations, as well as to refine the impact of their impact on the microclimate of the workstation. The conditions under which the use of jet heaters is both practical and safe have been determined. **Practical significance:** The results obtained during the study can be used for the organization or optimization of local heating systems for welding stations in locomotive depots, as well as for similar workplace arrangements.

Keywords: Local ventilation, heating systems, air heating, organization of welding stations, locomotive depot.

References

1. Gil'debrandt A. A., Zainagabdinov R. R., Vorotilin S. S. Ustanovki dlya obogreva pomeshcheniy [Installations for heating premises]. *Alleya nauki* [Alley of Science]. 2020, vol. 1, Iss. 8, pp. 199–202. (In Russian)

2. Yakovlev P. P., Gorbaneva E. A., Alyautdinova Yu. A. Vliyanie otopitel'nykh priborov na parametry mikroklimata pomeshcheniy [Influence of heating devices on the parameters of the microclimate of premises]. *Vestnik AGTU* [Bulletin of AGTU]. 2009, Iss. 1(48), pp. 19–21. (In Russian)

3. Mikhailov F. S. *Otoplenie i osnovy ventiljacii: uchebnoe posobie dlya tekhnikumov* [Heating and basics of ventilation: a textbook for technical schools]. Moscow: Strojizdat Publ., 1972, 410 p. (In Russian)
 4. Baturin V. V. *Osnovy promyshlennoj ventiljacii* [Basics of industrial ventilation]. Moscow: Profizdat Publ., 1990, 448 p. (In Russian)
 5. Kozhevnikova N. Yu. Temperatura vozdukhov sredy proizvodstvennykh pomeshchenij kak vrednyj faktor uslovij truda [Air temperature of production premises as a harmful factor of working conditions]. *Agrarnoe obrazovanie i nauka* [Agricultural education and science]. 2016, Iss. 6, p. 3. (In Russian)
 6. Vasil'ev A. V., Odnovorov E. P. Vliyanie mikroklimata na proizvoditel'nost' truda rabochikh v RMC [Influence of microclimate on the labor productivity of workers in RMC]. *Molodoj uchenyj* [Young Scientist]. 2015, Iss. 1(105), pp. 138–141. (In Russian)
 7. Losev D. P. Vse o vozduhnom otoplenii [All about air heating]. *Santekhnika, otoplenie, kondicionirovanie* [Plumbing, heating, air conditioning]. 2010, Iss. 7, pp. 50–52. (In Russian)
 8. Korokhova E., Shabarshina I. S., Petrakova A. V. et al. Modelirovanie i algoritimizaciya procedury vybora avtonomnoj teplogeneriruyushchej sistemy [Modeling and algorithmization of the procedure for choosing an autonomous heat-generating system]. *Izv. YUFU. Tehn. nauki* [Bulletin of SFU. Technical Sciences]. 2015, Iss. 3(164), pp. 70–83. (In Russian)
 9. Belostockij A. M., Akimov P. P., Afanas'eva I. N. *Vychislitel'naya aerodinamika v zadachakh stroitel'stva* [Computational aerodynamics in construction tasks]. Moscow: ASV Publ., 2017, 720 p. (In Russian)
 10. Teodosiu C., Ilie V., Teodosiu R. Appropriate CFD turbulence model for improving indoor air quality of ventilated spaces. *Mathematical Modeling in Civil Engineering*. 2014, Iss. 4, pp. 28–42.
 11. Molchanov A. M. *Matematicheskoe modelirovanie zadach gazodinamiki i teploobmena* [Mathematical modeling of gas dynamics and heat transfer problems]. Moscow: MAI Publ., 2013, 208 p. (In Russian)
- Received: July 27, 2023
Accepted: September 29, 2023
- Author's Information:**
Igor G. KISELEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; toe@pgups.ru
Mikhail Yu. KUDRIN — PhD in Engineering, Associate Professor; toe@pgups.ru
Sergei B. KOMISSAROV — PhD in Engineering, Associate Professor; s.b.komissarov@gmail.com
Dmitry Ya. MONASTYRSKY — Postgraduate Student; monastyrskiy.dy@mail.ru

УДК 62-144.3+62-621.2

Исследование процесса впуска в газовых двигателях с внешним смесеобразованием

А. Л. Пенкин¹, А. А. Воробьев², А. А. Соболев², С. А. Метлякова²,
Д. Р. Ведерникова¹

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

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

Для цитирования: Пенкин А. Л., Воробьев А. А., Соболев А. А., Метлякова С. А., Ведерникова Д. Р. Исследование процесса впуска в газовых двигателях с внешним смесеобразованием // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 902–908. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-902-908

Аннотация

Цель: Обозначить существующие проблемы, а именно низкую однородность топливовоздушной смеси и потери топлива при перекрытии клапанов, и преимущества центральной подачи топлива, а именно ее относительную простоту настройки и расположения газовых форсунок, и ее основные отличия от распределенной подачи. Обозначить существующие способы решения указанных проблем. Показать неэкологичность и неэкономичность применения центральной подачи. Рассчитать количество топлива, попадающего в выпускную систему двигателя при перекрытии клапанов. Показать пути повышения полноты использования топлива в процессе работы двигателя. **Методы:** Расчет массы природного газа, попадающего в выпускную систему двигателя в период перекрытия клапанов, с учетом длительности периода, площади сечения клапанной щели, общего количества топлива, поданного в процессе такта впуска, плотности топлива, скорости потока при попадании в цилиндр и стехиометрического соотношения. **Результаты:** Показана необходимость учета количества топлива, потребляемого при работе газового двигателя. Указаны существующие проблемы применения центральной подачи топлива. Сформулирован и обоснован способ расчета потерь газового топлива при перекрытии клапанов. Установлено, какие параметры оказывают влияние на массу топлива, не попавшего в цилиндр в процессе впуска. Сделан вывод о необходимости применения иных способов подачи либо значительного усовершенствования процесса впуска при центральной подаче. **Практическая значимость:** Показано влияние способа подачи топлива в газовый двигатель внутреннего сгорания на экологичность работы двигателя и эффективность использования топлива. Сформулирован способ расчета потерь газового топлива в период перекрытия клапанов с учетом конструктивных параметров системы впуска и длительности открытия впускных клапанов.

Ключевые слова: Газовый двигатель, газодизельный двигатель, природный газ, однородность газовой смеси, газозавоздушная смесь, аккумуляция топлива.

Введение

В современных газовых и газодизельных двигателях в основном применяются два способа подачи топлива: центральная или распределенная. При центральной подаче газ подается в поток воздуха во впускном трубопроводе задолго до его попадания в цилиндр. Распределенная подача предполагает впрыск топлива на ближайшем возможном расстоянии от впускного клапана (например, во впускной коллектор или во впускной канал), при этом топливо подается в строго необходимом для одного цилиндра количестве. В настоящее время центральная подача является более распространенной как более простая в настройке и более легко осуществимая конструкционно.

Основные проблемы, с которыми сталкиваются при центральной подаче, — это недостаточно высокая однородность топливовоздушной смеси и потери топлива, которое не попало в цилиндр на такте впуска, при перекрытии клапанов. Первая проблема может быть решена полностью или частично за счет применения турбулизаторов и миксеров (рис. 1, 2, а), позволяющих дополнительно гомогенизировать газовоздушный поток (рис. 2, б, в) [1–4], значительным недостатком которых является препятствование проникновению потока в цилиндр, а значит, снижение коэффициента наполнения. Вторая проблема остается нерешенной.

Материалы и методы исследований

В настоящем исследовании предпринята попытка количественной оценки потерь газового топлива при центральной подаче.

В качестве предположения принято, что при центральной подаче образуется стехиометрическая топливовоздушная смесь, которая имеет тенденцию к аккумулярованию во впускном коллекторе. Так как в большинстве двигателей применяется наддув, давление во впускном коллекторе выше, чем в цилиндре и выпускном

коллекторе. В связи с чем во время перекрытия клапанов часть топливовоздушной смеси, не сгорев, попадает в выпускной трубопровод через цилиндр в качестве продувочного воздуха. Данное явление снижает общую экологичность от применения газового топлива, так как углеводородные топлива при попадании в атмосферу усиливают парниковый эффект. Также снижается экономичность, так как топливо не используется и его сгорание не производит полезную работу, при этом снижается промежуток времени между дозаправками.

Для оценки количества топлива, потерянного при перекрытии клапанов, следует рассчитать массу топлива, попадающего в выпускную систему во время перекрытия клапанов. В качестве топлива в данном исследовании принят природный газ, чьим основным компонентом является метан.

Массу природного газа, потерянного при перекрытии клапанов, найдем из уравнения (1):

$$m_{\text{пг}} = \rho_{\text{пг}} V_{\text{пг}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{пг}}$ — объем природного газа в топливовоздушной смеси, м³;

$\rho_{\text{пг}}$ — плотность природного газа.

Так как стехиометрическое соотношение для природного газа к воздуху равняется соответственно 1:9,52 м³/м³[5], можно определить, что объем природного газа в топливовоздушной смеси (2):

$$V_{\text{пг}} = 0,095 V_{\text{твс}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{твс}}$ — объем топливовоздушной смеси, вытесняемой в выпускной трубопровод в процессе впуска.

При этом объем топливовоздушной смеси $V_{\text{твс}}$, вытесняемой в выпускной трубопровод в процессе впуска, можно вычислить по формуле (3):



Рис. 1. Турбулизатор, используемый при центральной подаче

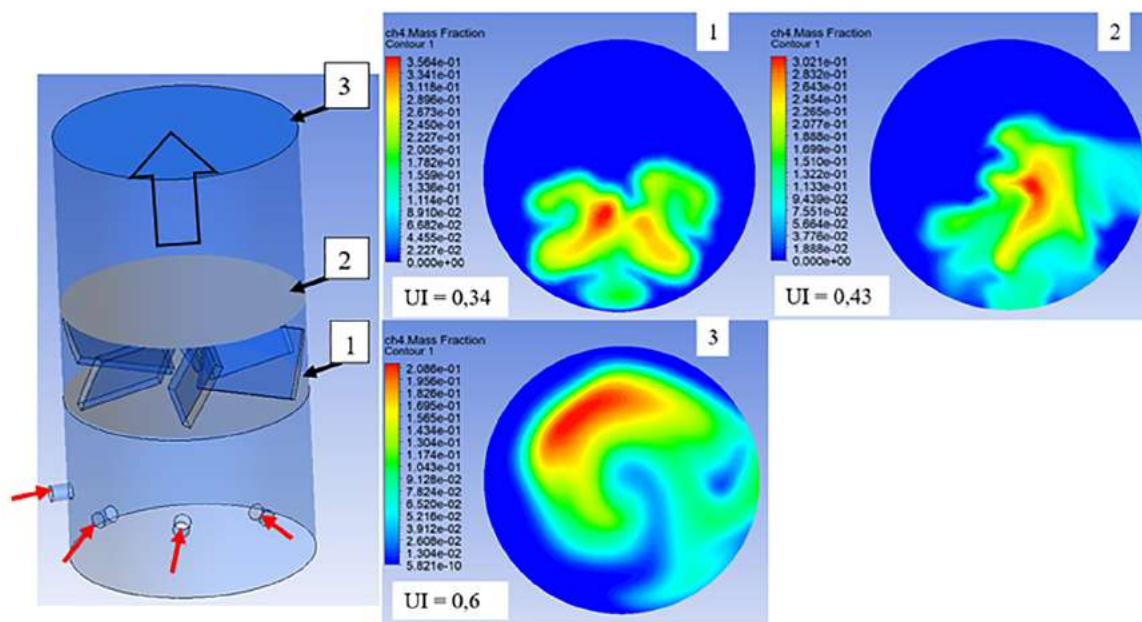


Рис. 2. Изменение концентрации метана в сечениях 1, 2, 3 при давлениях: воздух — 1 атм, метан — 2,5 атм

$$V_{\text{твс}} = f_{\text{кл}} y w t - \left(\frac{V_a}{\varepsilon} + \frac{\pi d^2}{4} S_n \right)_{\text{ост}}, \quad (3)$$

где $V_{\text{твс}}$ — объем топливозвоздушной смеси, м³;
 $f_{\text{кл}}$ — площадь проходного сечения клапанной щели, м²;
 y — количество одноименных клапанов;
 w — средняя скорость течения потока топливозвоздушной смеси (первая условная средняя скорость потока) через клапанную щель, м/с;
 t — длительность перекрытия клапанов, с;
 V_a — полный объем цилиндра, м³;

ε — степень сжатия;

S_n — ход поршня, совершаемый за время перекрытия клапанов, м;

d — диаметр цилиндра, м;

$\gamma_{\text{ост}}$ — коэффициент остаточных газов.

Величина fvt характеризует количество топливозвоздушной смеси, прошедшей через впускной клапан во время перекрытия клапанов, а $\left(\frac{V_a}{\varepsilon} + \frac{\pi d^2}{4} S_n \right) \gamma_{\text{ост}}$ — количество смеси, оставшейся в камере сгорания после закрытия

выпускного клапана, выражающееся как сумма объема камеры сгорания и объема, освобождаемого поршнем при движении вниз. Разность этих величин определяет количество топливозвоздушной смеси, попавшей в выпускной трубопровод.

Масса природного газа, попадающего во выпускную систему во время перекрытия клапанов, может быть определена из формул (1–3). Раскроем составляющие упомянутых формул.

$f_{\text{кл}}$ — площадь проходного сечения клапана определяется по формуле (4) [6]:

$$f_{\text{кл}} = \pi h_{\text{кл}} (d_{\text{г}} \cos \alpha_{\text{ф}} + h_{\text{кл}} \cos^2 \alpha_{\text{ф}} \sin \alpha_{\text{ф}}), \quad (4)$$

где $h_{\text{кл}}$ — высота подъема клапана, м;

$d_{\text{г}}$ — диаметр горловины клапана, м;

$\alpha_{\text{ф}}$ — угол конической фаски клапана, °.

w — средняя скорость течения потока топливозвоздушной смеси (первая условная средняя скорость потока) определяется по формуле (5) [5]:

$$w = \frac{c_{\text{п}} F_{\text{п}}}{i f_{\text{кл}}}, \quad (5)$$

где $c_{\text{п}}$ — средняя скорость движения поршня, м/с;

$F_{\text{п}}$ — площадь поршня, м².

t — длительность перекрытия клапанов, определяемая по формуле (6):

$$t = \frac{\varphi_{\text{вп}} - \varphi_{\text{вып}}}{6n}, \quad (6)$$

где t — длительность периода перекрытия клапанов, с;

$\varphi_{\text{вп}}$ — угол опережения открытия впускных клапанов, °;

$\varphi_{\text{вып}}$ — угол запаздывания закрытия выпускных клапанов, °;

n — частота вращения коленчатого вала, об/мин.

Из уравнения Менделеева — Клапейрона для изотермического процесса определяется плотность природного газа $\rho_{\text{пг}}$ на впуске (7) [7]:

$$\rho_{\text{пг}} = \frac{\rho_0 p_{\text{пг}}}{p_0}, \quad (7)$$

где $p_{\text{пг}}$ — давление природного газа на впуске;

ρ_0 — плотность природного газа при атмосферном давлении, кг/м³;

p_0 — атмосферное давление, Па.

Ход поршня $S_{\text{п}}$, совершаемый за время перекрытия клапанов, определяется как (8) [7]:

$$S_{\text{п}} = R \left[1 + \frac{1}{\lambda} - \left(\cos \varphi_{\text{вып}} + \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi_{\text{вып}}} \right) \right], \quad (8)$$

где R радиус кривошипа, м;

а λ равна (9):

$$\lambda = \frac{R}{L}, \quad (9)$$

где L — длина шатуна, м.

Таким образом, может быть определена масса природного газа, попадающего во выпускную систему во время перекрытия клапанов.

После подстановки выражений (2–9) в формулу (1) получается следующая зависимость (10):

$$m_{\text{пг}} = \rho_{\text{пг}} \left\{ 0,095 \left[(f_{\text{кл}} w t i) - \left(\frac{V_a}{\varepsilon} + \frac{\pi d^2}{4} \right) \gamma_{\text{ост}} \right] \right\}. \quad (10)$$

Выводы

Оценка количества метана, потерянного при перекрытии клапанов, подтверждает несовершенство центральной подачи. При известной простоте осуществления она не позволяет использовать топливо полностью, к тому же неизвестна

порция топлива, попавшего в цилиндр на такте впуска — оно может быть избыточным или недостаточным при данной нагрузке. Таким образом, процесс впуска и образование токсичных веществ в отработавших газах не является контролируемым при центральной подаче. Распределенная подача частично решает проблему. Однако и она требует тщательного подхода к настройке подачи топлива, в частности точки его подачи и количества (должно быть учтено расстояние до впускных клапанов и направление струи) [8–10].

Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Библиографический список

1. Пенкин А. Л. Способ повышения однородности газозооушной смеси в транспортных двигателях внутреннего сгорания / А. Л. Пенкин, С. А. Метлякова // International Journal of Advanced Studies. — 2023. — Vol. 13. — Iss. 1. — Pp. 137–158. — DOI: 10.12731/2227-930X2023-13-1-137-158.
2. Patent № 2017089042 World Intellectual Property Organization, IPC F02B31/00, F02M21/02, F02M21/04, F02M35/10. “Inlet channel device”: priority data 27.11.2015: publication date 01.06.2017 / M. Kristen, R. Schmid, A. Redlich et al.; Applicant Bosch GMBH Robert. — 18 p.
3. Mahmood H. Design of Compressed Natural Gas-Air Mixer for Dual Fuel Engine Using Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Modeling / H. Mahmood, N. Adam, B. Sahari et al. // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. — 2017. — Vol. 14. — Pp. 1–18. — DOI: 10.1166/jctn.2017.6605.
4. Noor M. M. Development of A High Pressure Compressed Natural Gas Mixer for A 1.5 Litre CNG-Diesel Dual Engine / M. M. Noor, K. Kadirgama, R. Devarajan et al. // Paper presented at the National Conference on Design and Concurrent Engineering. — 2008. — 28–29 Oct., Melaka. — Pp. 435–438.
5. Генкин К. И. Газовые двигатели / К. И. Генкин. — М.: Машиностроение, 1977. — 193 с.
6. Луканин В. Н. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 2. Динамика и конструирование: учеб. / В. Н. Луканин, И. В. Алексеев, М. Г. Шатров и др.; под ред. В. Н. Луканина. — М.: Высш. шк., 1995. — 319 с.
7. Ховах М. С. Автомобильные двигатели: теория, расчет и конструкция двигателей внутреннего сгорания: учебник для автомоб.-дор. техникумов / М. С. Ховах, Г. С. Маслов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1971. — 456 с.
8. Пат. 2008460 Российская Федерация, МПК F02B 31/00 (1990.01). Впускной трубопровод двигателя внутреннего сгорания / А. М. Абрашкин, Е. А. Матвеева; заяв. Поволжский Институт информатики, радиотехники и связи; заявл. 26.07.1990.
9. Патент 2731558 Российская Федерация, МПК F02B 43/02 (2006.01), F02B 43/04 (2006.01), F02B 43/06 (2006.01), F02B 43/12 (2006.01), F02D 19/02 (2006.01), F02M 21/02 (2006.01). Способ подачи газового топлива в двигатель внутреннего сгорания: № 2019137447: заявл. 20.01.2019; опубл. 04.09.2020 / В. А. Шишков.
10. Supee A. Effects of Compressed Natural Gas (CNG) Injector Position on Intake Manifold towards Diesel-CNG Dual Fuel (DDF) Engine Performance / A. Supee, R. Mohsin, Z. Majid et al. // Journal Technology (Sciences & Engineering). — 2014. — Pp. 107–115. — DOI: 10.11113/jt.v70.2292.

Дата поступления: 15.10.2023

Решение о публикации: 21.11.2023

Контактная информация:

ПЕНКИН Алексей Леонидович — канд. техн. наук; apenkin1@gmail.com
 ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, доц.; 79219751198@yandex.ru
 СОБОЛЕВ Александр Альбертович — канд. техн. наук; a89213194387@yandex.ru
 МЕТЛЯКОВА Софья Александровна — аспирант; halbertfly@yandex.ru
 ВЕДЕРНИКОВА Дарья Рудольфовна — магистрант; v3dernikowad@yandex.ru

A Study of the Intake Process in Gas Engines with External Mixing of Fuel

A. L. Penkin¹, A. A. Vorob'yov², A. A. Sobolev², S. A. Metlyakova², D. R. Vedernikova¹

¹Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation

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

For citation: Penkin A. L., Vorob'yov A. A., Sobolev A. A., Metlyakova S. A., Vedernikova D. R. Study of the Intake Process in Gas Engines with External Mixing of Fuel // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 902–908. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-902-908

Summary

Purpose: To identify existing problems, namely the low homogeneity of the air-fuel mixture and fuel losses when valves are closed, and the advantages of central fuel injection, namely its relative ease of adjustment and location of gas injectors, and its main differences from distributed injection. To show existing ways to solve these problems. To demonstrate the lack of environmental and economic efficiency in central fuel injection. To calculate the amount of fuel entering the engine exhaust system when the valves are closed. To show ways to increase the efficiency of fuel utilization during engine operation. **Methods:** Calculation of the mass of natural gas entering the engine exhaust system during the valve overlap period, considering the duration of the period, the cross-sectional area of the valve gap, the total amount of fuel supplied during the intake stroke, the density of the fuel, the flow rate when entering the cylinder and the stoichiometric ratio. **Results:** The need to consider the amount of fuel consumed when operating a gas engine is shown. The existing problems of using central fuel supply are indicated. A method for calculating gas fuel losses when valves are closed is formulated and justified. It has been established which parameters influence the mass of fuel that does not enter the cylinder during the intake process. It is concluded that it is necessary to use other injection methods, or to significantly improve the intake process of central injection. **Practical significance:** The influence of the method of supplying fuel to a gas internal combustion engine on the environmental friendliness of the engine and fuel efficiency is shown. A method has been formulated for calculating gas fuel losses during the period of valve overlap, considering the design parameters of the intake system and the duration of opening of the intake valves.

Keywords: Gas engine, gas-diesel engine, natural gas, homogeneity of gas-air mixture, gas-air mixture, fuel accumulation.

References

1. Penkin A. L., Metlyakova S. A. *Sposob povysheniya odnorodnosti gazovozdushnoy smesi v transportnykh dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya* [A method for increasing the homogeneity of the gas-air mixture in transport internal combustion engines]. *International Journal of Advanced Studies*, 2023, vol. 13, Iss. 1, pp. 137–158. DOI: 10.12731/2227-930X2023-13-1-137-158. (In Russian)

2. Patent № 2017089042 World Intellectual Property Organization, IPC F02B31/00, F02M21/02, F02M21/04,

F02M35/10. “Inlet channel device”: priority data 27.11.2015: publication date 01.06.2017 / M. Kristen, R. Schmid, A. Redlich et al.; Applicant Bosch GMBH Robert, 18 p.

3. Mahmood H., Adam N., Sahari B. et al. Design of Compressed Natural Gas-Air Mixer for Dual Fuel Engine Using Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Modeling. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2017, vol. 14, pp. 1–18. DOI: 10.1166/jctn.2017.6605.

4. Noor M. M., Kadirgama K., Devarajan R. et al. Development of A High Pressure Compressed Natural Gas Mixer for A 1.5 Litre CNG-Diesel Dual Engine. Paper presented at the National Conference on Design and Concurrent Engineering, 2008, 28–29 Oct., Melaka, pp. 435–438.
 5. Genkin K. I. *Gazovye dvigateli* [Gas engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977, 193 p. (In Russian)
 6. Lukanin V. N., Alekseev I. V., Shatrov M. G. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya. V 3 kn. Kn. 2. Dinamika i konstruirovaniye: ucheb.; pod red. V. N. Lukanina* [Internal combustion engines. In 3 books. Book 2. Dynamics and design: textbook; edited by V. N. Lukanina]. Moscow: Vyssh. shk. Publ, 1995, 319 p. (In Russian)
 7. Khovakh M. S., Maslov G. S. *Avtomobil'nye dvigateli: teoriya, raschet i konstruktsiya dvigateley vnutrennego sgoraniya: uchebnik dlya avtomob.-dor. tekhnikumov; 2-e izd., pererab. i dop.* [Automobile engines: theory, calculation and design of internal combustion engines: a textbook for automobiles and roads. technical schools]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1971, 456 p. (In Russian)
 8. Abrashkin A. M., Matveeva E. A. *Vpusknoy truboprovod dvigatelya vnutrennego sgoraniya* [Intake pipeline of an internal combustion engine]. Patent RF, no. 2008460, 1990. (In Russian)
 9. Shishkov V. A. *Sposob podachi gazovogo topliva v dvigatel' vnutrennego sgoraniya* [Method of supplying gas fuel to an internal combustion engine] Patent RF, no. 2731558, 2020. (In Russian)
 10. Supee A., Mohsin R., Majid Z. et al. Effects of Compressed Natural Gas (CNG) Injector Position on Intake Manifold towards Diesel-CNG Dual Fuel (DDF) Engine Performance. *Journal Technology (Sciences & Engineering)*, 2014, pp. 107–115. DOI: 10.11113/jt.v70.2292.
- Received: October 15, 2023
Accepted: November 21, 2023
- Author's information:**
Aleksey L. PENKIN — PhD in Engineering;
apenkin1@gmail.com
Aleksandr A. VOROB'YOV — Dr. Sci. in Engineering,
Associate Professor; 79219751198@yandex.ru
Aleksandr A. SOBOLEV — PhD in Engineering;
Associate Professor; a89213194387@yandex.ru
Sofya A. METLYAKOVA — Postgraduate Student;
halbertyfly@yandex.ru
Darya R. VEDERNIKOVA — Master's Degree Student;
v3dernikowad@yandex.ru

УДК 654+004

Основные требования к средствам связи и информационной поддержке медицинской эвакуации железнодорожным транспортом

А. В. Татаренко¹, Е. В. Казакевич², А. А. Привалов², С. А. Лопатин¹

¹Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины Министерства обороны Российской Федерации (ГНИИИ ВМ МО РФ), Российская Федерация, 195043, Санкт-Петербург, ул. Лесопарковая, 4

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

Для цитирования: Татаренко А. В., Казакевич Е. В., Привалов А. А., Лопатин С. А. Основные требования к средствам связи и информационной поддержке медицинской эвакуации железнодорожным транспортом // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 909–920. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-909-920

Аннотация

В ходе проведения специальной военной операции рейсы по эвакуации раненых военнослужащих в военно-медицинские организации производятся в том числе и железнодорожным транспортом. Используемый для военного санитарного поезда подвижной состав не в полной мере удовлетворяет современным требованиям по оснащению инфотелекоммуникационными системами, а следовательно, не обеспечивает эффективное применение военного санитарного поезда по назначению. **Цель:** Определить направления совершенствования инфотелекоммуникационной поддержки пассажирского парка железнодорожного транспорта, используемого для нужд медицинской эвакуации. **Методы:** Использовались методы системного анализа и теории исследования операций. **Результаты:** Разработана перспективная модель обмена информацией между должностными лицами внутри ВСП. Определены основные требования к средствам связи и информационной поддержке медицинской эвакуации железнодорожным транспортом, сформирован алгоритм задач для проведения дальнейших организационно-методических исследований по внедрению информационных и телекоммуникационных технологий, включающих меры по разработке тактико-технических требований к средствам связи должностных лиц военного санитарного поезда. **Практическая значимость:** Определены требования к средствам связи и информационной поддержке медицинской эвакуации железнодорожным транспортом, которые необходимо использовать при выполнении опытно-конструкторских работ по проектированию инфотелекоммуникационного комплекса военно-санитарного поезда.

Ключевые слова: Военно-санитарный поезд, средства связи, инфотелекоммуникационные системы, медицинская эвакуация железнодорожным транспортом, система управления военно-санитарным поездом.

Введение

Железнодорожным перевозкам отводится решающая роль в обеспечении материально-технического обеспечения войск (сил) Вооруженных Сил Российской Федерации как в военное,

так и в мирное время [1, 2]. В ходе проведения специальной военной операции в 2022 году было выполнено более 60 железнодорожных рейсов по эвакуации раненых военнослужащих в военно-медицинские организации окружного и централь-

ного подчинения для оказания специализированной медицинской помощи [3]. Используемый для военного санитарного поезда (ВСП) подвижной состав, предоставленный АО «Федеральная пассажирская компания» из числа эксплуатируемых пассажирских вагонов после их минимального переоборудования, не в полной мере удовлетворяет современным требованиям по оснащению инфотелекоммуникационными системами.

Анализ работы ВСП показал, что в системе его управления средства связи для приема (передачи) медицинской и административной информации либо вовсе отсутствуют, либо не соответствуют предъявляемым к ним современным требованиям по видам и качеству предоставляемых услуг связи, а следовательно, не способствуют эффективному применению ВСП по назначению.

Следует отметить, что в настоящее время мобильные подразделения медицинской службы, включая ВСП, в основном оснащены средствами связи второго, третьего и частично четвертого поколений, созданных отечественной промышленностью в середине 60-х — конце 80-х годов прошлого века. Кроме того, существующие средства радиосвязи медицинской службы легко подвержены вводу ложной информации. Помимо вышеперечисленных недостатков, средства связи, имеющиеся на снабжении в ВСП, не обеспечивают возможность закрытия радиоканалов на основных информационных направлениях. При этом по существующим штатам в ВСП не предусмотрено оснащение портативными средствами связи медицинского и немедицинского персонала.

В планируемых к разработке и производству ВСП требуется реализовать набор специфических преимуществ, которые позволят рассматривать железнодорожный транспорт не только как средство перемещения раненых, но и как военно-медицинское железнодорожное формирование, предназначенное для проведения медицинской эвакуации нового поколения [4].

Для решения данной задачи следует определить ключевые направления внедрения информационных и телекоммуникационных технологий, включающие меры по разработке тактико-технических требований к оборудованию, с целью совершенствования оснащения средствами связи ВСП и улучшения информационной поддержки пассажирского парка железнодорожного транспорта, используемого для нужд медицинской эвакуации. Несомненно, реализация требований военной медицины по использованию цифровых медицинских сервисов и информационно-аналитических ресурсов посредством современных средств связи в ВСП позволит развивать целый ряд специфических преимуществ этого вида транспорта и рассматривать его не только как средство эвакуации раненых, но и как медицинский железнодорожный комплекс, предназначенный для проведения лечебных и реанимационных мероприятий, как на вынужденных стоянках, так и в пути следования.

Ситуационный центр управления ВСП

Создание в ВСП ситуационного центра управления с использованием современных инфотелекоммуникационных систем обеспечит решение двух основных задач: повышение оперативности управления подчиненными силами и средствами ВСП, а также улучшение качества лечебно-диагностических и реанимационных мероприятий.

Роль ситуационного центра управления ВСП в системе функционирования военных цифровых сервисов представлена на рис. 1. Высокая оперативность информационного обмена, (сбора, обработки и отображения информации об эвакуационной обстановке) позволит не только поддерживать «внешнюю» связь с информационными системами и средствами цифровой трансформации Национального центра управления обороной, военно-медицинскими организациями, органами военных сообщений (ВОСО), управлением

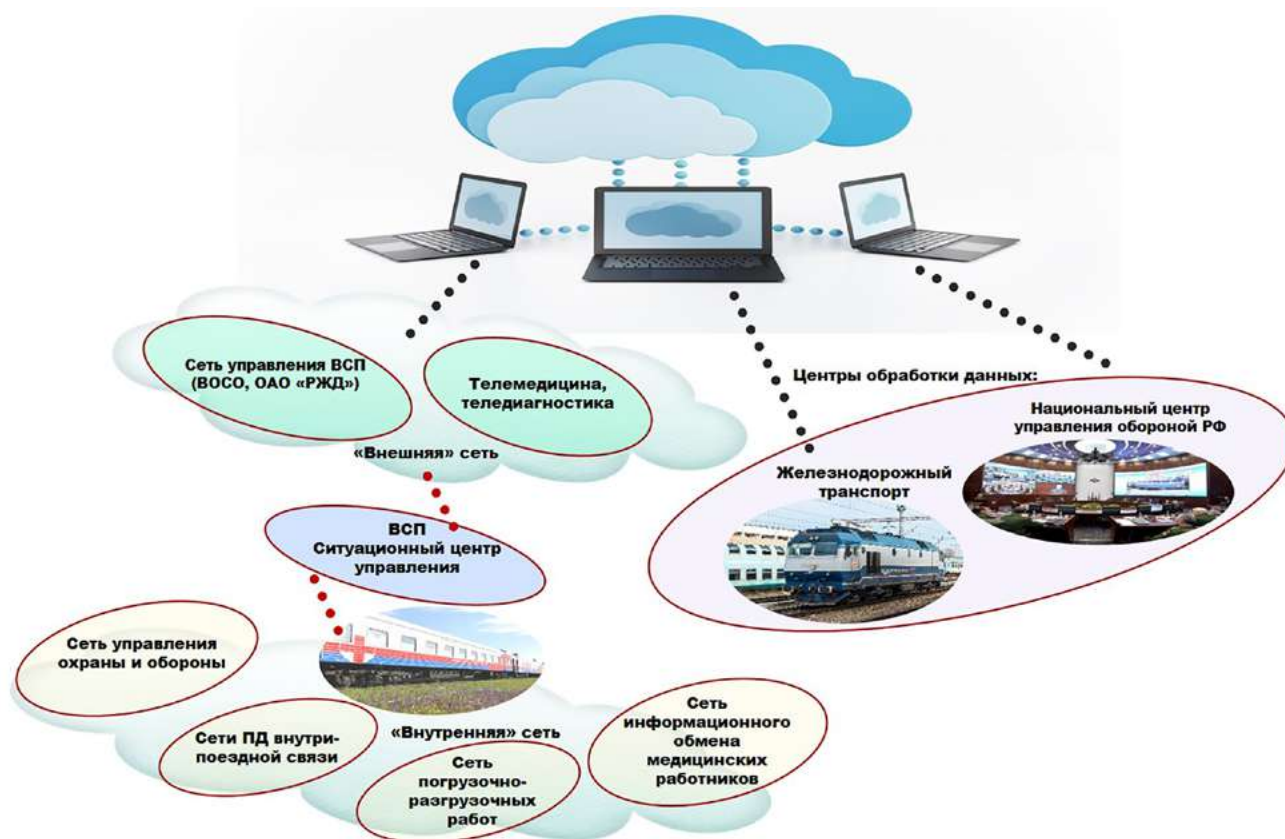


Рис. 1. Ситуационный центр управления ВСП в системе функционирования военных цифровых сервисов

военных сообщений департамента транспортного обеспечения (ДТО) МО РФ, ОАО «РЖД», но и обеспечит повышение скорости выполнения основных задач управления.

Кроме того, система управления внутри ВСП должна осуществляться не только путем личного общения начальника поезда и должностных лиц (ДЛ), но в первую очередь с помощью современных средств связи. Поэтому необходимо организовать сеть передачи данных внутри поездной связи, сеть управления охраны и обороны, сеть погрузочно-разгрузочных работ и сеть информационного обмена медицинских работников.

В процессе информационного взаимодействия нагрузка в системе связи формируется должностными лицами ВСП, от которых поступают разные виды сообщений, отличающиеся как по объему передаваемой информации, так и по времени передачи.

Следовательно, суммарный поток сообщений, поступающий со стороны ДЛ, выполняющих различные функциональные обязанности, будет отличаться своей неоднородностью, как по виду передаваемой информации, так и по интенсивности ее поступления в систему связи. При этом должны поддерживаться все виды информационного обмена и обеспечивать любому должностному лицу предоставление необходимых услуг связи заданного качества. Поэтому в ходе дальнейшего исследования необходимо определить требуемый вид связи и объем информации в интересах ДЛ медицинской службы ВСП и организации ее передачи, а также обоснованного представления информационной связности АРМ ДЛ.

С целью исследования вопросов оснащения современными средствами связи должностных лиц ВСП была разработана модель их информационного обмена, представленная на рис. 2.

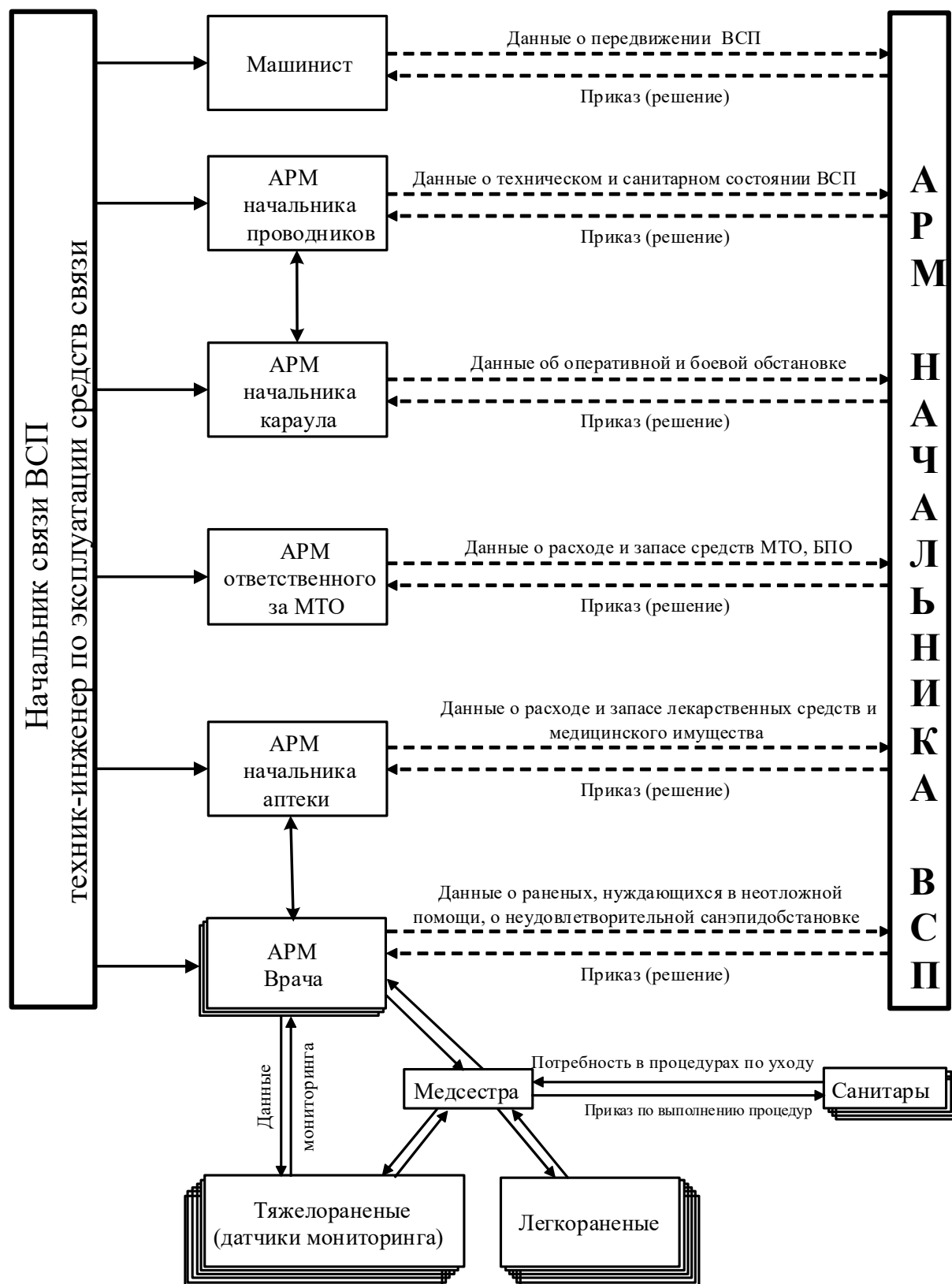


Рис. 2. Перспективная модель обмена «внутренней» информацией в ВСП

В ситуационном центре управления ВСП организуется работа с потоками «внутренней» информации, поступающей на автоматизированные рабочие места (АРМ): начальника ВСП, начальника проводников, начальника охраны, начальника аптеки, военнослужащего, ответственного за материально-техническое обеспечение, врачей, датчиков контроля жизненных функций пациентов. Результаты анализа приведенной модели информационного обмена в ВСП показывают, что информация, поступающая со стороны должностных лиц, обладающих различной степенью важности (приоритета), степенью конфиденциальности и мобильности, будет отличаться своей неоднородностью как по виду передаваемой военно-медицинской, технической и административной информации, так и по интенсивности ее поступления в систему связи.

Основная проблема организации информационного обеспечения должностных лиц ВСП заключается в противоречии между увеличением объема необходимой информации и постоянным требованием сокращения времени на ее обработку и может быть решена путем внедрения автоматизированной системы управления (АСУ) на базе современных телекоммуникационных технологий.

Поскольку современные средства связи и АСУ являются «человеко-машинной системой», то главным их элементом по-прежнему является человек, на которого возложены функции принятия решений на основе полученных от информационной системы данных. Основными целевыми функциями модели обмена внутренней и внешней информации в ВСП будут:

- создание и сопровождение баз данных подразделений ВСП;
- оперативные передача и получение приказов, команд, распоряжений, директив, сигналов оповещения, данных об обстановке, помощь в принятии по этим данным эффективных решений в интересах управления организационно-плано-

выми, лечебно-профилактическими мероприятиями, снабжением, повышающими эффективность данного этапа медицинской эвакуации;

- упрощение сбора, накопления, обработки, выдачи и хранения отчетов, донесений, заявок от автоматизированных и неавтоматизированных источников информации, ведение должностными лицами ВСП информационных массивов, содержащих данные о техническом и санитарном состоянии ВСП;

- обеспечение преемственности, своевременности и качества оказания медицинской помощи и проведения профилактических мероприятий, исключение дублирования диагностических исследований на основе оперативного обмена данными и применения электронных индивидуальных носителей информации;

- информационная поддержка медицинских специалистов, накопление в базах данных современных применяемых знаний и опыта специалистов;

- наращиваемость задач (открытость) системы, подключение новых абонентов системы, в том числе удаленных;

- защита целостности обрабатываемой информации и предотвращение несанкционированных действий путем идентификации абонентов и ограничения доступа персонала.

Значительный объем информации, поступающей начальнику ВСП для принятия решения, достаточно трудно оценить в короткие сроки, кроме того, большая нагрузка каналов связи приводит к большим затратам времени на прием-передачу информации. Определенная задержка информации, возникающая вследствие этого, затрудняет работу, а принятое решение на основе ранее собранной информации может не соответствовать действительной обстановке. Поэтому документооборот, передаваемый по средствам связи в интересах медицинского, материально-технического и административного обеспечения,

по форме и содержанию нуждается в дальнейшей формализации и унификации.

Основными условиями обеспечения устойчивого, оперативного и непрерывного процесса управления ВСП является хорошо организованная и технически оснащенная система связи. Поэтому в штатную структуру ВСП необходимо включить начальника связи и (или) техника-инженера по эксплуатации средств связи, которые обеспечат процесс обслуживания и эксплуатации инфотелекоммуникационного оборудования, а также информирования ДЛ по вопросам использования средств связи, так как начальник ВСП, медицинский и немедицинский персонал поезда должны четко представлять основы организации связи и возможности штатных технических средств связи ВСП и порядок их использования в интересах эвакуируемых.

Другим неперенным условием, обеспечивающим надлежащее управление силами и средствами ВСП, является оперативность связи. При этом к одной из важных задач современных средств связи в системе управления ВСП относится обеспечение взаимодействия всех звеньев ВСП, непрерывного согласования всех вопросов с различными подразделениями материально-технического обеспечения, командой проводников, караула, а также своевременное получение данных от всех видов разведки и прежде всего о применении ОМП, что позволит обеспечить максимально быстрое и своевременное принятие необходимых мер защиты личного состава, раненых и больных, техники и материальных средств ВСП.

Использование инфотелекоммуникационных технологий в ВСП

Существенно повысить качество лечебно-диагностических мероприятий и организационный потенциал медицинской эвакуации невозможно без применения современных цифровых медицинских сервисов, технологий и информаци-

онно-аналитических ресурсов. Система правовых основ цифровизации на железнодорожном транспорте Российской Федерации определена в полном объеме: заложена в Указе Президента Российской Федерации от 9 мая 2017 г. № 203 [5] и регламентирована требованиями ГОСТ Р ИСО 17261—2014 [6]. Кроме того, усилия по последовательному инновационному развитию железнодорожного транспорта реализованы в Распоряжении Правительства Российской Федерации [7], в соответствии с которым программа развития ОАО «РЖД» определяет ключевые направления развития цифровизации, информационных технологий и сервисов на базе цифровых технологий до 2025 г. Массовое внедрение на сети железных дорог инфотелекоммуникационных технологий и автоматизированных систем управления и контроля обеспечивается за счет внедрения цифровых систем передачи данных на основе использования волоконно-оптических линий связи, что позволит использовать созданную инфраструктуру для нужд системы связи ВСП.

Холдинг ОАО «РЖД» уверенно решает задачи стратегии цифровой трансформации: технологической независимости, развития искусственного интеллекта, внутрикорпоративной и внешней интеграции, а также создание новой функциональности на российских платформах [8, 9]. Кроме того, реализация мер в рамках цифровой трансформации ОАО «РЖД» по внедрению новых технологий обеспечит увеличение потребительской ценности транспортных услуг за счет использования инновационных цифровых медицинских сервисов, таких как телемедицина и теледиагностика, на этапе эвакуации.

В созданном центре обработки данных медицинской службы ВС РФ (далее — ЦОД МС ВС), предназначенном для обеспечения информационно-аналитической деятельности главных медицинских специалистов Министерства обороны, определенное место занимает лечебно-эвакуаци-

онная деятельность, направленная на эффективное медицинское обслуживание раненых военнослужащих. Сложность практических задач, решаемых этим центром, постоянно растет, что, в свою очередь, требует расширения информационного пространства и поиска методов и алгоритмов решений для возникающих ситуационных задач с целью удовлетворения функциональных потребностей пользователей ЦОД МС ВС. Реализация замысла и функционирование ЦОД МС ВС существенно повышают эффективность деятельности ДЛ военной медицины ВСП за счет расширения рабочего информационно-аналитического пространства исполнителей путем оперативного вывода на автоматизированное рабочее место информации, позволяющей мониторировать клинические показатели раненых (насыщение крови кислородом, артериальное давление, частоту сердечных сокращений, частоту дыхания, уровень глюкозы в крови и др.), оперативно оценивать их изменение, а также своевременно реагировать на критические изменения и (или) возможные угрозы здоровью раненых военнослужащих.

Кроме того, для информатизации динамики показателей жизненно важных функций организма пострадавших разработан электронный протокол лечебно-эвакуационных мероприятий. Учет пациентов в нем позволяет формировать не только установленные руководящими документами формы медицинских документов, но и разделы электронной медицинской карты, а также присоединять к ней мультимедийную информацию (фото, видео) и файлы медицинских данных произвольного формата [10], что увеличивает объемы электронного документооборота в системе обмена документальной информацией.

Поэтому решение системотехнических вопросов разработки и эффективного применения информационной поддержки медицинских сервисов при проведении информационного обследования системы управления ВСП позволят

определить номенклатуры аппаратных средств АРМ, которые способны обеспечить заданные характеристики по своевременности представления информации при минимальной конфигурации технических средств [11].

Требования к средствам связи и информационной поддержке

Обеспечение оперативного управления подчиненными силами и средствами ВСП осуществляется средствами связи и автоматизации. Недостаток индивидуальных средств связи у ДЛ в ВСП может существенно затруднять организацию управления процессами медицинского обеспечения в ВСП, получение и передачу в вышестоящие звенья медицинской службы объективной информации, за счет которой в целом организуется стройная система лечебно-эвакуационных мероприятий с помощью транспортных средств.

Под понятием «Система связи на ВСП» следует понимать организационно-техническое объединение сил и средств связи, создаваемое для обеспечения обмена всеми видами информации в системе управления ВСП. Структура взаимодействия требований системы управления и системы связи ВСП представлена на рис. 3.

Система связи является важнейшей составной частью, материально-технической основой системы управления ВСП.

Анализ функционального взаимодействия должностных лиц и модели информационного обмена «внутренней» информацией в ВСП позволяет сформировать основной перечень требований к сетям и средствам связи, а также информационной поддержки ВСП, а именно:

- 1) требования по целевому назначению и функционированию:
 - требования по обеспечению своевременности связи при условии выполнения требований по обеспечению достоверности и безопасности;
- 2) требования по устойчивости сетей связи:

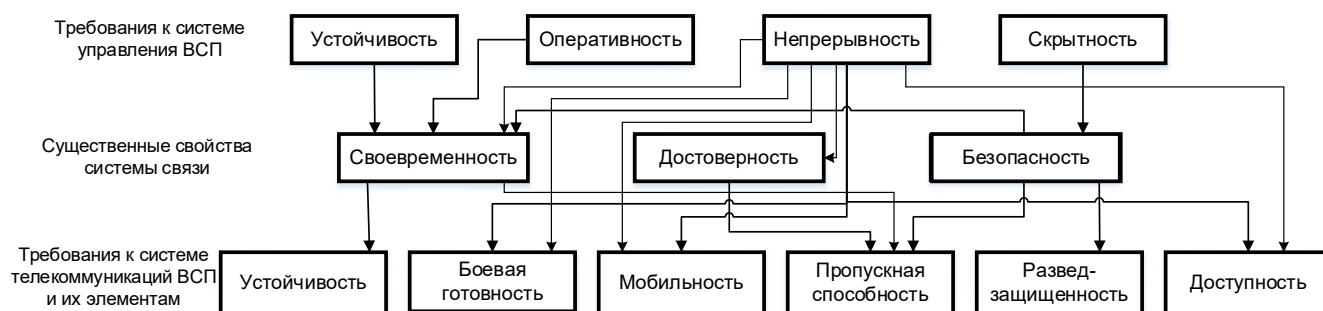


Рис. 3. Требования к системе управления и системе связи ВСП

- требования по живучести;
- требования по помехоустойчивости и помехозащищенности;
- требования по надежности;
- 3) требования по пропускной способности;
- 4) требования по мобильности;
- 5) требования по обеспечению разведзащищенности;
- 6) требования по обеспечению управления связью;
- 7) структурно-технические требования;
- 8) требования к программному, математическому и информационно-лингвистическому обеспечению;
- 9) требования по обеспечению сохранения государственной и военной тайны;
- 10) требования по техническому и метрологическому обеспечению;
- 11) требования по стандартизации и унификации;
- 12) экономические требования.

Представленные основные требования к средствам связи и информационной поддержки медицинской эвакуации железнодорожным транспортом, как правило, формируются при составлении тактико-технических заданий на выполнение опытно-конструкторских работ при создании комплексов технических средств связи и автоматизации, а также технических заданий на модернизацию существующих средств связи и уточняются при серийном производстве и опытной эксплуатации данных средств.

Заключение

Основными направлениями совершенствования инфотелекоммуникационного комплекса в системе управления ВСП являются: расширение функциональных возможностей средств связи и автоматизации управления по обмену и обработке военно-медицинской и иной информации; совершенствование архитектуры автоматизированных систем управления для реализации принципов распределенной обработки данных и ее согласование с общей структурой управления; стандартизация и унификация оборудования, информационного и программного обеспечения; существенное расширение спектра услуг служб связи, особенно по передаче мультимедийной информации в реальном масштабе времени при решении задач телемедицины и теледиагностики; повышение живучести и разведзащищенности системы связи ВСП за счет использования технологий распределенных сетей; уменьшение массы и габаритов средств связи.

Предварительный анализ существующей системы управления ВСП с помощью имеющихся средств связи показал ее несоответствие предъявляемым современным требованиям. Отсутствие современного управления и системы связи ВСП приводит к потере военно-медицинской и технической информации, увеличению цикла управления, нерациональному использованию сил и средств медицинской службы, материально-техническому обеспечению ВСП.

Для совершенствования системы связи ВСП необходимы дальнейшие организационно-методические исследования, которые позволят решить следующие задачи:

- синтеза структуры инфотелекоммуникационного комплекса ВСП с учетом оценки прогнозируемых информационных потоков и функциональных потребностей пользователей средств связи в ВСП;

- рассчитать среднюю абонентскую нагрузку (интенсивность, объем, продолжительность и т. п.) на сети связи в пределах ВСП;

- осуществить анализ возможностей средств связи в рамках межведомственного информационного взаимодействия при функционировании ВСП Министерства обороны, Министерства транспорта и Министерства здравоохранения;

- разработать ТТТ к средствам связи, что позволит определить перечень средств связи для ВСП, имеющих на снабжении и нуждающихся в соответствующей модернизации;

- разработать предложения по внедрению инновационных (цифровых) технологий при подготовке ТТТ к системе управления ВСП («Умный поезд»).

Библиографический список

1. Бабошин В. А. Некоторые предложения по совершенствованию методов восстановления управления прерванного движения поездов на участке железной дороги / В. А. Бабошин, И. В. Бокк, С. А. Бондаренко и др. // Материалы научно-практической конференция «Совершенствование подготовки специалистов инженерных специальностей в контексте инновационного развития России. Проблемы и решения». — СПб.: Петергоф, 2023. — С. 171–176.

2. Коновалова А. В. Технологии сенсорных сетей как основа построения подсистемы железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Коновалова, В. А. Бабошин, И. В. Бокк // Сборник научных статей «Специальная

техника и технологии транспорта». — СПб.: Петергоф, 2020. — № 8. — С. 196–203.

3. Тришкин Д. В. Медицинское обеспечение Вооруженных Сил Российской Федерации в условиях проведения специальной военной операции и частичной мобилизации: итоги деятельности и задачи на 2023 год / Д. В. Тришкин // Военно-медицинский журнал. — 2023. — № 1. — С. 4–24.

4. Отчет о НИР «Разработка медико-технических требований к переоборудованию средств авиационного, автомобильного и железнодорожного транспорта, эксплуатирующихся в настоящее время и планируемых к использованию в период с 2020 года, в целях эвакуации в особый период», шифр «Универсал-2020» / В. Р. Медведев и др. — СПб.: ГНИИИ ВМ, 2015. — Кн. 1. — С. 133.

5. Указ Президента Российской Федерации от 9 мая 2017 г. № 203 «О стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы».

6. ГОСТ Р ИСО 17261—2014. Интеллектуальные транспортные системы. Автоматическая идентификация транспортных средств и оборудования. Архитектура и терминология в секторе интермодальных грузовых перевозок.

7. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-р «Об утверждении программы развития ОАО «РЖД» до 2025 года».

8. Белозеров О. В. Об итогах производственно-финансовой деятельности ОАО «РЖД» за 2022 г. и приоритетных целевых задачах на 2023 г. / О. В. Белозеров // Железнодорожный транспорт. — 2023. — № 3. — С. 4–12.

9. Осьминин А. Т. О формировании требований к составляющим комплексной транспортной услуги / А. Т. Осьминин // Железнодорожный транспорт. — 2020. — № 6. — С. 4–13.

10. Борисов Д. Н. Современные подходы к информатизации динамики показателей жизненно важных функций организма с использованием протокола лечебно-эвакуационных мероприятий / Д. Н. Борисов, В. В. Иванов, И. Т. Русев и др. // Клиническая патофизиология. — 2017. — № 3. — С. 95–99.

11. Богданов А. В. Обобщенный подход к определению производительности аппаратных средств в системе обмена документальной информации ОАО «РЖД» / А. В. Богданов, Е. В. Казакевич // Инновационная железная дорога. Новейшие и перспективные системы обеспечения движения поездов. Проблемы и решения: сборник статей Международной научно-теоретической конференции. — СПб.: Петергоф, 2021. — С. 302–307.

Контактная информация:

ТАТАРЕНКО Алексей Викторович — pomnivm@mail.ru

КАЗАКЕВИЧ Елена Владимировна — канд. техн. наук, доц.; kev-pgups@yandex.ru

ПРИВАЛОВ Андрей Андреевич — д-р воен. наук, проф.; aprivalov@inbox.ru

ЛОПАТИН Станислав Аркадьевич — д-р мед. наук, проф.; stanislav.lopatin47@yandex.ru

Дата поступления: 13.10.2023

Решение о публикации: 16.11.2023

Basic Requirements for Means of Communication and Information Support for Medical Evacuation by Rail

A. V. Tatarenko¹, Ye. V. Kazakevich², A. A. Privalov², S. A. Lopatin¹

¹National Research and Testing Institute of Military Medicine of the Ministry of Defense of the Russian Federation (GNII VM MO RF), 4, Lesoparkovaya str., St. Petersburg, 195043, Russian Federation

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

For citation: Tatarenko A. V., Kazakevich Ye. V., Privalov A. A., Lopatin S. A. Basic Requirements for Means of Communication and Information Support for Medical Evacuation by Rail // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 909–920. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-909-920

Summary

During the special operation in 2022, more than 60 railway runs have been carried out to evacuate wounded servicemen to military medical organizations, including transportation by rail. The rolling stock used for the military sanitary train does not fully meet the modern requirements for equipping with information and telecommunication systems, and, therefore, does not contribute to the effective use of military sanitary train for its intended purpose. **Purpose:** To consider the issue of improving the equipment of MST communication facilities and improving information and communication support for the passenger fleet of railway transport used for medical evacuation needs. **Methods:** Methods of system analysis and operations research theory have been used. **Results:** A prospective model for information exchange among personnel within the MST has been developed. The main requirements for communication and information support means for medical evacuation by rail have been determined. An algorithm of tasks has been formulated for further organizational and methodological research on the implementation of information and telecommunication technologies, including measures for developing tactical and technical requirements for communication means of military medical train personnel. **Practical significance:** Requirements for communication and information support means for medical evacuation by rail have been identified. These requirements are to be used in the course of experimental and design work on the development of an information and telecommunication complex for the military medical train.

Keywords: Military sanitary train, means of communication, infotelecommunication systems, medical evacuation by rail, control system of military-sanitary train.

References

1. Baboshin V. A., Bokk I. V., Bondarenko S. A. Nekotorye predlozheniya po sovershenstvovaniyu metodov vosstanovleniya upravleniya prervannogo dvizheniya poezdov na uchastke zheleznoy dorogi [Some proposals for improving methods for restoring control of interrupted train movement on a section of the railway]. *Materialy nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Sovershenstvovanie podgotovki spetsialistov inzhenernykh spetsial'nostey v kontekste innovatsionnogo razvitiya Rossii. Problemy i resheniya"* [Materials of the scientific-practical conference "Improving the training of engineering specialists in the context of innovative development of Russia. Problems and solutions"]. St. Petersburg: Petergof Publ., 2023, pp. 171–176. (In Russian)
2. Konovalova A. V., Baboshin V. A., Bokk I. V. Tekhnologii sensornykh setey kak osnova postroeniya podsistemy zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Sensor network technologies as the basis for constructing a subsystem of railway automation and telemechanics]. *Sbornik nauchnykh statey "Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta"* [Collection of scientific articles "Special equipment and transport technologies"]. St. Petersburg: Petergof Publ., 2020, Iss. 8, pp. 196–203. (In Russian)
3. Trishkin D. V. Meditsinskoe obespechenie Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii v usloviyakh provedeniya spetsial'noy voennoy operatsii i chastichnoy mobilizatsii: itogi deyatelnosti i zadachi na 2023 god [Medical support of the Armed Forces of the Russian Federation in the context of a special military operation and partial mobilization: results of activities and tasks for 2023]. *Voenno-meditsinskiy zhurnal* [Military Medical Journal]. 2023, Iss. 1, pp. 4–24. (In Russian)
4. Otchet o NIR "Razrabotka mediko-tekhnicheskikh trebovaniy k pereoborudovaniyu sredstv aviatsionnogo, avtomobil'nogo i zheleznodorozhnogo transporta, ekspluatiruyushchikhsya v nastoyashchee vremya i planiruemyykh k ispol'zovaniyu v period s 2020 goda, v tselyakh evakuatsii v osobyi period", shifr "Universal-2020". V. R. Medvedev et al. [Research report "Development of medical and technical requirements for the re-equipment of aviation, road and rail transport vehicles currently in operation and planned for use from 2020, for the purpose of evacuation during a special period", code "Universal-2020". V. R. Medvedev et al.]. St. Petersburg: GNIII VM Publ., 2015, kn. 1, p. 133. (In Russian)
5. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 9 maya 2017 g. № 203 "O strategii razvitiya informatsionnogo obshchestva v Rossiyskoy Federatsii na 2017–2030 gody" [Decree of the President of the Russian Federation of May 9, 2017 № 203 "On the strategy for the development of the information society in the Russian Federation for 2017–2030"]. (In Russian)
6. GOST R ISO 17261—2014. Intellektual'nye transportnye sistemy. Avtomaticheskaya identifikatsiya transportnykh sredstv i oborudovaniya. Arkhitektura i terminologiya v sektore intermodal'nykh gruzovykh perevozok [GOST R ISO 17261—2014. Intelligent transport systems. Automatic identification of vehicles and equipment. Architecture and terminology in the intermodal freight transport sector]. (In Russian)
7. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 19 marta 2019 g. № 466-r "Ob utverzhdenii programmy razvitiya OAO "RZhD" do 2025 goda" [Order of the Government of the Russian Federation dated March 19, 2019 № 466-r "On approval of the development program of JSC Russian Railways until 2025"]. (In Russian)
8. Belozarov O. V. Ob itogakh proizvodstvenno-finansovoy deyatelnosti OAO "RZhD" za 2022 g. i prioritnykh tselevykh zadachakh na 2023 g. [On the results of the production and financial activities of JSC Russian Railways for 2022 and priority targets for 2023]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2023, Iss. 3, pp. 4–12. (In Russian)
9. Os'minin A. T. O formirovaniy trebovaniy k sostavlyayushchim kompleksnoy transportnoy uslugi [On the formation of requirements for the components of a complex transport service]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2020, Iss. 6, pp. 4–13. (In Russian)
10. Borisov D. N., Ivanov V. V., Rusev I. T. et al. Sovremennye podkhody k informatizatsii dinamiki pokazateley zhiznenno vazhnykh funktsiy organizma s

ispol'zovaniem protokola lechebno evakuatsionnykh meropriyatiy [Modern approaches to informatization of the dynamics of vital functions of the body using the protocol of medical evacuation measures]. *Klinicheskaya patofiziologiya* [Clinical pathophysiology]. 2017, Iss. 3, pp. 95–99. (In Russian)

11. Bogdanov A. V., Kazakevich E. V. Obobshchennyy podkhod k opredeleniyu proizvoditel'nosti apparatnykh sredstv v sisteme obmena dokumental'noy informatsii OAO "RZhD" [A generalized approach to determining the performance of hardware in the document information exchange system of JSC Russian Railways]. *Innovatsionnaya zheleznaya doroga. Noveyshie i perspektivnye sistemy obespecheniya dvizheniya poezdov. Problemy i resheniya: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-teoreticheskoy konferentsii* [Innovative Railway. The latest and most

promising train traffic support systems. Problems and solutions: collection of articles of the International Scientific and Theoretical Conference]. St. Petersburg: Petergof Publ., 2021, pp. 302–307. (In Russian)

Received: October 13, 2023

Accepted: November 16, 2023

Author's information:

Alexey V. TATARENKO — pomniv@mail.ru

Elena V. KAZAKEVICH — PhD in Engineering,
Associate Professor; kazakevich@pgups.ru

Andrey An. PRIVALOV — Dr. Sci. in Military, Professor;
Privalov@pgups.ru

Stanislav Ar. LOPATIN — Dr. Sci. in Medicine, Professor;
stanislav.lopatin47@yandex.ru

УДК 654.165

Модель процесса информационного обмена между абонентами сети ПРС с общим каналом связи

А. А. Привалов, Е. В. Казакевич, И. А. Глухов

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

Для цитирования: Привалов А. А., Казакевич Е. В., Глухов И. А. Модель процесса информационного обмена между абонентами сети ПРС с общим каналом связи // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 921–930. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-921-930

Аннотация

Цель: Разработать модель процесса функционирования сети ПРС, позволяющую производить оценку времени доведения пакетов данных до абонентов сети в условиях сложной радиоэлектронной обстановки. **Методы:** Для решения задачи применялись методы общей теории систем, теории вероятностей, теории массового обслуживания, а также метод топологического преобразования стохастических сетей (ТПСС). **Результаты:** Разработанная модель позволяет оценить качество функционирования сети пакетной радиосвязи с учетом особенностей используемого протокола многостанционного доступа к сетевому и каналному ресурсу, что может позволить определить основные направления по повышению помехозащищенности сетей ПРС при их функционировании в условиях воздействия случайных и преднамеренных помех. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы при проектировании сетей подвижной радиосвязи стандарта ALE, а также при разработке методик по повышению помехозащищенности сетей радиосвязи и систем многопараметрической адаптации.

Ключевые слова: Сеть ПРС, ALE, КВ-радиосвязь, модель, стохастическая сеть.

Актуальность

На железнодорожном транспорте важнейшим элементом систем управления и обеспечения безопасности движения поездов (СУОБДП) являются сети поездной радиосвязи (ПРС). Их основной задачей является обеспечение информационного обмена с требуемым качеством между подвижными и стационарными абонентами [1, 2].

В соответствии с правилами [1], для обеспечения устойчивой двухсторонней радиосвязью абонентов сети ПРС, должны выполняться требования необходимого радиопокрытия [3] и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств [4].

Стоит отметить, что работа сетей ПРС осуществляется в сложной радиоэлектронной обстановке. Значительное влияние качества предоставляемых услуг сетями ПРС на осуществление перевозочного процесса определяет высокие требования к пакетным сетям передачи данных. Влияние случайных и преднамеренных помех на сети ПРС нарушает штатную работу железнодорожного транспорта. Следовательно, внедряемые в СУОБДП радиосети передачи данных должны соответствовать высоким требованиям по помехозащищенности. Поэтому оценка качества информационного обмена между абонентами сети ПРС в условиях сложной радиоэлектронной обстановки является актуальной задачей.

С целью разработки механизма оценки качества информационного обмена проведем обзор существующих подходов к оценке качества функционирования современных радиосетей передачи данных. В настоящей работе под качеством будем понимать общее обозначение набора параметров, связанных с передачей данных между (N) — пунктом доступа услуг (ПДУ) [5].

Среди множества показателей качества, нормируемых рекомендациями ITU-T, ETSI, 3GPP, IETF, можно выделить следующие: пропускная способность направлений передачи данных; вероятность потери данных, оцениваемая по значению вероятности потери пакетов; время задержки данных, рассчитываемое как среднее время доставки сообщения (пакета данных) и джиттер указанного времени.

В работе [6] рассмотрен процесс установления соединения между абонентами подвижной сети радиосвязи. Для решения поставленной задачи авторы использовали метод топологического преобразования стохастических сетей (ТПСС). В результате была предложена математическая модель для осуществления анализа и оценки времени успешного установления соединения. Предложенная модель не учитывает особенности используемого протокола многостанционного доступа и не позволяет оценить время гарантированного доведения информации.

В работе [7] предложена методика оценки эффективности канального уровня сети радиосвязи стандарта TETRA в условиях деструктивных воздействий. Получены асимптотические оценки параметров, влияющих на эффективность функционирования сети. Методика позволяет оценивать среднее время успешной передачи пакета данных, без учета функции распределения времени успешной передачи пакетов данных. Также предложенная методика не может быть применима для оценки качества функционирования сетей радиосвязи декаметрового (коротковол-

нового) диапазона частот, так как не учитывает особенности функционирования данных сетей.

В работе [8] предложена комплексная модель функционирования декаметровой сети радиосвязи. Оценка качества в предложенной модели производится с учетом следующих показателей: вероятности приема информации (достоверность), времени передачи сообщения (своевременность), вероятности энергетического обнаружения источника (безопасность). В предложенной модели не учитывается оценка времени успешного соединения и времени гарантированного доведения пакета данных.

В работе [9] предложена модель, позволяющая анализировать и оценивать помехозащищенность сетей радиосвязи, критерием оценки является вероятность ошибки приема элемента сигнала. Модель не учитывает используемую процедуру многостанционного доступа.

В работе [10] предложена методика расчета надежности канала радиосвязи, которая оценивается по коэффициенту готовности. Методика не учитывает временной ресурс используемой системы радиосвязи.

В настоящей статье рассматривается один из возможных механизмов оценки качества информационного обмена между абонентами сети ПРС в зависимости от вероятности успешного приема и отношения сигнал/шум. Для решения поставленной задачи авторами на основе метода топологического преобразования стохастических сетей (ТПСС) предлагается подход, который заключается в представлении процесса функционирования сети ПРС с общим каналом связи в виде стохастической сети, задании вида частных распределений, определения эквивалентной функции, с последующим определением итоговой функции распределения времени успешной передачи пакетов данных. Стоит отметить, что результаты, полученные в указанных выше работах [6–9], используются в процессе моделирования в качестве входных параметров.

Предлагаемая авторами модель позволяет оценить качество информационного обмена между абонентами сети ПРС в условиях сложной радиоэлектронной обстановки по показателю вероятности успешной передачи пакетов сообщений и среднего времени доставки пакетов сообщений.

Постановка задачи

Пусть имеется сеть поездной радиосвязи (ПРС) с общим каналом связи, в которой N подвижных станций (ПС) передают сообщения равного приоритета в адрес базовой станции (БС). На каждой из станций интенсивность поступающего на передачу потока сообщений составляет λ_i сообщений в сутки, а сам поток является пуассоновским.

Поступающие на передачу сообщения в зависимости от их объема V и емкости накопителя могут разбиваться на части. Известно, что в поступающем на передачу потоке содержится $Z1\%$ сообщений, передаваемых в виде одной, $Z2\%$ — в виде двух и $Z3\%$ — в виде трех и т. д. частей.

Каждое сообщение (или его часть) за случайное время $t_{\text{ввн}}$ с функцией распределения $U(t)$ дополняется служебными признаками, вводится в накопитель и передается в виде пакета определенной структуры. Накопитель обеспечивает хранение одного пакета. Остальные пакеты сообщений или вновь поступившие сообщения становятся в очередь.

Перед передачей пакета сообщений оператор станции в течение случайного времени $t_{\text{кз}}$ с функцией распределения $D(t)$ производит контроль занятости выделенных для связи рабочих частот. При этом вероятность наличия хотя бы одной свободной рабочей частоты равна $P_{\text{св}}$. Если рабочая частота свободна, то за случайное время $t_{\text{оп}}$ с функцией распределения $B(t)$ осуществляется передача содержащегося в накопителе пакета сообщений, которая подтверждается с вероятностью $P_{\text{оп}}$. В этом случае на БС за случайное время $t_{\text{пак}}$ с функцией распределения

$K(t)$ в адрес корреспондента по специально выделенному каналу связи передается пакет сообщений, который принимается успешно с вероятностью $P_{\text{пак}}$. В противном случае с вероятностью $(1 - P_{\text{оп}})$ или $(1 - P_{\text{пак}})$ через случайное время ожидания пакета сообщений $t_{\text{ожп}}$ с функцией распределения $G(t)$ после проверки наличия свободной рабочей частоты производится повторная попытка передачи пакета сообщений.

Если свободной рабочей частоты нет, а вероятность этого события равна $(1 - P_{\text{св}})$, то с вероятностью $P_{\text{обн}}$ оператор станции обнаружит этот факт занятия. В противном случае с вероятностью $(1 - P_{\text{обн}})$ будет произведена передача пакета сообщений на занятой рабочей частоте и через время $t_{\text{ожп}}$ после проверки наличия свободной частоты данный пакет сообщений передается повторно. Число повторных передач пакетов сообщений не ограничено.

Известно, что в сети можно выделить Γ территориально рассредоточенных групп мобильных станций, причем достоверный контроль занятости используемых для связи рабочих частот возможен только в пределах одной группы.

Требуется определить функцию распределения времени успешной передачи пакетов сообщений в данной радиосети.

Решение

Для решения поставленной задачи представим процесс функционирования сети ПРС с общим каналом связи в виде стохастической сети (рис. 1).

Указанные преобразования в предположении, что соответствующие функции распределения относятся к классу экспоненциальных, определяются как:

$$y(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} d[Y(t)] = \frac{y}{y + s}, \quad (1)$$

где y — параметр распределения.

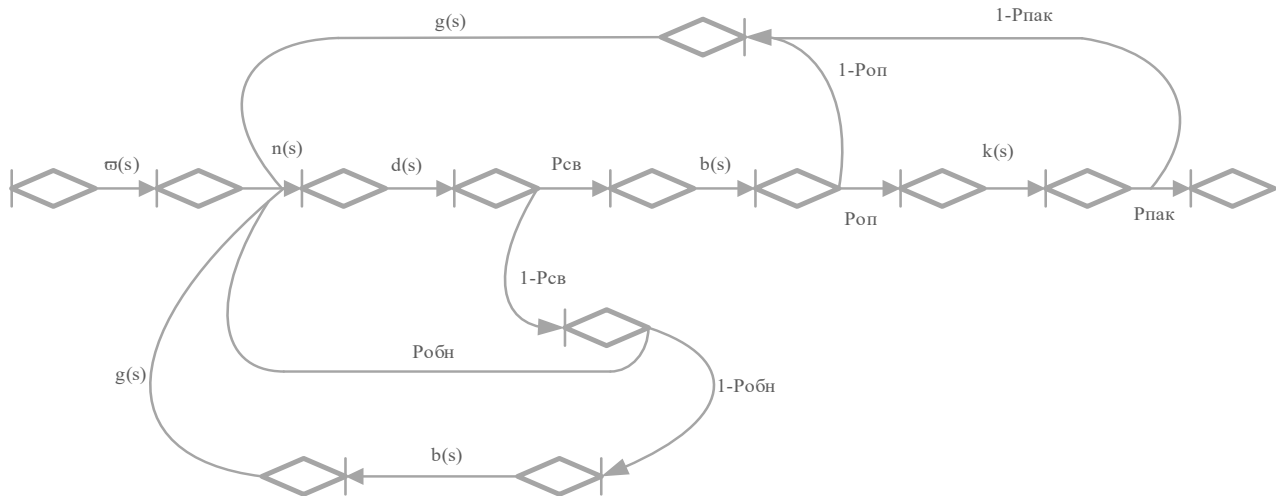


Рис. 1. Стохастическая сеть функционирования сети ПРС с общим каналом связи:

$P_{св}$ — вероятность наличия хотя бы одной свободной рабочей частоты; $P_{оп}$ — вероятность подтверждения успешного приема пакета; $P_{пак}$ — вероятность успешного приема пакета; $P_{обн}$ — вероятность обнаружения отсутствия свободной частоты; $\omega(s)$, $n(s)$, $d(s)$, $b(s)$, $k(s)$, и $g(s)$ — преобразования Лапласа функции распределения времени ожидания обслуживания, обработки и ввода в накопитель $U(t)$, контроля занятости радиоканала $D(t)$, однократной передачи пакета $B(t)$, подготовки и передачи пакета $K(t)$ и ожидания подтверждения о приеме пакета $G(t)$ соответственно

После проведения соответствующих преобразований, с учетом формулы (1), эквивалентная функция стохастической сети примет вид:

$$Q(s) = \frac{nabkP_{оп}P_{пак}(g+s)(1-\lambda h)}{s^5 + s^4A + s^3B + s^2C + sD + E}, \quad (2)$$

где $A = A1 - \lambda$; $B = B1 - \lambda A1$; $C = C1 - \lambda B1$; $C = C1 - \lambda B1$; $D = D1 - \lambda C1$; $E = E1 - \lambda (D1 - M)$;

$M = anbkP_{оп}P_{пак}$; $A1 = A2 + n$; $B1 = B2 + A2n$; $C1 = C2 + B2n$; $D1 = D2 + C2n$;

$A2 = a + b + k + g$; $B2 = (a + k)(g + b) + gb + ak$; $C2 = ak(g + b) + gb(a + k) - (1 - P_{оп})gab$;

$D2 = agbkP_{оп}P_{пак}$ — коэффициенты разложения, полученные при последовательном преобразовании эквивалентной функции; $n = 1/t_{ввн}$; $b = t_{оп}$; $k = 1/t_{пак}$; $g = 1/t_{ожп}$;

$\lambda = \lambda_i (0,01Z1 \% + 0,02Z2 \% + 0,03Z3 \% + \dots)$;

$$a = \left\{ -\frac{d}{ds} \left[\frac{d(s)P_{св}}{1 - (1 - P_{св})d(s)[P_{обн} + (1 - P_{обн})b(s)g(s)]} \right]_{s=0} \right\}^{-1} \quad \text{— интенсивность освобождения}$$

частотно-временного ресурса радиосети;

$$P_{св} = 1 - \frac{bP_0}{(f-1)!(fb - N\lambda)} \left(\frac{N\lambda}{b} \right)^f \quad \text{— вероятность наличия в произвольный момент времени хотя}$$

бы одной свободной единицы частотно-временного ресурса;

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^{f-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{\lambda}{b}\right)^i + \frac{b}{(f-1)!(fb - N\lambda)} \left(\frac{N\lambda}{b}\right)^f} \quad \text{— вероятность того, что все } f \text{ единиц частотно-}$$

временного ресурса будут свободны;

$P_{\text{обн}} = 1/\Gamma$ — вероятность обнаружения факта занятия частотно-временного ресурса сети корреспондентами других территориально разнесенных групп;

$$h = -\frac{d}{ds} \left[\frac{n(s)\alpha(s)b(s)k(s)P_{\text{оп}}P_{\text{пак}}}{1 - (1 - P_{\text{оп}})g(s)\alpha(s)b(s) - (1 - P_{\text{пак}})P_{\text{оп}}b(s)\alpha(s)k(s)g(s)} \right]_{s=0} \quad \text{— среднее время}$$

передачи сообщения в радиосети, без учета времени ожидания в очереди;

$$\alpha(s) = \frac{d(s)P_{\text{св}}}{1 - (1 - P_{\text{св}})d(s)[P_{\text{обн}} + (1 - P_{\text{обн}})b(s)g(s)]} \quad (3)$$

— эквивалентная функция стохастической сети, соответствующей процессу доступа корреспондента к частотно-временному ресурсу сети.

Анализ формулы (2) показывает, что эквивалентная функция является алгебраической дробно-рациональной функцией, имеющей простые или комплексно-сопряженные полюса слева от абсциссы в полуплоскости абсолютной сходимости интеграла Лапласа. Следовательно, указанная функция может быть представлена в виде ряда вычетов, количество членов которого определяется числом полюсов (в нашем случае их пять), т. е:

$$Q(s) = \sum_{i=1}^5 \frac{nabkP_{\text{оп}}P_{\text{пак}}(g+s_i)(1-\lambda h)}{5s_i^4 + 4s_i^3A + 3s_i^2B + 2s_iC + D} \cdot \frac{1}{s-s_i},$$

где s_i — простые или комплексно-сопряженные нули знаменателя формулы (2), определяемые численными методами.

Осуществляя почленный переход в пространство оригиналов, получим:

$$f(t) = \sum_{i=1}^5 \frac{nabkP_{\text{оп}}P_{\text{пак}}(g+s_i)(1-\lambda h)}{5s_i^4 + 4s_i^3A + 3s_i^2B + 2s_iC + D} \cdot \exp[s_it].$$

Отсюда, искомая функция распределения времени передачи сообщений в радиосети с общим каналом связи:

$$F(t) = \sum_{i=1}^5 \frac{nabkP_{\text{оп}}P_{\text{пак}}(g+s_i)(1-\lambda h)}{[5s_i^4 + 4s_i^3A + 3s_i^2B + 2s_iC + D](-s_i)} \cdot [1 - \exp(s_it)]. \quad (4)$$

Результаты расчетов по формуле (4) представлены на рис. 2, 3.

При проведении расчетов рассматривалась система автоматической установки связи ALE (Automatic Link Establishment), которая лежит в основе стандарта радиосвязи MIL-STD-188-141B:

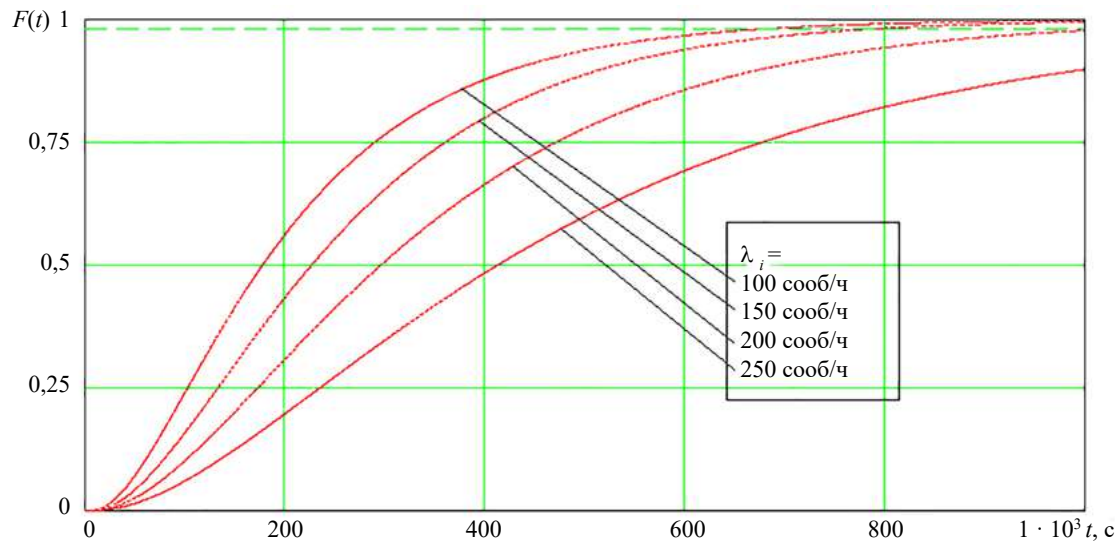


Рис. 2. Вид функции распределения времени передачи сообщений в радиосети с общим каналом связи

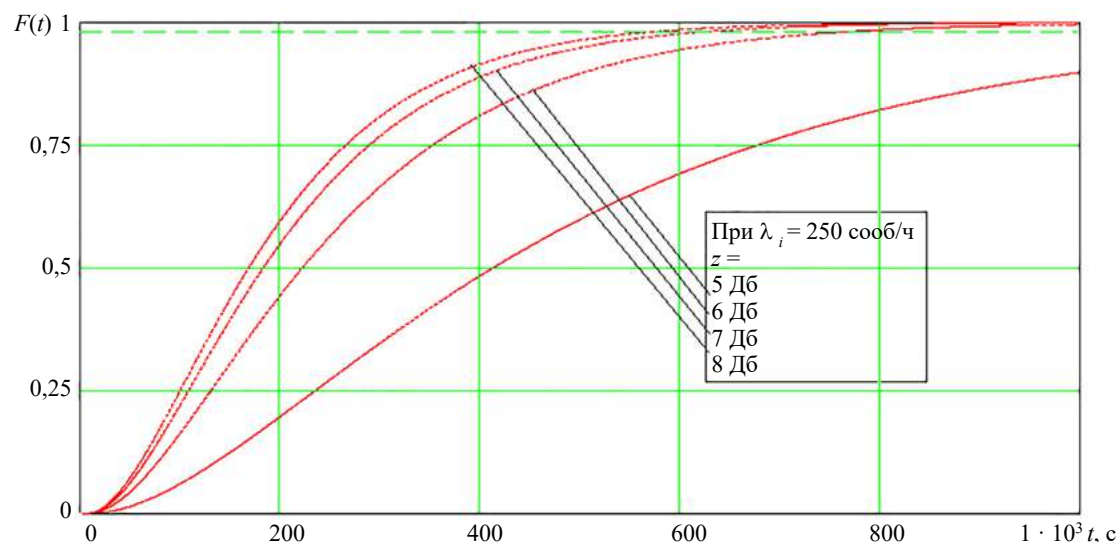


Рис. 3. Вид функции распределения времени передачи сообщений в зависимости от отношения сигнал/шум в радиосети с общим каналом связи

– объем передаваемых сообщений: $V = 300$ бит;
 – скорость передачи информации: $R = 9600$ бит/с;
 – среднее время обработки и ввода сообщения в накопитель: $t_{\text{ввн}} = 5$ с;
 – среднее время ожидания пакета: $t_{\text{ожп}} = 5$ с;
 – используемый корректирующий код: Код Голя (23,12);
 – среднее время подготовки и передачи пакета: $t_{\text{пак}} = 2,8$ с;

– среднее время контроля занятости рабочей частоты: $t_{\text{кз}} = 10$ с;
 – вероятность успешного приема однократно переданного пакета: $P_{\text{оп}} = 0,8$;
 – вероятность успешного приема пакета: $P_{\text{пак}} = 0,98$;
 – количество корреспондентов радиосети $N = 100$;
 – число территориально рассредоточенных групп корреспондентов $\Gamma = 10$;

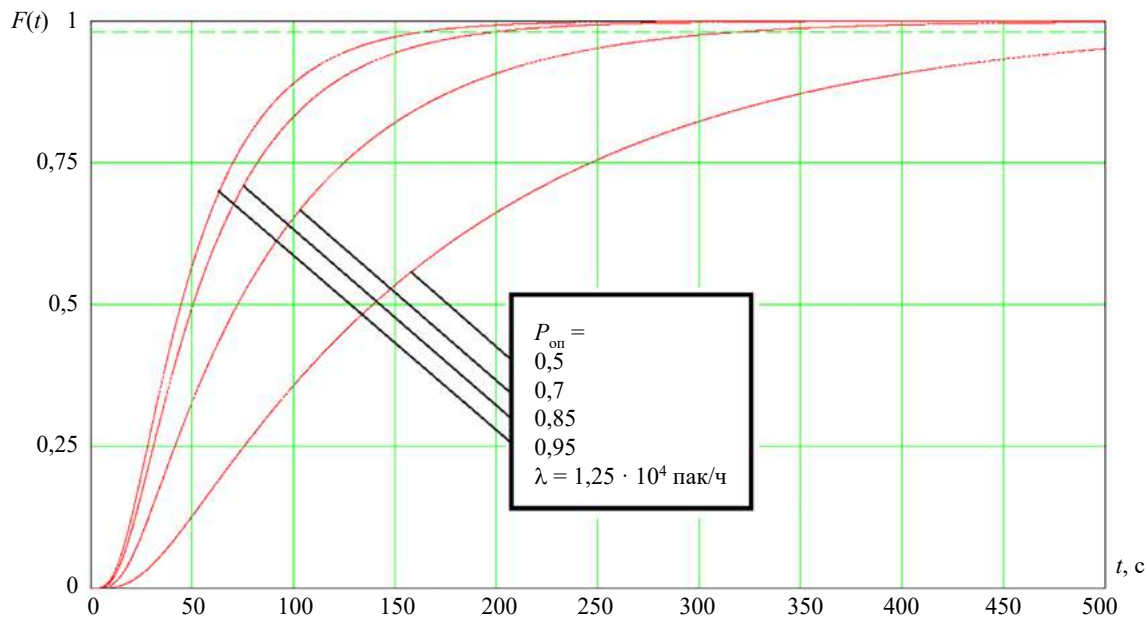


Рис. 4. Вид функции распределения времени передачи пакета данных в зависимости от вероятности успешного приема

– доля сообщений, передаваемых в виде одного пакета $Z1 \% = 60 \%$; двух пакетов — $Z2 \% = 30 \%$; трех пакетов — $Z3 \% = 10 \%$.

– интенсивность входящего потока сообщений изменялась в пределах $100 \leq \lambda_i \leq 250$ сообщений в час;

– соотношение сигнал/шум в канале передачи $z = 5$ дБ;

Следует отметить, что полученные результаты моделирования практически совпадают с данными, полученными методом статистического моделирования, что подтверждает адекватность и работоспособность разработанной модели.

Представленная модель обладает достаточной общностью и, при подстановке соответствующих исходных данных и небольшой корректировке, позволяет оценивать и другие виды радиосетей с общим каналом и случайным доступом. Корректировка производится того фрагмента стохастической сети, который отражает особенности используемого протокола многостанционного доступа. В эквивалентной функции формулы (2) эти особенности учитываются параметром a , определяемым из эквива-

лентной функции стохастической сети используемого протокола.

Так, например, для сетей пакетной радиосвязи с настойчивым многостанционным доступом с немедленной первой передачей указанный параметр определяется из эквивалентной функции (см. формулу 3).

$$\alpha(s) = \frac{d(s)P_{cb}}{1 - (1 - P_{cb})r(s)} = \frac{dP_{cb}(r+s)}{(d+s)(rP_{cb}+s)}$$

как

$$a = \frac{-d}{ds} \left[\frac{\alpha(s)}{\alpha(0)} \right]_{s=0} = \frac{1}{t_{кз} + (1 - P_{cb})t_{п}}, \quad (5)$$

где $t_{п}$ — интервал между повторными попытками передачи пакета, определяемый из условия $0 < t_{п} < [1 - \lambda t_{оп}]/\lambda$. При ненастойчивом многостанционном доступе $t_{п} = (1 - P_{cb})/(fb - N\lambda)$.

Результаты расчетов значений функции распределения времени передачи пакета данных представлены на рис. 4.

При проведении расчетов предполагалось, что длительность пакета данных составляет 3 с,

а время паузы между повторными попытками передачи и контроля занятости рабочего канала равны 1 с и 0,5 с соответственно. При этом интенсивность входящего потока полагалось равной $1,25 \cdot 10^4$ пакетов в час, а вероятность успешного приема однократно переданного пакета данных изменялась в пределах $0,5 \leq P_{\text{оп}} \leq 0,95$. Полученные результаты хорошо согласуются с ранее известными данными.

Выводы

1. В результате исследования разработана математическая модель, позволяющая оценивать время гарантированной доставки пакета данных до абонента сети ПРС. Предложенная модель учитывает используемый протокол многостанционного доступа.

2. Получены зависимости функции распределения времени гарантированной доставки информации от отношения сигнал/шум и вероятности успешного приема.

3. Предложенная модель адекватно отображает процесс информационного обмена между абонентами сети ПРС с общим каналом связи, что подтверждают полученные результаты моделирования, которые совпадают с данными статистического моделирования.

4. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании реальных систем радиосвязи, функционирующих в условиях сложной радиоэлектронной обстановки.

Библиографический список

1. Приказ Минтранса России от 21 декабря 2010 г. № 286 (ред. от 25 ноября 2018 г.) «Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации» (зарегистрировано в Минюсте России 28 января 2011 г. № 19627).
2. ГОСТ 33973—2016. Железнодорожная электросвязь. Поездная радиосвязь. Технические требования и методы контроля. — М.: Росстандарт России, 2019. — 28 с.
3. Методические указания по организации и расчету сетей поездной радиосвязи ОАО «РЖД» от 23 декабря 2013 г. № 2854.
4. ГОСТ Р 50657—94. Устройства радиопередающие всех категорий и назначений народнохозяйственного применения. Требования к допустимым отклонениям частоты, методы измерений и контроля. — М.: Госстандарт России, 1995. — 23 с.
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1—99. Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. Часть 1. Базовая модель. — М.: Госстандарт России, 2006. — 58 с.
6. Болдинов А. М. Математическая модель канала управления стандарта радиосвязи GSM-R / А. М. Болдинов, А. А. Привалов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 743–751. — DOI: 10/20295/1815-588X-2022-4-743-751.
7. Перегудов М. А. Вероятностная модель функционирования канального уровня сети цифровой радиосвязи в условиях деструктивных воздействий / М. А. Перегудов // Системы управления, связи и безопасности. — 2023. — № 1. — С. 64–89. — DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-64-89.
8. Алекаев А. Е. Модель многоступенчатой адаптации низкоэнергетической радиолинии коротковолнового диапазона с учетом затрачиваемых ресурсов радиолинии и прогнозирования сигнально-помеховой обстановки / А. Е. Алекаев, В. А. Липатников, Р. Ю. Ряскин и др. // Системы управления, связи и безопасности. — 2020. — № 3. — С. 158–183. — DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10305.
9. Дворников С. В. Оценка помехозащищенности линий радиосвязи с медленной псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / С. В. Дворников, Я. А. Домбровский, М. А. Семисошенко и др. // Информация и Космос. — 2016. — № 4. — С. 11–14.
10. Григорьева Е. И. Математическая модель для оценки качества функционирования средств радиосвязи в гражданской авиации / Е. И. Григорьева // Научный вестник Московского государственного технического

университета гражданской авиации. — 2016. — № 225(3). — С. 98–104.

Дата поступления: 04.10.2023

Решение о публикации: 16.11.2023

Контактная информация:

ПРИВАЛОВ Андрей Андреевич — д-р воен. наук, проф.; aprivalov@inbox.ru

КАЗАКЕВИЧ Елена Владимировна — канд. техн. наук, доц.

ГЛУХОВ Иван Александрович — аспирант, ivan.gluhov.960709@gmail.com

A Model of the Process of Information Exchange Between Subscribers of the PRC Network with a Common Communication Channel

A. A. Privalov, Ye. V. Kazakevich, I. A. Glukhov

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

For citation: Privalov A. A., Kazakevich Ye. V., Glukhov I. A. A Model of the Process of Information Exchange Between Subscribers of the PRC Network with a Common Communication Channel // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 921–930. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-921-930

Summary

Purpose: To analyse the quality of operation of the PRC network, enabling the evaluation of time of guaranteed delivery of data packets to the subscribers of the network in bad radio-electronic conditions. **Methods:** To address the problem, methods from the general theory of systems, probability theory, queuing theory, as well as the method of topological transformation of stochastic networks (TTSN) have been used. **Results:** The developed model allows us to estimate the quality of functioning of the packet radio communications network, which allows us to determine the main directions to improve the interference immunity of PRC networks from the effects of random and intentional interference. **Practical significance:** The obtained results can be used in the design of mobile radio networks of the ALE standard, as well as in the development of methods to improve the interference immunity of radio networks, multi-parameter adaptation systems.

Keywords: PRC network, ALE, SW radiocommunication, model, stochastic network.

References

1. *Prikaz Mintransa Rossii ot 21 dekabrya 2010 g. № 286 (red. ot 25 noyabrya 2018 g.) “Ob utverzhdenii Pravil tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznikh dorog Rossiyskoy Federatsii” (zaregistrovano v Minyuste Rossii 28 yanvarya 2011 g. № 19627)* [Order of the Ministry of Transport of Russia dated December 21, 2010 № 286 (as amended on November 25, 2018) “On approval of the Rules for the technical operation of railways of the Russian Federation” (registered with the Ministry of Justice of Russia on January 28, 2011 № 19627)]. (In Russian)

2. *GOST 33973—2016. Zheleznodorozhnaya elektro-svyaz’. Poezdnyaya radiosvyaz’. Tekhnicheskie trebovaniya i metody kontrolya* [GOST 33973—2016. Railway telecommunications. Train radio communication. Technical requirements and control methods]. M.: Rosstandart Rossii Publ., 2019, 28 p. (In Russian)

3. *Metodicheskie ukazaniya po organizatsii i raschetu setey poezdnoy radiosvyazi OAO “RZhD” ot 23 dekabrya 2013 g. № 2854* [Guidelines for organizing and calculating train radio communication networks of JSC Russian Railways dated December 23, 2013 № 2854]. (In Russian)

4. GOST R 50657—94. *Ustroystva radiopere dayushchie vsekh kategoriy i naznacheniy narodnokhozyaystvennogo primeneniya. Trebovaniya k dopustimym otkloneniyam chastoty, metody izmereniy i kontrolya* [GOST R 50657—94. Radio transmitting devices of all categories and purposes for national economic use. Requirements for permissible frequency deviations, measurement and control methods]. Moscow: Gosstandart Rossii Publ., 1995, 23 p. (In Russian)

5. GOST R ISO/IEC 7498-1—99. *Informatsionnaya tekhnologiya. Vzaimosvyaz' otkrytykh sistem. Bazovaya etalonnaya model'. Chast' I. Bazovaya model'* [GOST R ISO/IEC 7498-1—99. Information technology. Interconnection of open systems. Basic reference model. Part 1. Basic model]. Moscow: Gosstandart Rossii Publ., 2006, 58 p. (In Russian)

6. Boldinov A. M., Privalov A. A. Matematicheskaya model' kanala upravleniya standarta radiosvyazi GSM-R [Mathematical model of the control channel of the GSM-R radio communication standard]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2022, vol. 19, Iss. 4, pp. 743–751. DOI: 10/20295/1815-588Kh-2022-4-743-751. (In Russian)

7. Peregudov M. A. Veroyatnostnaya model' funktsionirovaniya kanal'nogo urovnya seti tsifrovoy radiosvyazi v usloviyakh destruktivnykh vozdeystviy [Probabilistic model of the functioning of the channel level of a digital radio communication network under conditions of destructive influences]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Control, communication and security systems]. 2023, Iss. 1, pp. 64–89. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-64-89. (In Russian)

8. Alekaev A. E., Lipatnikov V. A., Ryaskin R. Yu. et al. Model' mnogostupenchatoy adaptatsii nizkoenergeticheskoy radiolinii korotkovolnovogo diapazona s uchetom

zatrachivaemykh resursov radiolinii i prognozirovaniya signal'no-pomekhovoy obstanovki [Model of multi-stage adaptation of a low-energy radio link in the short-wave range, taking into account the expended resources of the radio link and forecasting the signal-interference situation]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Control Systems, communications and security]. 2020, Iss. 3, pp. 158–183. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10305. (In Russian)

9. Dvornikov S. V., Dombrovskiy Ya. A., Semisoshenko M. A. et al. Otsenka pomekhozashchishchennosti liniy radiosvyazi s medlennoy psevdosluchaynoy perestroykoy rabochey chastoty [Assessment of noise immunity of radio communication lines with slow pseudo-random tuning of the operating frequency]. *Informatsiya i Kosmos* [Information and Space]. 2016, Iss. 4, pp. 11–14. (In Russian)

10. Grigor'eva E. I. Matematicheskaya model' dlya otsenki kachestva funktsionirovaniya sredstv radiosvyazi v grazhdanskoy aviatsii [Mathematical model for assessing the quality of functioning of radio communications in civil aviation]. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii* [Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation]. 2016, Iss. 225(3), pp. 98–104. (In Russian)

Received: October 04, 2023

Accepted: November 16, 2023

Author's information:

Andrey A. PRIVALOV — Dr. Sci. in Military, Professor;
apivalov@inbox.ru

Elena V. KAZAKEVICH — PhD in Engineering,
Associate Professor

Ivan A. GLUKHOV — Postgraduate Student;
ivan.gluhov.960709@gmail.com

УДК 624.21.016

Конструктивно-технологический аспект возведения сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста через реку Ветлугу

Ю. Н. Зуев, С. В. Чижов, Ю. В. Авдей, А. А. Антонюк

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

Для цитирования: Зуев Ю. Н., Чижов С. В., Авдей Ю. В., Антонюк А. А. Конструктивно-технологический аспект возведения сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста через реку Ветлугу // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 931–942. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-931-942

Аннотация

Цель: Рассмотреть конструктивно-технологические особенности возведения сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста через реку Ветлугу. Рассмотреть вопросы создания расчетной модели в программном комплексе Midas Civil с учетом представленных требований для удовлетворения требований ГОСТ и СП. Привести подробный анализ напряженно-деформированного состояния модели на основе расчета созданной модели. **Методы:** Анализ конструкции и выделение основных параметров; сравнение расчетных моделей, полученных с учетом стадийности бетонирования монолитной железобетонной плиты проезжей части и без учета стадийности работ. **Результаты:** Произведен анализ напряженно-деформированного состояния, и рассмотрены конструктивно-технологические особенности возведения автодорожного моста через р. Ветлугу. Установлено, что напряжения в металлических главных балках значительно возрастают в сравнении с моделью, не учитывающей стадийность возведения. Совместная работа сталежелезобетонного сечения начинается только после набора прочности монолитной железобетонной плиты проезжей части. Установлено, что развитие трещин в бетоне в опорных зонах, вызванных отрицательными моментами, может быть учтено снижением модуля упругости бетона в приопорных зонах в 8 раз. Произведен анализ изменения напряжений и деформаций в конструкции по стадиям. Напряжения и деформации, возникающие в конструкции при ее возведении, при расчете по стадиям «наследуются» от одного этапа к другому. **Практическая значимость:** Показаны способы создания достоверной расчетной модели сталежелезобетонных пролетных строений, отражающей действительный характер работы конструкции как на этапе сооружения, так и на этапе эксплуатации. Описанные в статье методы могут быть рекомендованы для создания расчетной модели в программном комплексе Midas Civil с учетом представленных требований для удовлетворения требований ГОСТ и СП, а также помогут избежать аварий на всех этапах жизненного цикла сооружения.

Ключевые слова: Сталежелезобетонное пролетное строение, автодорога, многопролетный мост, расчетная модель, напряженно-деформированное состояние, сталежелезобетон.

Актуальность работы

Как показывает практика, существуют случаи аварий при строительстве и эксплуатации мостовых переходов со сталежелезобетонными пролетными строениями, расчет которых был выполнен без учета стадийности возведения [1]. Именно поэ-

тому важнейшим условием проектирования сталежелезобетонных пролетных строений мостов является учет стадий их сооружения. Расчеты по этапам позволяют получить более точное представление о напряженно-деформированном состоянии конструкции на различных стадиях ее строительства.

При проведении расчетов по этапам учитываются последовательность и динамика выполнения различных технологических операций процесса строительства, таких как укладка бетона, предварительное напряжение арматуры или устройство мостового полотна. Каждый этап имеет свою особенность и может вызвать изменения в напряженно-деформированном состоянии конструкции.

С помощью метода расчета по этапам можно оценить поведение конструкции при каждом этапе возведения и определить критические фазы, которые требуют дополнительного контроля или корректировок проекта. Это позволяет инженерам прогнозировать возможные деформации и напряжения в конструкции на всех этапах жизненного цикла сооружения для обеспечения соответствия требованиям безопасности и надежности.

В целом учет стадийности расчета при проектировании сталежелезобетонных пролетных строений мостов является важным шагом для получения достоверной картины напряженно-деформированного состояния и обеспечения безопасности конструкции.

При проектировании автодорожного моста через реку Ветлугу необходимо было учесть современные требования к расчету сталежелезобетонных пролетных строений. Для этого производился расчет с использованием расчетного программного комплекса.

Объект исследования — сталежелезобетонные пролетные строения автодорожного моста через реку Ветлугу.

Предмет исследования — напряженно-деформированное состояние пролетных строений в ходе процесса монтажа.

Целью исследования является создание рекомендаций по расчету сталежелезобетонных пролетных строений.

Задачами работы являются:

- проведение анализа существующих требований нормативной документации и их учета при

создании расчетной модели в программном комплексе;

- создание расчетной модели, отражающей стадийность расчета сталежелезобетонных пролетных строений автодорожного моста через реку Ветлугу.

При написании статьи применялись общелогические **методы научного исследования**: анализ, классификация, абстрагирование. Анализ производился для детального разбора данных с целью выявления ключевых элементов, которые могут помочь в понимании объекта исследования. Классификация помогла систематизировать информацию и провести анализ в рамках определенных параметров. Абстрагирование позволило сосредоточиться на самом существенном и развивать более глубокое понимание объекта исследования, игнорируя незначительные детали. Для получения картины напряженно-деформированного состояния объекта применялось моделирование конструкции с использованием метода конечных элементов в программном комплексе Midas Civil.

Описание конструкции

Мостовое сооружение через р. Ветлугу располагается в створе автомобильной дороги общего пользования регионального значения Костромской области Урень — Шарья — Никольск — Котлас на пересечении участка Шарья — Пыщуг с рекой Ветлугой.

Мостовое сооружение неразрезное балочное сталежелезобетонное, в поперечном сечении состоит из двух стальных главных балок коробчатого сечения, объединенных между собой стальными поперечными балками двутаврового сечения и ЖБ-плитой проезда (через гибкие стальные упоры) (рис. 1). Расстояние между осями коробчатых балок постоянное — 6,2 м. Высота пролетного строения в середине пролета — 3,38 м. Стыки главных балок болтосварные: стенка на высокопрочных болтах, пояса на сварке. Основ-

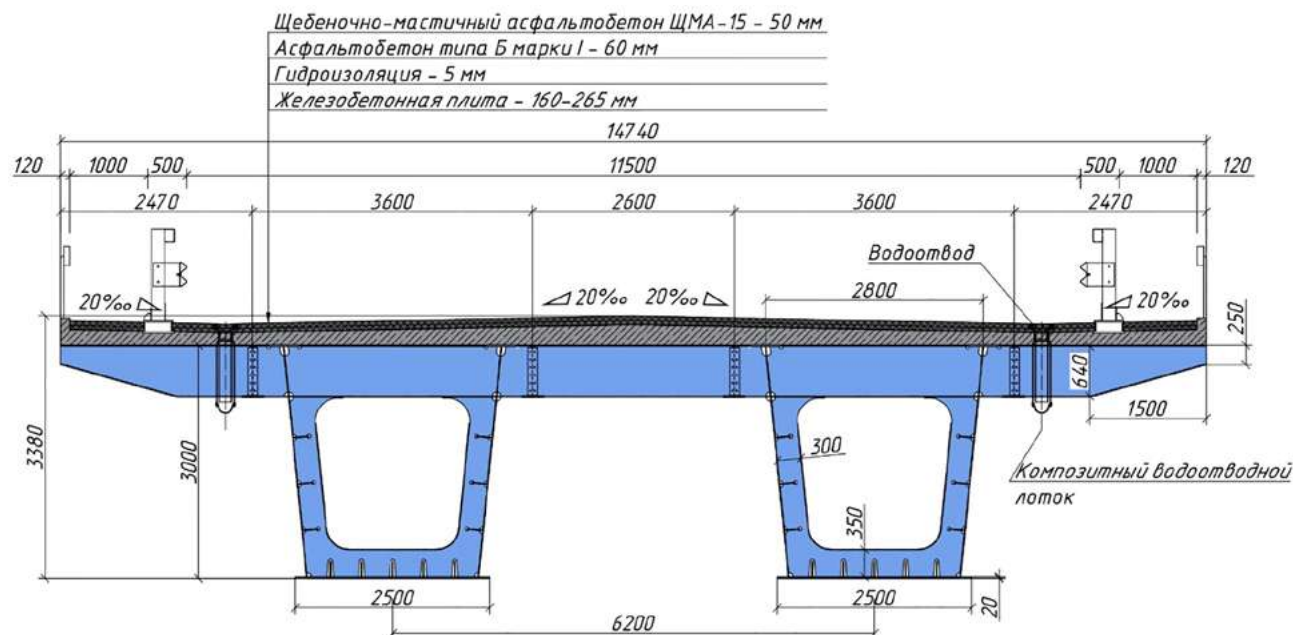


Рис. 1. Поперечное сечение пролетного строения

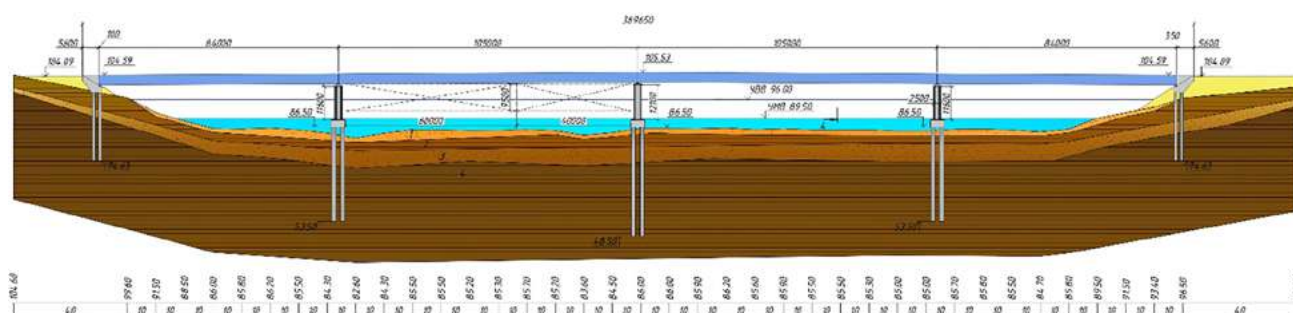


Рис. 2. Общий вид моста

ные металлоконструкции изготавливаются из низколегированного проката для мостостроения из стали марки 10ХСНД.

Устои обсыпные. Фундаменты крайних опор свайные, сваи объединены монолитным железобетонным ростверком. Сваи буронабивные диаметром 1,0 м.

Промежуточные опоры бетонные, монолитные. Фундаменты промежуточных опор свайные, сваи объединены монолитным железобетонным ростверком. Сваи буронабивные диаметром 1,5 м.

Ростверки, оголовки, шкафные стенки изготовлены из монолитного железобетона.

Схема моста: 42,0 + 73,5 + 73,5 + 73,5 + 42,0 м. Общая длина мостового перехода — 388,85 м (рис. 2).

Габарит проезжей части — Г-11,5 + 2 × 1,0.

Опираие пролетного строения на промежуточные опоры и устои осуществляется посредством шарово-сегментных опорных частей.

Основные объемы работ и материалов для возведения моста сведены в табл. 1.

Железобетонная плита выполнена из тяжелого бетона В35 F300 W12 (по ГОСТ 26633—2015). Для армирования железобетонной плиты применяется арматура классов А240, А400 (по ГОСТ 5781—82).

Создание расчетной модели

Вес пролетного строения — 41 069,69 кН (нагрузка собрана автоматически с помощью программного комплекса MIDAS).

Таблица 1. Объемы работ

Наименование работ	Ед. изм.	Кол-во
Устои		
Устройство буронабивных свай при диаметре ствола до 1,5 м, Ø1,0 м	м ³	510
Сооружение опор выше обреза фундамента из монолитного железобетона	м ³	340
Промежуточные опоры		
Устройство буронабивных свай при диаметре ствола до 1,5 м, Ø1,5 м	м ³	2625
Сооружение монолитного ЖБ-ростверка	м ³	750
Сооружение опоры выше обреза фундамента из монолитного железобетона бетона	м ³	1280
Пролетные строения		
Изготовление и монтаж (надвижка) сплошнотеччатых неразрезных пролетных строений пролетом до 100 м	т	1275
Устройство железобетонной плиты, включенной в совместную работу с главными балками без предварительного напряжения	м ³	1135
Устройство асфальтобетонного покрытия	м ²	5570

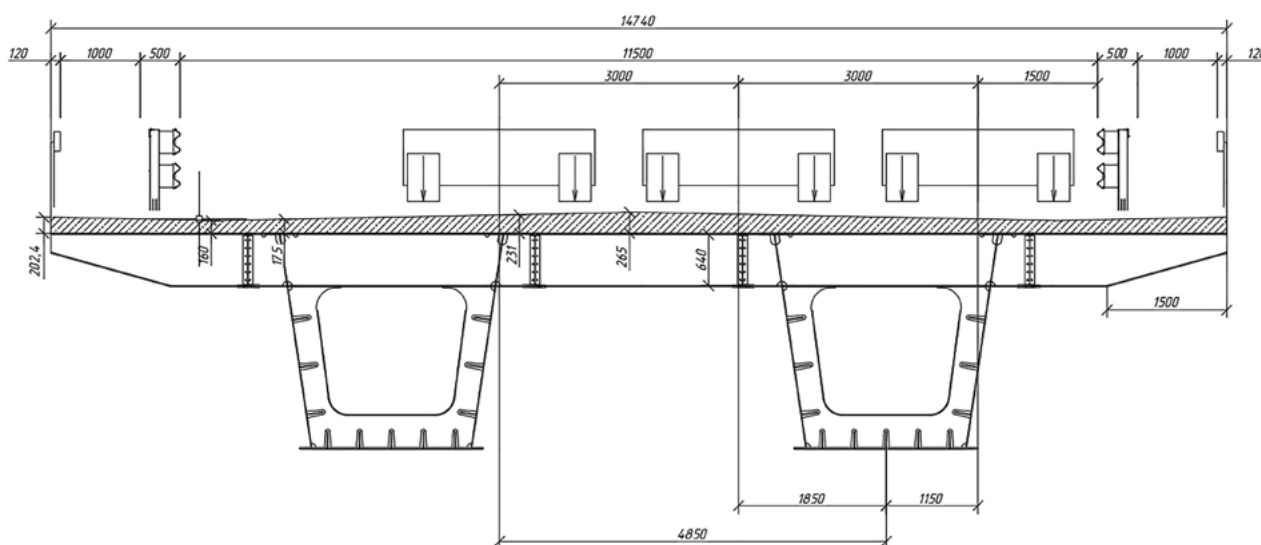


Рис. 3. Схема загрузки поперечного сечения полосами нагрузки АК

Собственный вес задается в программе в зависимости от свойств материала, из которого выполнен элемент. Программа автоматически определяет собственный вес и прикладывает нагрузку.

Вес дорожной одежды — 2,48 кН/м². Асфальтобетон прикладывается на всю поверхность моста, так как расположен по всей плоскости моста и определяется в зависимости от высоты асфальтобетонного покрытия (0,11 м).

Временная вертикальная нагрузка [2, п. 6.12] — максимальное количество полос движения, помеща-

ющихся на мосту, — 3 шт. Каждая из полос загружается нагрузкой А14. Временная нагрузка с классом нагрузки А14 задается в программе при помощи раздела Moving loads. Расстановка тележек производится в соответствии с п. 6.12 СП35.13330.2017 (рис. 3). В программе задаются коэффициенты надежности, коэффициенты поперечной установки в зависимости от количества тележек и класса нагрузки, в нашем случае класс нагрузки А14.

Сечения главных балок задаются через редактор сечений, поперечные балки задаются через свойства сечений (рис. 4).

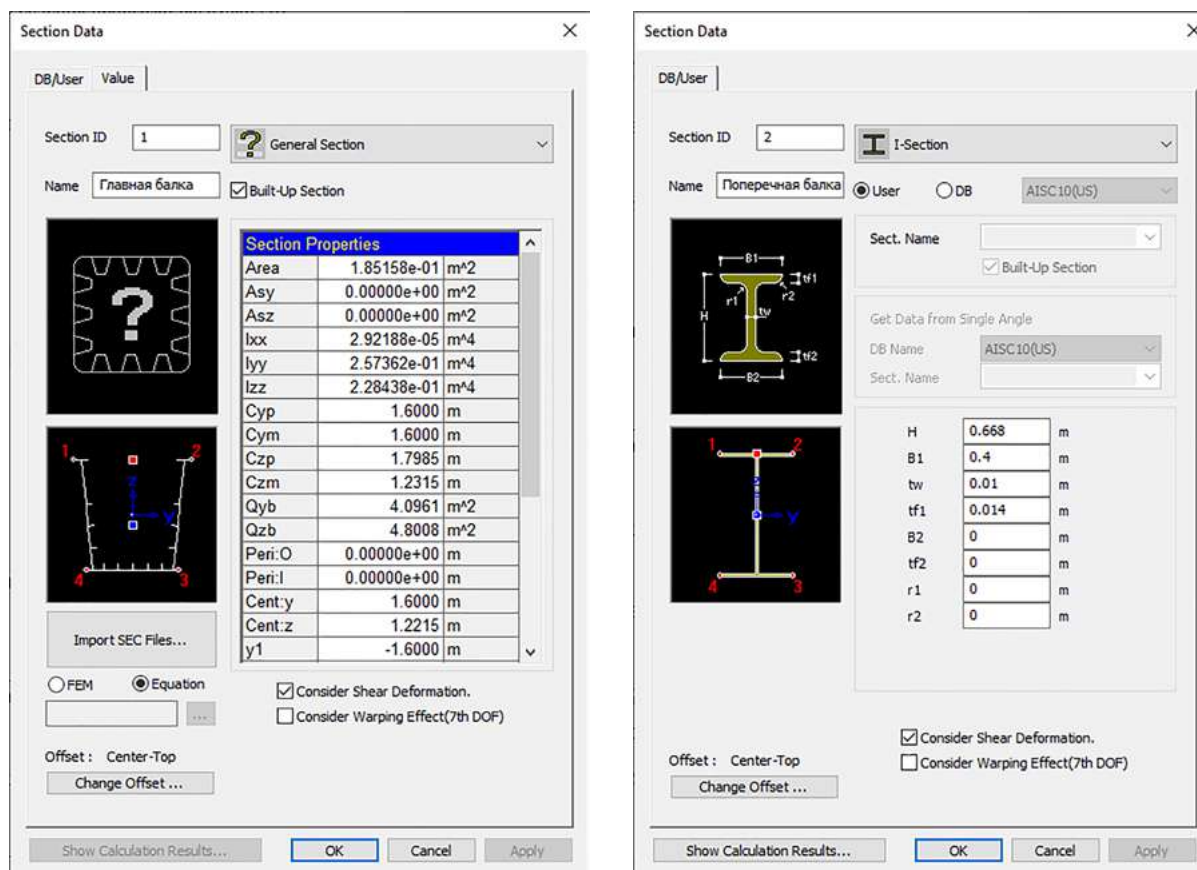


Рис. 4. Сечения главной и поперечной балок

Железобетонная плита проезжей части задается ступенчатой, всего 3 толщины. В опорных сечениях задаются диафрагмы [3] (рис. 5). Общий вид модели изображен на рис. 6, 7.

Расчет сталежелезобетонных мостов требуется вести с учетом стадийности бетонирования [4]. Всего в модели предусмотрено 7 стадий (рис. 8):

1. В проектное положение надвинуты металлические главные балки пролетных строений (главные балки, поперечные балки, диафрагмы), устройство опалубки в центральной зоне.

2. Укладка бетона монолитной железобетонной плиты проезда в центральной зоне.

3. Снятие опалубки центральной зоны и укладка бетона монолитной железобетонной плиты проезда в зоне «края 1».

4. Снятие опалубки в зоне «края 1» и укладка бетона монолитной железобетонной плиты проезда в зоне «края 2».

5. Снятие опалубки в зоне «края 2» и укладка бетона монолитной железобетонной плиты проезда в опорных зонах.

6. Снятие опалубки в опорных зонах.

7. Устройство мостового полотна.

Учет стадийности необходим, чтобы предотвратить обрушение пролетных строений на этапах эксплуатации и этапах возведения моста. Проблема в том, что совместная работа металлических главных балок и железобетонной монолитной плиты проезда за счет объединения гибкими упорами начинается после набора бетоном прочности [5]. На этапе монтажа главные балки воспринимают нагрузку от собственного веса и уложенного в опалубку жидкого бетона, что приводит к увеличению напряжений в металле [6, 7]. Моделирование стадий возведения в расчетном комплексе позволяет с помощью наследования получить достоверные значения усилий и напря-

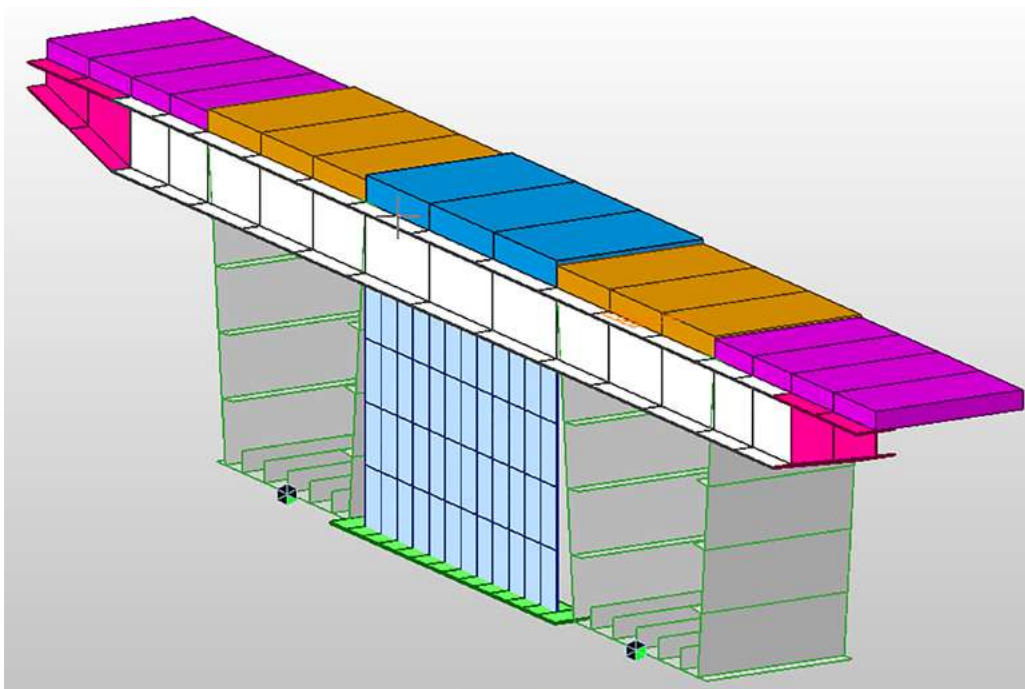


Рис. 5. Поперечное сечение над опорой

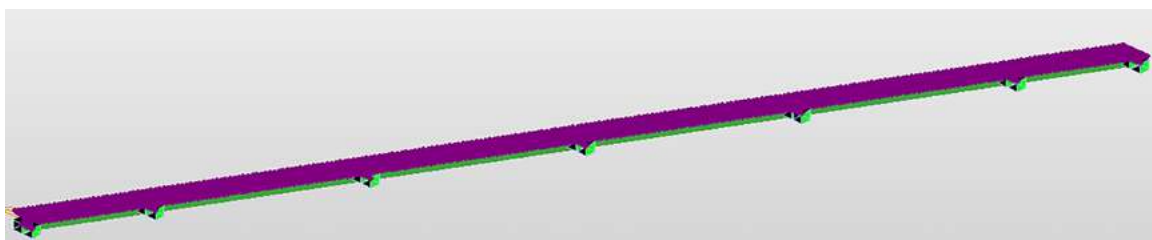


Рис. 6. Общий вид модели

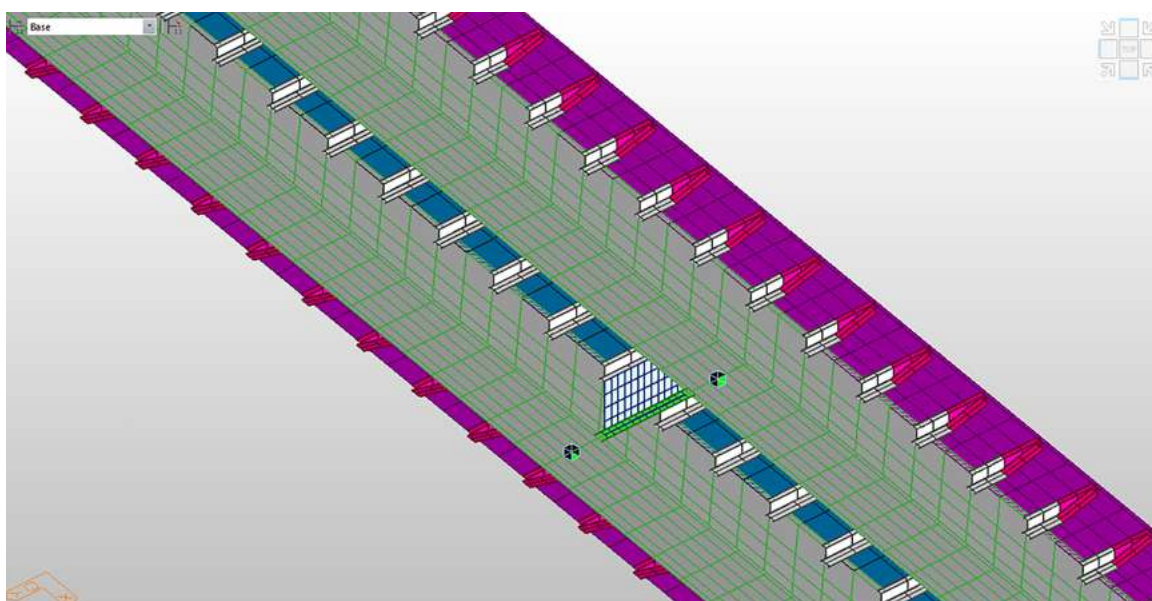


Рис. 7. Вид на модель снизу

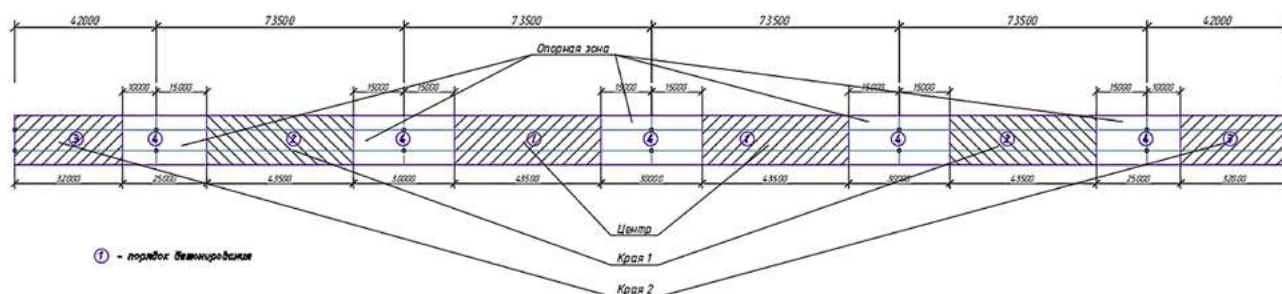


Рис. 8. Стадийность бетонирования

жений в элементах расчетной модели мостового перехода и избежать аварии.

В соответствии с нормативной документацией при расчете сталежелезобетонных пролетных строений требуется учесть усадку и ползучесть бетона. Усадка бетона — это его свойство уменьшаться в объеме после набора прочности. Подобный эффект может привести к изменению напряженно-деформированной системы. Ползучесть бетона связана с деформациями бетона под нагрузкой, что также

вызывает неупругие пластические деформации, влияющие на перераспределение усилия.

На вкладках creep/shrinkage, comp. strength задаются свойства бетона от времени, учитывающие усадку и ползучесть, твердение (рис. 9, 10) [8].

Трещины в растянутой зоне плиты в приопорных зонах учитываются путем снижения модуля бетона в 7-8 раз [9].

Для расчета на прочность все нагрузки задаются расчетными. Для проверки по 2 группе предельных состояний создается отдельная модель с нормативными нагрузками.

Construction Stage

Name	Duration	Date	Step	Result
1	30	30	0	Stage
2	30	60	0	Stage
3	30	90	0	Stage
4	30	120	0	Stage
5	30	150	0	Stage
6	30	180	0	Stage
7	10000	10180	5	Stage,...

Buttons: Add, Insert Prev, Insert Next, Generate, Modify/Show, Delete, Close

Рис. 9. Задание стадий в программном комплексе

Анализ полученных результатов

После создания расчетной модели были получены результаты напряженно-деформированного состояния конструкции. Рассмотрим численные результаты наибольших напряжений, возникающих в главных металлических балках. Для удобства результаты сведены в табличную форму (табл. 2).

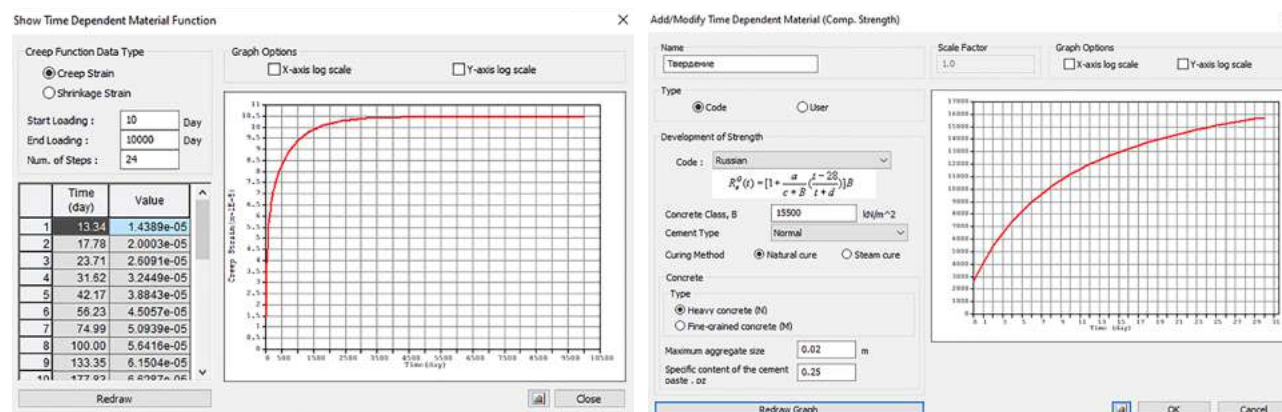
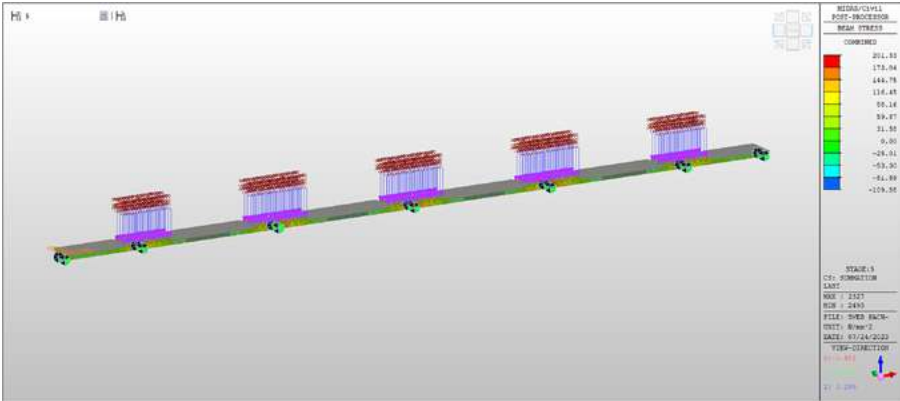
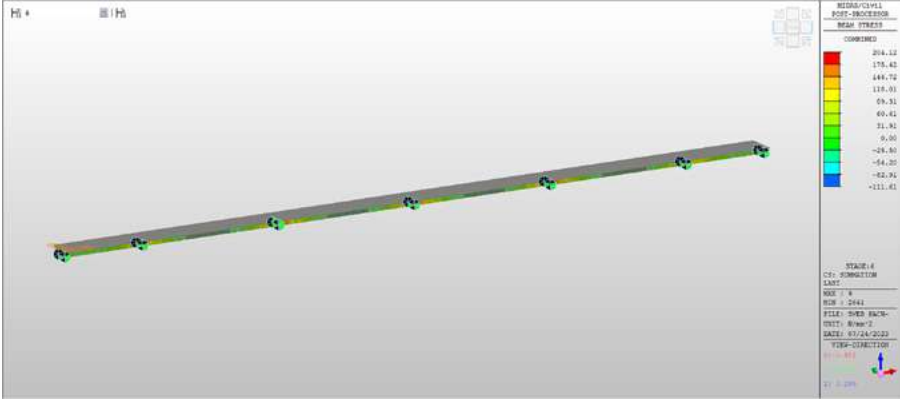
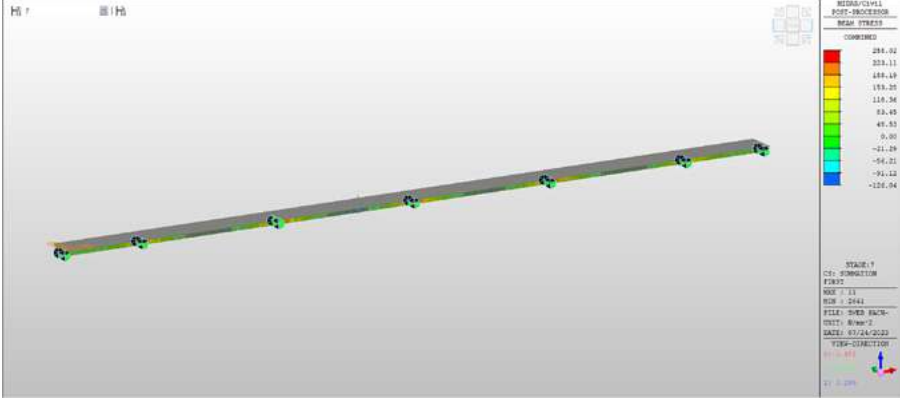
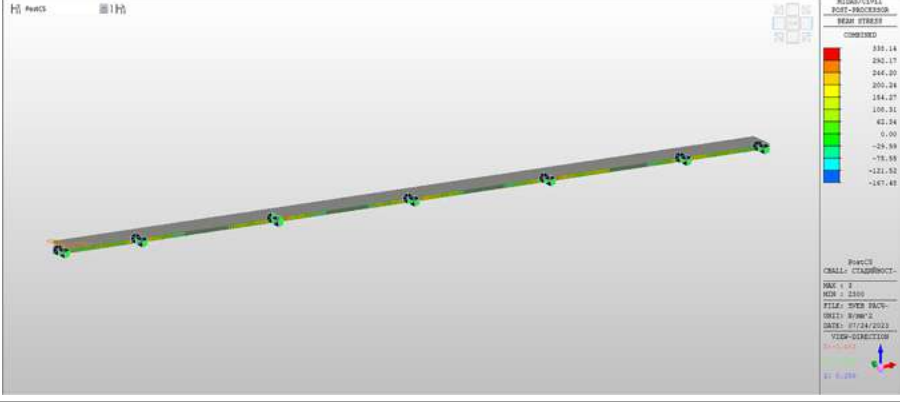


Рис. 10. Графики изменений свойств бетона по времени

Таблица 2. Анализ изменений в напряженно-деформированном состоянии по стадиям монтажа и эксплуатации

Название этапа	$\sigma_{\max}$, МПа	Рисунок
Этап 1	63,67	Рисунок 1: Модель моста на этапе 1. Максимальное напряжение: 63,67 МПа.
Этап 2	171,90	Рисунок 2: Модель моста на этапе 2. Максимальное напряжение: 171,90 МПа.
Этап 3	172,29	Рисунок 3: Модель моста на этапе 3. Максимальное напряжение: 172,29 МПа.
Этап 4	176,05	Рисунок 4: Модель моста на этапе 4. Максимальное напряжение: 176,05 МПа.

Окончание табл. 2

Название этапа	$\sigma_{\max}$, МПа	Рисунок
Этап 5	201,33	
Этап 6	204,12	
Этап 7	258,02	
Эксплуатация (расчетная подвижная нагрузка)	338,14	

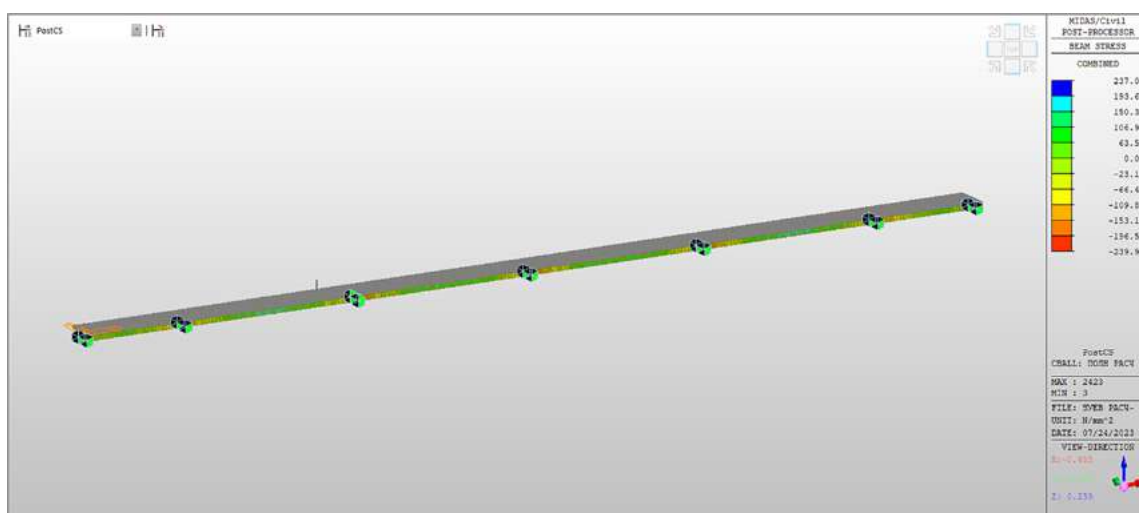


Рис. 11. Наибольшие напряжения в главных балках (239,90 МПа) при загрузке временной подвижной расчетной нагрузкой без учета стадийности

Для сравнения результатов была создана модель, не учитывающая стадийность возведения. В такой модели совместность работы сечений начинается сразу, что невозможно при укладке монолитного бетона железобетонной плиты проезда. Результаты расчета от полной расчетной нагрузки представлены на рис. 11.

В процентном соотношении при расчете по этапам напряжения в металлических главных балках возросли на 40,95 %.

Исходя из полученных результатов становится ясно, что совместная работа сталежелезобетонного сечения начинается только после набора прочности бетоном. До тех пор всю нагрузку от жидкого бетона, уложенного в опалубку, воспринимают металлические главные балки. После застывания бетонной смеси напряженно-деформированное состояние не изменяется, наследуя напряжения на следующую стадию, т. е. релаксации напряжений в металлических главных балках не происходит.

Заключение

1. Произведен анализ напряженно-деформированного состояния, и рассмотрены конструктивно-технологические особенности возведения

автодорожного моста через р. Ветлугу. Напряжения в металлических главных балках значительно возрастают в сравнении с моделью, не учитывающей стадийность возведения. Совместная работа сталежелезобетонного сечения начинается только после набора прочности монолитной железобетонной плиты проезжей части.

2. Развитие трещин в бетоне в опорных зонах, вызванных отрицательными моментами, могут быть учтены снижением модуля упругости бетона в приопорных зонах в 8 раз.

3. Напряжения и деформации, возникающие в конструкции при ее возведении, при расчете по стадиям «наследуются» от одного этапа к другому.

Библиографический список

1. Овчинников И. И. Анализ аварии мостового сооружения из-за неучета стадийности его возведения / И. И. Овчинников, Ш. Н. Валиев, О. Н. Герасимов и др. // Дороги и мосты. — 2022. — № 48. — С. 140–166.
2. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03—84. Мосты и трубы. — М.: ОАО «ЦПП», 2011.
3. Морид А. М. Опорные диафрагмы в зонах разделения сталежелезобетонных пролетных строений / А. М. Морид // Наука и современность. — 2012.

4. ГОСТ Р 59788—2021. Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Правила расчета сталежелезобетонных пролетных строений. — Введен с 01.01.2022 // Информационная система Norma CS.

5. Лыкова А. В. Анализ способов объединения бетона и стали в сталежелезобетонных мостах / А. В. Лыкова, Л. П. Абашева // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. — 2016. — № 2. — С. 86–91.

6. Козлов А. В. Расчет сталежелезобетонных мостов с учетом сдвига плиты по верхнему поясу балки / А. В. Козлов // Строительная механика и конструкции. — 2018. — № 4. — С. 64–71.

7. Морид А. М. Исследование работы сталежелезобетонных пролетных строений мостов в программном комплексе Femap & Nastran / А. М. Морид, В. И. Попов // Наука и современность. — 2012.

8. Краснов С. Н. Конструктивная система сталежелезобетонных мостов / С. Н. Краснов, Е. С. Краснова, Е. А. Вихров // Вестник Харьковского национального

автомобильно-дорожного университета. — 2012. — № 58. — С. 65–69.

9. Белуцкий И. Ю. Конструктивно-технологические особенности проектов реконструкции сталежелезобетонных мостов в разработках ТОГУ / И. Ю. Белуцкий, И. В. Лазарев, А. В. Лапин // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения. — 2020. — С. 72–77.

Дата поступления: 27.07.2023

Решение о публикации: 29.09.2023

Контактная информация:

ЗУЕВ Юрий Николаевич — аспирант;

zuew.yury2015@yandex.ru

ЧИЖОВ Сергей Владимирович — канд. техн. наук, доц.;
sergchizh@yandex.ru

АВДЕЙ Юлия Владимировна — канд. пед. наук, доц.;

АНТОНЮК Анатолий Анатольевич —
aaa.12.03.1992@mail.ru

Structural-Technological Aspect of Erection of Steel Reinforced Concrete Span Structure of the Road Bridge Over the Vetluga River

Yu. N. Zuev, S. V. Chizhov, Yu. V. Avdey, A. A. Antoniuk

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

For citation: Zuev Yu. N., Chizhov S. V., Avdey Yu. V., Antoniuk A. A. Structural-Technological Aspect of Erection of Steel Reinforced Concrete Span Structure of the Road Bridge Over the Vetluga River // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 931–942. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-931-942

Summary

Purpose: To consider structural and technological aspects of construction of steel reinforced concrete span of road bridge over the Vetluga River. To consider the issues of creating a computational model in the Midas Civil program complex with regard to the presented requirements to meet the requirements of GOST and SP. To give a detailed analysis of the stress-strain state of the model on the basis of calculation of the created model. **Methods:** Analysis of the design and allocation of the main parameters; comparison of the calculation models obtained taking into account the stage of concreting of the monolithic reinforced concrete slab of the roadway and without taking into account the stage of work. **Results:** The stress-strain state has been analyzed, and the structural and technological features of the erection of a road bridge over the Vetluga River have been considered. It is established that stresses in metal main girders increase significantly in comparison with the model that does not take into account the stages of erection. The combined operation of steel and reinforced concrete section starts only after the monolithic reinforced concrete slab of the roadway has gained strength. It is established that the development of cracks in concrete in the support zones caused by negative moments can be accounted for by reducing the elastic modulus of concrete in the support zones by 8 times. The change

of stresses and strains in the structure by stages has been analyzed. The stresses and deformations arising in the structure during its erection are "inherited" from one stage to another when calculating by stages. Practical significance: The methods of creating a reliable calculation model of steel-reinforced concrete spans, reflecting the actual nature of the work of the structure both at the stage of construction and at the stage of operation, are shown. The methods described in the article can be recommended for creating a calculation model in the Midas Civil software package with consideration of the presented requirements to meet the requirements of GOST and SP, as well as to avoid accidents at all stages of the life cycle of the structure..

Keywords: Steel-reinforced concrete span structure, highway, multi-span bridge, computational model, stress-strain state, steel-reinforced concrete.

References

1. Ovchinnikov I. I., Valiev Sh. N., Gerasimov O. N. et al. Analiz avarii mostovogo sooruzheniya iz-za neucheta stadiynosti ego vozvedeniya [Analysis of the accident of a bridge structure due to failure to take into account the stages of its construction]. *Dorogi i mosty* [Roads and Bridges]. 2022, Iss. 48, pp. 140–166. (In Russian)
2. SP 35.13330.2011. *Mosty i truby. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.03—84. Mosty i truby* [SP 35.13330.2011. Bridges and pipes. Updated version of SNiP 2.05.03—84. Bridges and pipes]. Moscow: OAO "TsPP" Publ., 2011. (In Russian)
3. Morid A. M. Opornye diafragmy v zonakh razdeleniya stalezhelezobetonnykh proletrykh stroeniy [Support diaphragms in separation zones of steel-reinforced concrete spans]. *Nauka i sovremennost'* [Science and modernity]. 2012. (In Russian)
4. GOST R 59788—2021. *Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Mostovye sooruzheniya. Pravila rascheta stalezhelezobetonnykh proletrykh stroeniy*. Vveden s 1.01.2022 [GOST R 59788—2021. Public roads. Bridge structures. Rules for the calculation of steel-reinforced concrete spans. Introduced from January 1, 2022]. *Informatsionnaya sistema Norma CS* [Information system Norma CS]. (In Russian)
5. Lykova A. V., Abasheva L. P. Analiz sposobov ob'edineniya betona i stali v stalezhelezobetonnykh mostakh [Analysis of methods for combining concrete and steel in steel-reinforced concrete bridges]. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika* [Modern technologies in construction. Theory and practice]. 2016, Iss. 2, pp. 86–91. (In Russian)
6. Kozlov A. V. Raschet stalezhelezobetonnykh mostov s uchetom sdviga plity po verkhnemu poyasu balki [Calculation of steel-reinforced concrete bridges taking into account the shear of the slab along the upper chord of the beam]. *Stroitel'naya mekhanika i konstruktii* [Structural mechanics and structures]. 2018, Iss. 4, pp. 64–71. (In Russian)
7. Morid A. M., Popov V. I. Issledovanie raboty stalezhelezobetonnykh proletrykh stroeniy mostov v programnom komplekse Femap & Nastran [Study of the work of steel-reinforced concrete bridge spans in the Femap & Nastran software package]. *Nauka i sovremennost'* [Science and modernity]. 2012. (In Russian)
8. Krasnov S. N., Krasnova E. S., Vikhrov E. A. Konstruktivnaya sistema stalezhelezobetonnykh mostov [Structural system of steel-reinforced concrete bridges]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of the Kharkov National Automobile and Road University]. 2012, Iss. 58, pp. 65–69. (In Russian)
9. Belutskiy I. Yu., Lazarev I. V., Lapin A. V. Konstruktivno-tekhnologicheskie osobennosti proektov rekonstruktsii stalezhelezobetonnykh mostov v razrabotkakh TOGU [Structural and technological features of projects for the reconstruction of steel-reinforced concrete bridges in the developments of Tomsk State University]. *Dal'niy Vostok. Avtomobil'nye dorogi i bezopasnost' dvizheniya* [Far East. Highways and traffic safety]. 2020, pp. 72–77. (In Russian)

Received: July 27, 2023

Accepted: September 29, 2023

Author's information:

Yuri N. ZUEV — Postgraduate Student;

zuev.yury2015@yandex.ru

Sergey V. CHIZHOV — PhD in Engineering, Associate Professor; sergchizh@yandex.ru

Yulia V. AVDEI — PhD in Pedagogy, Associate Professor

Anatoly A. ANTONYUK — aaa.12.03.1992@mail.ru

УДК 656.02

Сравнительный анализ транспортного спроса и предложения в моделях транспортных систем городских агломераций

Л. А. Лосин^{1, 2}, Н. В. Булычева¹

¹Институт проблем региональной экономики РАН, Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, Серпуховская ул., 38

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

Для цитирования: Лосин Л. А., Булычева Н. В. Сравнительный анализ транспортного спроса и предложения в моделях транспортных систем городских агломераций // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 943–953. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-942-943-953

Аннотация

Цель: Провести анализ методов математического моделирования, применяемых для определения спроса на городские передвижения и прогнозирования интенсивности потокораспределения в сети общественного транспорта. Определить зоны эффективного использования сетевого и досетевого подходов к построению транспортных моделей городских агломераций. Провести сравнительный анализ параметров транспортного спроса и предложения в сетевом и досетевом вариантах моделирования систем городского общественного транспорта. **Методы:** Математическое моделирование, методы обработки больших объемов данных, методы геоинформационного анализа. **Результаты:** Проанализированы применяемые в современных транспортных моделях методики определения транспортного спроса и предложения. Проведен сравнительный анализ досетевого и сетевого подходов в транспортном моделировании, определена зона их эффективного использования. Проведена апробация решения задачи определения параметров транспортного спроса и предложения на примере модели системы городского общественного транспорта Санкт-Петербургской агломерации. На основе результатов моделирования проанализированы зависимости транспортного спроса и предложения от исходных данных и ограничений модели. Сделан вывод о необходимости калибровки значения каждого параметра при использовании транспортного моделирования. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут служить основой для совершенствования методов математического моделирования, применяемых в городском транспортном планировании. Предлагаемые подходы к моделированию транспортного спроса и предложения могут использоваться при формировании прогнозных моделей, применяемых для обоснования проектных решений в документации территориального и транспортного планирования.

Ключевые слова: Транспортное моделирование, агломерация, транспортный спрос, общественный транспорт, матрица корреспонденций, пассажиропоток.

Введение

Необходимым условием эффективного и сбалансированного развития городских агломераций является обеспечение высокого уровня транспортного обслуживания населения. Границы городских агломераций охватывают территорию, в пределах которой осуществляются интенсив-

ные регулярные передвижения с трудовыми, культурно-бытовыми и рекреационными целями, управлять которыми можно только путем опосредованного воздействия. Сложность и многообразие процессов передвижения в городских агломерациях обуславливают необходимость применения средств математического моделиро-

вания для их анализа и прогнозирования. А это, в свою очередь, требует значительных вычислительных мощностей и больших объемов информации для использования таких методов в транспортно-градостроительном планировании.

Можно выделить различные уровни проектов, для обоснования решений которых используются методы моделирования: стратегическое планирование, транспортно-градостроительное проектирование, отраслевое планирование и т. д., при этом каждый уровень планирования характеризуется своей степенью детализации исследований. Методы моделирования позволяют решать задачи оценки функционирования транспортной системы в целом или ее укрупненных составных частей, выявления особенностей действующей транспортной системы, определения узких мест и депрессивных в транспортном отношении территорий. Исходными данными для решения этих задач являются характеристики функциональных городских систем, включая транспортную систему, а также показатели, характеризующие транспортное поведение населения [1].

Исследования формирования транспортного спроса на городские передвижения проводятся уже на протяжении многих десятилетий. Еще в опубликованной в 1956 году работе [2] исследовался спрос на передвижение между местами отправок и прибытий в виде функции средней стоимости поездки и загруженности дорог. Авторы этой работы связали величину спроса и пропускной способности со стоимостью поездки и величиной транспортного потока. Если спрос, как функция от средней стоимости, уменьшается по мере увеличения издержек, то стоимость издержек по кривой пропускной способности, как «предложения транспортных услуг по различным ценам», растет или остается постоянной при росте потока. При этом если спрос определяется для каждой пары точек или районов отправок и прибытий, то пропускная способность относится к отдельным участкам улично-дорожной сети.

Построение матриц корреспонденций как оценка спроса на передвижения

Определение спроса на передвижения между парой точек (районов), т. е. оценка объемов взаимных корреспонденций, является необходимым этапом моделирования транспортных систем. Одним из известных методов такого расчета является гравитационная модель, предложенная еще в XIX веке английским экономистом Кэри. Эта модель описывает среднее число поездок между парой мест как величину, пропорциональную произведению отправок и прибытий и обратно пропорциональную квадрату расстояния между ними («отталкивающий» фактор). В настоящее время во множестве моделей «отталкивающий» фактор представляется как функция, зависящая не только от расстояния (времени), но и от неких условных суммарных затрат на передвижение из района в район, связанных с числом пересадок, затратами времени, ценой проезда, удобством сообщения.

Наиболее распространенным методом расчета объемов межрайонных корреспонденций, реализованным в том числе в составе комплекса Citraf¹ [3] и позволяющим учитывать различные факторы, влияющие на величину транспортного спроса, является «энтропийный» подход [4, 5], в котором, в отличие от гравитационной модели, организован процесс реализации массового поведения с учетом ограничений и предпочтений, иными словами — процесс «дележа в стесненных условиях».

Ограничения на количество самостоятельного населения, т. е. населения, участвующего в ежедневных передвижениях, и количество рабочих мест или других объектов тяготения по транспортным районам естественны для постановки задачи формирования матриц корреспонденций. Из всех затрат на передвижения, которые должны учитывать участники

¹Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Программный комплекс для прогнозирования потоков пассажиров и транспорта в городах Citraf / В. П. Федоров (RU). № 2018611770.

движения, основными традиционно считаются предпочтения по использованию затрат времени, заданные в той или иной форме. Еще в довоенный период Г. В. Шелейховский [6] на бумаге вручную определял для разных расстояний и задаваемой средней скорости движения количество расселяющихся от мест их работы, применяя свою таблицу плотности вероятности расселения по временным интервалам. В дальнейшем данная методика совершенствовалась: в 1960-х годах в расчетах для института «Ленпроект», занимавшегося разработкой генерального плана Ленинграда [7], задавались начальная матрица затрат времени и откорректированная таблица плотности расселения Г. В. Шелейховского.

В информационно-программном комплексе Citraf матрица корреспонденций формируется при решении задачи максимизации энтропии, взвешенной относительно исходного предпочтения:

$$p(t_{ij}) = \exp(-\gamma t_{ij} - \mu c_{ij}),$$

где i, j — номера транспортных районов;

t_{ij} — затраты времени на передвижения между районами отправления и прибытия;

c_{ij} — денежные затраты на совершение корреспонденции;

γ — аналог двойственной оценки ограничения на среднее время доступности, если такое ограничение добавляется к ограничениям на численность работающих жителей и количество рабочих мест;

μ — переменная, двойственная ограничению на среднюю стоимость корреспонденции.

Затраты времени на передвижения между районами отправления и прибытия рассчитываются методом построения дерева кратчайших путей для каждого района прибытия из всех районов отправления с помощью алгоритма Дейкстры [8] в том случае, если в массиве исходной информации задается транспортный граф. Данное замечание не случайно, так как матрица затрат времени

в модели может рассчитываться и в так называемом досетевом варианте [9, 10], при котором время передвижения между парами транспортных районов не зависит от конфигурации транспортной сети. В отличие от традиционного сетевого подхода к расчету матриц, досетевой подход показывает свою эффективность при решении прогнозных задач на долгосрочную перспективу, поскольку перспективный транспортный спрос зависит от сетевых ограничений тем меньше, чем больше горизонт прогнозирования.

Выбор параметров γ и μ для модели конкретного города (агломерации) зависит от предполагаемого среднего времени доступности и средней стоимости достижения системы объектов обслуживания. Другие параметры, задаваемые во входном массиве модели, также зависят от особенностей конкретного города (агломерации) с его системами расселения, распределения рабочих мест, транспортной системой и отлаживаются в процессе калибровки. При расчете матриц «энтропийным» методом вводятся ограничения на ряд параметров, при этом задается и априорное предпочтение. Например, в функции тяготения в «энтропийной» задаче можно одновременно учитывать влияние и затрат времени, и денежных затрат при формировании корреспонденций, располагая соответствующей калибровочной информацией.

Определение параметров функционирования транспортной системы на основе анализа спроса на передвижения в сетевом и досетевом вариантах расчета матриц корреспонденций

Сетевые ограничения в модели задаются посредством транспортного графа, степень детализации которого зависит от уровня проектирования. Граф может включать как существующие, так и проектируемые участки улично-дорожной сети, а также трассы различных видов уличного

Таблица 1. Результаты сетевых и досетевых расчетов матриц корреспонденций для Санкт-Петербургской агломерации

Метод расчета	Вариант расчета	Параметр γ	Начальная скорость, км/ч	Среднее время, мин	Объем передвижений внутри транспортных районов, пасс.
Сетевой	1	-0,053	Отдельно для каждого вида транспорта	ОТ: 45,45 ИТ: 27,96	ОТ: 84 584 ИТ: 8662
Досетевой	2а	-0,05	29	41,24	57 823
	2б	-0,05	35	40,05	42 082

и внеуличного транспорта; для всех элементов задаются их скоростные параметры и ограничения. Объединение подграфов отдельных видов общественного транспорта в единую систему осуществляется за счет введения пересадочных связей в местах пересечения различных видов транспорта. Метод введения пересадочных дуг позволяет учесть и маршрутную сеть наземного общественного транспорта (при таком подходе значительно увеличивается объем графа). В зависимости от задачи в модели можно вводить, например, только скоростные маршруты или маршруты электротранспорта. На практике графом индивидуального транспорта часто считается граф улично-дорожной сети [11]. В описываемом исследовании транспортный граф Санкт-Петербургской агломерации содержит почти 5000 дуг, часть из которых относится к системе скоростного рельсового транспорта (метрополитен, пригородная железная дорога, трамвай).

В предлагаемом исследовании, выполненном на примере Санкт-Петербургской агломерации, представлены результаты расчетов пассажиропотоков на графе, выполненном в двух вариантах. В первом варианте (сетевой расчет) используется граф, описывающий сеть городского общественного транспорта; во втором (досетевой расчет) — граф, заданный регулярной прямоугольной сеткой. В обоих вариантах заданы одни и те же ограничения на численность работающих жителей и количество рабочих мест территории рассмотрения. Модель включает 246 расчетных транспортных районов; параметры системы расселения для этих районов нормированы на

основе статистической информации о численности населения по административным районам Санкт-Петербурга по состоянию на 1 января 2022 года [12].

При досетевом расчете регулярная сетка, покрывающая территорию рассмотрения (длина дуги в данном исследовании принята равной 1500 м), не зависит от структуры улично-дорожной сети, номенклатуры и конфигурации сети общественного транспорта. Задание начальной скорости передвижения, на основе которой рассчитывается матрица затрат времени и тем самым производится выбор мест прибытия, является основным параметром при определении спроса на передвижения (совместно с ограничением на среднее время доступности объектов обслуживания). Возможен также вариант задания начальной скорости в зависимости от предполагаемой суммарной пассажирской работы отдельного вида транспорта [13].

В табл. 1 приведены результаты расчетов, выполненных в рамках описываемого исследования на модели Санкт-Петербургской агломерации: один сетевой расчет (расчет 1) и два досетевых расчета (расчеты 2а и 2б), выполненных с использованием регулярной сетки. В сетевом расчете одновременно формируются две матрицы корреспонденций — для общественного (ОТ) и индивидуального (ИТ) транспорта. В обоих вариантах досетевого расчета ограничение на среднее время то же, но начальная скорость движения транспорта, одинаковая на всех дугах, в каждом варианте задается индивидуально.

Формирование равновесного потокораспределения как оценка транспортного предложения

Формирование в модели пассажирских и транспортных потоков осуществляется с учетом важного фактора — ограниченной пропускной способности элементов транспортной сети. Введение этих ограничений приводит к ухудшению условий пользования элементами сети из-за увеличения затрат времени при росте нагрузки на них. При этом выбор каждым участником движения пути следования определяется условием минимизации затрат времени на передвижения (как и условием минимизации стоимости проезда в некоторых расчетах). Выбор пути следования всякий раз производится без согласования с другими участниками движения и осуществляется в каждой промежуточной вершине маршрута движения. При различиях в информационном обеспечении этапы моделирования в досетевом варианте не отличаются от традиционного сетевого расчета, при котором в итерационном процессе, основанном на пересчете скоростей на дугах в зависимости от величины пассажиропотока, формируется равновесный пассажиропоток [5].

Исследования потокового равновесия в транспортных сетях ведутся достаточно давно [14]. Более полувека назад в работе [2] авторы сформулировали математическую модель равновесия в транспортной сети и свели ее к задаче математического программирования. В работе [15] дано определение равновесного потока и доказана теорема существования его в смысле этого определения.

В информационно-программном комплексе Citraf предлагается два способа построения равновесного потокораспределения:

— применяется гипотеза о том, что каждый участник движения с вероятностью 1 выбирает путь следования, обеспечивающий ему минимальные затраты времени;

— применяется гипотеза о том, что на выбор пути следования могут влиять несколько факторов (затраты времени, стоимость и т. п.) и каждый участник движения с некоторой вероятностью может выбрать любой путь следования.

Во втором случае вводятся ограничения на величины средних значений каждого вида затрат. Если эти ограничения являются жесткими, то вероятность выбора путей с большими затратами становится достаточно малой.

В отличие от моделирования корреспонденций, ориентация на затраты времени (или другие затраты) как фактора при выборе пути следования существенно более обоснована, поскольку выбор корреспондирующих районов уже состоялся на предыдущем этапе моделирования при построении матриц.

В ходе решения задачи каждый из участников движения стремится выбрать для себя кратчайший путь, ориентируясь на затраты времени, являющиеся результатом аналогичного поведения всех участников движения. При этом для учета провозной способности транспорта и пропускной способности магистралей сети предполагается, что затраты времени t_{ij} на дуге (i, j) транспортного графа непрерывно и монотонно увеличиваются с ростом интенсивности потока f_{ij} . Таким образом,

$$t_{ij} = t(f_{ij}), f_{ij} = \sum_{l=1 \dots k} f_{ij}^l,$$

где k — количество транспортных районов.

Каждый район-сток l порождает индивидуальный тип потока на дуге (i, j) $F = \{f_{ij}^l\}$. Пусть $T_n^l(F)$ — наименьшие затраты времени, необходимые для достижения из узла n потоком типа l своего стока, тогда искомый поток F^* должен обладать следующим свойством:

$$T_i^l(F^*) = t(f_{ij}^*) + T_j^l(F^*) \text{ при } f_{ij}^l > 0.$$

Таблица 2. Результаты сетевых и досетевых расчетов интенсивности пассажиропотоков для Санкт-Петербургской агломерации

Метод расчета	Вариант расчета	Параметр γ	Скорость при расчете матрицы, км/ч	Ограничение на максимальную скорость, км/ч	Среднее время предложения/спроса, мин	Средняя дальность, км	Скорость сообщения, км/ч	Средняя стоимость, руб.	Пассажирская работа, пасс.-км
Сетевой	1	-0,053	Отдельно для каждого вида транспорта		ОТ: 60, 7/45,5 ИТ: 43,9/28,0	ОТ: 13,4 ИТ: 21,8	ОТ: 18,5 ИТ: 29,8	ОТ: 58,5 ИТ: 101,4	ОТ: 8332 ИТ: 6607
Досетевой	2а	-0,053	29	45	60,0/41,2	13,0	18,8	67,4	12 683
	2б	-0,05	29	45	60,9/42,1	13,4	19,1	69,5	13 142
	2в	-0,05	29	80	59,0/42,1	13,4	20,1	71,8	13 189
	2г	-0,05	35	45	65,3/40,1	14,6	19,4	75,9	14 527
	2д	-0,05	35	80	63,0/40,1	14,7	20,6	78,8	14 590

Поскольку F^* является потоком, то естественно, что для множества чисел $\{f_{ij}^{*l}\}$ должны выполняться условия неразрывности в вершинах графа, и при сделанных относительно $t_{ij} = t(f_{ij})$ предположениях и справедливости указанного свойства искомый поток является решением следующей задачи выпуклого программирования:

$$\sum_{(i,j)} \int_0^{f_{ij}} t_{nm}(s) ds \Rightarrow \min ,$$

$$f_{ij} = \sum_{l=1 \dots k} f_{ij}^l ,$$

где s — поток, при выполнении для $\{f_{ij}^l\}$ условий неразрывности потока.

Для решения задачи используется алгоритм, реализующий метод возможных направлений.

В отличие от сетевого расчета, где скорость на дуге может только уменьшаться с ростом нагрузки на ней, при досетевом расчете (при задании графа в виде регулярной сетки при начальной общей для всех дуг минимальной скорости), скорость на дуге возрастает при увеличении нагрузки. Процесс изменения скорости продолжается в модели до тех пор, пока на каждой следующей итерации для части участников ока-

зывается более выгодным изменить свои ранее выбранные траектории и воспользоваться более привлекательными участками сетки с большей скоростью. Представленные далее результаты расчетов пассажиропотоков получены с помощью функции пересчета скорости в зависимости от пассажиропотока:

$$v_{ij} = v^0 \exp\left(0,02(f_{ij})^{1/2}\right),$$

где v_{ij} — текущая скорость на дуге с потоком f_{ij} ; v^0 — общая начальная скорость.

При такой функции пересчета скорости в итерационном процессе формирования пассажиропотоков имеется сходимость средней скорости сообщения при заданной минимальной скорости 5 км/ч и ограничениях на максимальную скорость в разных вариантах, соответственно 45 и 80 км/ч. Как видно из табл. 2, средняя скорость в каждом варианте при достижении равновесного потокораспределения — не менее 18 км/ч.

Как и в предыдущей серии расчетов (табл. 1) рассмотрен один сетевой расчет (расчет 1) и несколько досетевых (расчеты 2а — 2д). Во всех вариантах количество самостоятельного населения одинаковое.

Таблица 3. Результаты досетевых расчетов интенсивности пассажиропотоков для Петербургской агломерации (в зависимости от скорости)

Метод расчета	Вариант расчета	Параметр γ	Скорость при расчете матрицы, км/ч	Ограничение на максимальную скорость, км/ч	Среднее время предложения/спроса, мин	Средняя дальность, км	Скорость сообщения, км/ч	Средняя стоимость, руб.	Пассажирская работа, пасс.-км
Досетевой	26	-0,05	29	45	60,9/42,1	13,4	19,1	69,5	13 142
	26*	-0,05	27	45	59,4/42,8	12,9	18,9	66,9	12 579
	26**	-0,05	25	45	57,6/43,6	12,4	18,7	64,3	12 018

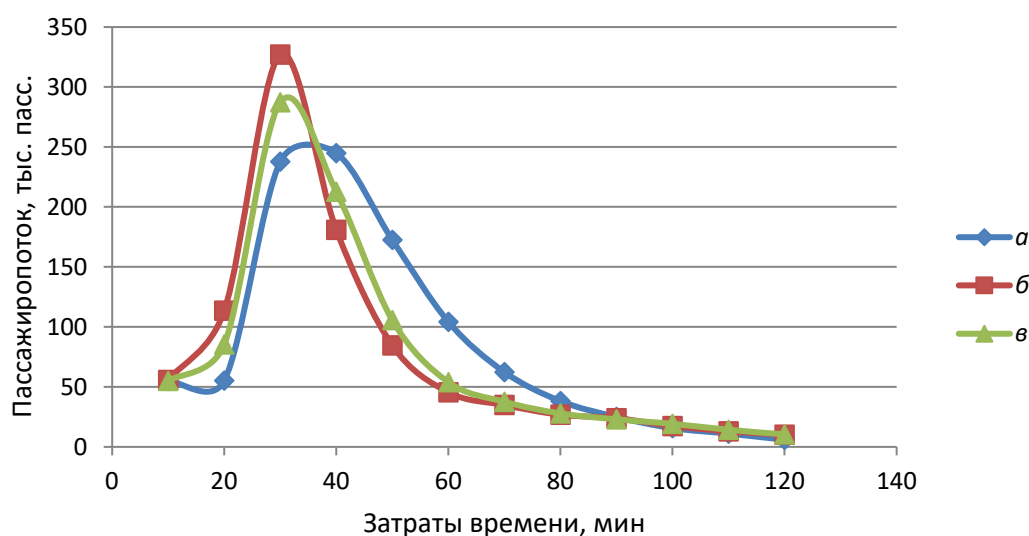


Рис. 1. Кривые распределения спроса и предложения:

- а* — кривая распределения спроса с ограничением скорости 29 км/ч;
б — кривая распределения предложения с ограничением на максимальную скорость 80 км/ч;
в — кривая распределения предложения с ограничением на максимальную скорость 45 км/ч

В табл. 3 представлены результаты расчетов по вариантам, в которых изменяется только скорость при расчете матрицы, т. е. меняется спрос на передвижения на графе, представленном в виде регулярной сетки (досетевой расчет), в зависимости от скорости.

Сравнение значений среднего времени передвижения по итогам расчета матриц корреспонденций и интенсивности пассажиропотоков показывает разницу между спросом и предложением. Спрос зависит от ограничения на среднее время и скорости передвижения по кратчайшим рассто-

яниям при расчете матрицы корреспонденций, предложение — от полученного спроса на передвижения, функции пересчета скорости и ограничения на максимальную скорость.

На рис. 1 представлены кривые распределения спроса на регулярной сетке при расчете матрицы со скоростью 29 км/ч и предложения для расчетов с ограничениями на максимальную скорость 80 и 45 км/ч. Полученные в итерационном процессе дифференцированные скорости в этих двух расчетах формируют направления (трассы) с наибольшими пассажиропотоками (рис. 2).

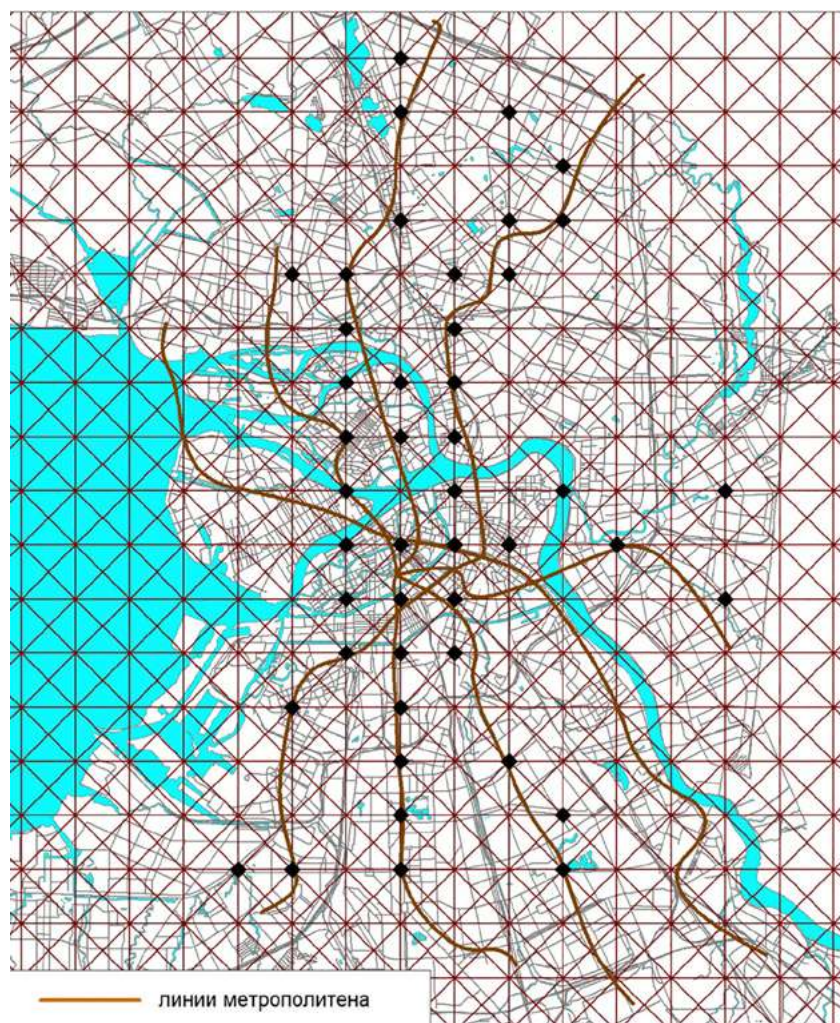


Рис. 2. Узлы регулярной сетки, в которых фиксируются пассажиропотоки более 50 000 пасс. в час (расчет 2б)

Выводы

Проведенные исследования на базе информационно-программного комплекса Citraf позволяют сделать вывод о необходимости калибровки значения каждого параметра при использовании транспортной модели. Эффективность использования досетевого моделирования состоит в том, что при достаточно простом способе формирования вариантов расчета можно получить для сравнения большой ряд параметров, характеризующих спрос и предложение транспортных услуг, что особенно эффективно при долгосрочном планировании дорогостоящих инфраструктур-

ных проектов. Важно, чтобы каждый проект обеспечивал «максимальный суммарный эффект от всей создаваемой системы объектов обслуживания в территориальных образованиях городской агломерации» [16].

Библиографический список

1. Капский Д. В. Транспорт в планировке городов: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-44 01 02 «Организация дорожного движения»: в 10 частях / Д. В. Капский, Л. А. Лосин. — Минск: БНТУ, 2019. — Ч. 1: Транспортное планирование: математическое моделирование. — 94 с.

2. Beckmann M. J. *Studies in the Economics of Transportation* / M. J. Beckmann, C. B. McGuire, C. B. Winsten. — Yale University Press, New Haven, Conn, 1956.
3. Лосин Л. А. Петербургский опыт построения информационно-программного комплекса для решения транспортно-градостроительных задач / Л. А. Лосин // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния. — Минск: БНТУ, 2017. — С. 88–95.
4. Мягков В. Н. Математическое обеспечение градостроительного проектирования / В. Н. Мягков, Н. С. Пальчиков, В. П. Федоров; отв. ред. Б. Л. Овсевич. — Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1989. — 144 с.
5. Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии // Сборник трудов Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН. № 9. Математические модели в исследовании процессов развития городской среды. — СПб.: Нестор-История, 2015. — 84 с.
6. Шелейховский Г. В. Транспортные основания композиции городского плана / Г. В. Шелейховский. — Л.: 1936.
7. Дынкин А. Г. Методология расчета перспективных пассажиропотоков / А. Г. Дынкин, Э. Г. Мовчан // Применение математических методов и электронно-вычислительной техники в градостроительстве. — Киев, 1966. — С. 74–92.
8. Алексеев В. Е. Графы. Модели вычислений. Структуры данных: учебник / В. Е. Алексеев, В. А. Таланов. — Нижний Новгород: ННГУ, 2005. — 307 с.
9. Федоров В. П. Методы математического моделирования для проектирования городской транспортной системы на досетевом уровне / В. П. Федоров, Л. А. Лосин // Транспорт Российской Федерации. — 2012. — № 2(39). — С. 44–47.
10. Булычева Н. В. Досетевая модель общественного транспорта как цифровая основа стратегии развития городских транспортных систем (на примере Екатеринбурга) / Н. В. Булычева, Л. А. Лосин // Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии — 2021: материалы III Международной научно-практической конференции. — Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2021. — С. 38–49.
11. Лисенков А. И. Формирование расчетного графа на основе анализа транспортной системы городской агломерации / А. И. Лисенков, Л. А. Лосин // Проблемы преобразования и регулирования региональных социально-экономических систем: сборник научных трудов. Выпуск 45 / Под научной редакцией д-ра экон. наук С. В. Кузнецова. — ИПРЭ РАН. — СПб.: ГУАП, 2019. — С. 49–53.
12. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2022 года. — М.: Федеральная служба государственной статистики. — URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата доступа: 28.07.2023).
13. Булычева Н. В. Моделирование системы общественного транспорта на основе пассажиропотоков, сформированных на условной сети / Н. В. Булычева, Л. А. Лосин // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2021. — № 2(65). — С. 86–92.
14. Palma de A. Optimization formulations and static equilibrium in congested transportation networks / A. de Palma, Y. Nesterov // CORE Discussion Paper 9861, Universite Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium, 1998. — 34 p.
15. Питтель Б. Г. Математическая модель прогноза пассажиропотоков в городской транспортной сети / Б. Г. Питтель, В. П. Федоров // Экономика и математические методы. — 1969. — Вып. 5. — С. 744–757.
16. Ляпунова Г. П. Проблемы развития инфраструктуры городских агломераций / Г. П. Ляпунова // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. — 2022. № 3(70). — С. 157–167.

Дата поступления: 23.10.2023

Решение о публикации: 21.11.2023

Контактная информация:

ЛОСИН Леонид Андреевич — канд. техн. наук,
зав. лабораторией; nipigrad@yandex.ru
БУЛЫЧЕВА Нэля Васильевна — ст. науч. сотр.;
bul45@mail.ru

Comparative Analysis of Transport Demand and Offer in Models of Transport Systems of Urban Agglomerations

L. A. Losin^{1, 2}, N. V. Bulycheva¹

¹Institute for Regional Economic Studies, Russian Academy of Sciences, 38, Serpuhovskaya ul., Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

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

For citation: Losin L. A., Bulycheva N. V. Comparative Analysis of Transport Demand and Offer in Models of Transport Systems of Urban Agglomerations // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 943–953. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-943-953

Summary

Purpose: To analyze the methods of mathematical modeling used to determine the demand for urban transportation and predict the intensity of flow distribution in the public transport network. To determine the zones of effective use of network and pre-network methods for the formation of transport models of urban agglomerations. To conduct a comparative analysis of the parameters of transport demand and offer in the network and pre-network variants of urban transport systems modeling. **Methods:** Mathematical modeling, processing large amounts of data, geoinformation analysis. **Results:** The methods of determining transport demand and offer used in modern transport models are analyzed. A comparative analysis of pre-network and network methods in transport modeling is carried out, the zone of their effective use is defined. The approbation of the problem solution of determining the transport demand and offer is carried out on the example of the urban transport system model of the St. Petersburg agglomeration. Based on the modeling results, the dependencies of transport demand and offer on the input data and model limitations are analyzed. It is concluded that it is necessary to calibrate the value of each parameter when using transport modeling. **Practical significance:** The results obtained can be the basis for improving mathematical modeling methods used in urban transport planning. The proposed approaches to modeling transport demand and offer can be used in the creation of forecast models used to justify project decisions in the documentation of territorial and transport planning.

Keywords: Transport modeling, agglomeration, transport demand, public transport, correspondence matrix, passenger traffic.

References

1. Kapski D. V., Losin L. A. *Transport v planirovke gorodov. Transportnoe planirovanie: matematicheskoe modelirovanie* [Transport in urban planning. Transport planning: mathematical modeling]. Minsk: Belarusian National Technical University Publ., 2019, 94 p. (In Russian)
2. Beckmann M. J., McGuire C. B., Winsten C. B. *Studies in the Economics of Transportation*. Yale University Press, New Haven, Conn, 1956.
3. Losin L. A. *Peterburgskiy opyt postroeniya informacionno-programmnogo kompleksa dlya resheniya transportno-gradostroitelnykh zadach* [Designing of software complex for the solving of transport and urban problems in St. Petersburg]. *Sotsialno-ekonomicheskie problem razvitiya i funkcionirovaniya transportnykh sistem gorodov i zon ih vliyaniya* [Social and economic problems of city transport systems and their influence areas development and functioning]. Minsk: BNTU Publ., 2017, pp. 88–95. (In Russian)
4. Myagkov V. N., Palchikov N. S., Fyodorov V. P. *Matematicheskoe obespechenie gradostroitel'nogo proektirovaniya* [Mathematical support of urban planning]. Nauka, Leningradskoe otdelenie Publ., 1989, 144 p. (In Russian)
5. *Ekonomiko-matematicheskie issledovaniya: matematicheskie modeli i informatsionnye tekhnologii* [Economic and mathematical research: mathematical models and information technologies]. *Sbornik trudov Sankt-*

Peterburgskogo ekonomiko-matematicheskogo instituta RAN. № 9. *Matematicheskie modeli v issledovanii protsessov razvitiya gorodskoy sredy* [Collection of proceedings of the St. Petersburg Institute of Economics and Mathematics of the Russian Academy of Sciences. № 9. Mathematical models in the study of urban development processes]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2015, 84 p. (In Russian)

6. Sheleikhovski G. V. *Transportnye osnovaniya kompozicii gorodskogo plana* [Transport bases of the city plan composition]. Leningrad, 1936. (In Russian).

7. Dynkin A. G., Movchan E. G. *Metodologiya rascheta perspektivnykh passazhiropotokov* [Methodology for calculating prospective passenger flows]. *Primenenie matematicheskikh metodov i elektronno-vychislitel'noy tekhniki v gradostroitel'stve* [Application of mathematical methods and electronic computing in urban planning]. Kiev, 1966, pp. 74–92. (In Russian)

8. Alekseev V. E., Talanov V. A. *Grafy. Modeli vychisleniy. Struktury dannykh* [Graphs. Calculation models. Data structures]. Nizhni Novgorod: NNGU Publ., 2005, 307 p. (In Russian)

9. Fyodorov V. P., Losin L. A. *Metody matematicheskogo modelirovaniya dlya proektirovaniya gorodskoy transportnoy sistemy na dosetevom urovne* [Methods of mathematical modeling of the urban transport system designing at the pre-network level]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2012, Iss. 2(39), pp. 44–47. (In Russian)

10. Bulycheva N. V., Losin L. A. *Dosetevaya model obschestvennogo transporta kak cifrovaya osnova strategii razvitiya gorodskikh transportnykh sistem (na primere Yekaterinburga)* [The pre-network model of public transport as a digital basis for the development strategy of urban transport systems (on the example of Yekaterinburg)]. *Cifrovaya transformatsiya promyshlennosti: tendentsii, upravlenie, strategii — 2021: materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Digital Transformation of Industry: trends, management, strategy, 2021. Materials of the III International scientific and practical conference]. Ekaterinburg: Institut ekonomiki UrO RAN Publ., 2021, pp. 38–49. (In Russian).

11. Lisenenkov A. I., Losin L. A. *Formirovanie raschetnogo grafa na osnove analiza transportnoy sistemy gorodskoy aglomeratsii* [Creation of a calculated graph based on the analysis of the agglomeration transport system]. *Problemy*

preobrazovaniya i regulirovaniya regionalnykh socialno-ekonomicheskikh sistem: sbornik nauchnykh trudov [Problems of transformation and regulation of regional socio-economic systems]. St. Petersburg: GUAP Publ., 2019, vol. 49, pp. 49–53. (In Russian)

12. *Chislennost naseleniya Rossiyskoy Federatsii po municipal'nym obrazovaniyam na 1 yanvarya 2022 goda* [The number of population of the Russian Federation by municipalities as of January 1, 2022]. Moscow: Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki Publ. Available at: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (accessed: July 28, 2023). (In Russian).

13. Bulycheva N. V., Losin L. A. *Modelirovanie sistemy odschestvennogo transporta na osnove passazhiropotokov, sformirovannykh na uslovnoy seti* [Modeling of a municipal transport system on the basis of passenger flows formed on a conditional network]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and prospects of development]. 2021, Iss. 2(65), pp. 86–92. (In Russian)

14. Palma de A., Nesterov Y. *Optimization formulations and static equilibrium in congested transportation networks*. CORE Discussion Paper 9861, Universite Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium, 1998, 34 p.

15. Pittel B. G., Fyodorov V. P. *Matematicheskaya model prognoza passazhiropotokov v gorodskoy transportnoy seti* [Mathematical model of passenger traffic forecast in the urban transport network]. *Ekonomika i matematicheskie metody* [Economics and mathematical methods]. 1969, vol. 5, pp. 744–757. (In Russian)

16. Lyapunova G. P. *Problemy razvitiya infrastruktury gorodskikh aglomeratsiy* [Problems of infrastructure development of urban agglomerations]. *Ekonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya* [Economy of the North-West: problems and prospects of development]. 2022, Iss. 3(70), pp. 157–167. (In Russian)

Received: October 23, 2023

Accepted: November 21, 2023

Author's information:

Leonid A. LOSIN — PhD in Engineering,
Laboratory Head; nipigrad@yandex.ru

Nelya V. BULYCHEVA — Senior Researcher;
bul45@mail.ru

УДК 656.2

Методика применения переменных нормативов при разработке плана формирования поездов

А. П. Бадецкий, О. А. Медведь, Я. В. Кукушкина

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

Для цитирования: Бадецкий А. П., Медведь О. А., Кукушкина Я. В. Методика применения переменных нормативов при разработке плана формирования поездов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 954–966. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-954-966

Аннотация

Цель: План формирования поездов является основополагающим технологическим документом, влияющим на рациональную организацию эксплуатационной работы железных дорог ОАО «РЖД». От правильности его разработки зависят объем эксплуатационных расходов, устойчивость работы станций, участков и транспортных узлов. Существующая практика предполагает использование при расчете плана формирования поездов средних значений его расчетных параметров без учета их переменного характера. В этом случае не всегда можно гарантировать оптимальность принятого решения по организации вагонопотоков. Целью статьи является описание метода учета переменного характера расчетных параметров плана формирования поездов, что позволит повысить устойчивость его отдельных назначений к неравномерности эксплуатационной работы. **Методы:** Используются методы теоретического анализа, описаны существующие аналитические зависимости, позволяющие определить расчетные параметры плана формирования поездов. Для описания переменного характера расчетных параметров использовалась теория нечетких множеств и ее естественное расширение — нечеткая математика. Для принятия оптимального решения о корректировке отдельных назначений плана формирования поездов использованы методы теории принятия решений, а именно — метод принятия решений в нечетких условиях Беллмана — Заде. **Результаты:** Получены расчетные формулы, позволяющие определить расчетные параметры плана формирования поездов в условиях неравномерности эксплуатационной работы напрямую, без использования вспомогательных таблиц и графиков, обладая информацией только о колебаниях вагонопотока отдельного назначения плана формирования. Разработан метод определения порогового значения вагонопотока, оптимального в условиях неравномерности. **Практическая значимость:** Учет переменного характера расчетных нормативов плана формирования поездов при его разработке позволит повысить устойчивость его отдельных назначений, снизить эксплуатационные расходы на его реализацию в течение жизненного цикла, снизить количество оперативных корректировок.

Ключевые слова: Пороговое значение вагонопотока, нечеткие множества, неравномерность вагонопотоков, лингвистическая модель выделения струи вагонопотока.

Введение

Качественная организация эксплуатационной работы во многом зависит от того, насколько правильно разработан план формирования поездов (ПФП) и насколько он устойчив к колебаниям вагонопотоков. При этом стоит отме-

тить, что колебания вагонопотоков вызывают и изменение зависящих от них других параметров плана формирования поездов — затрат на накопление составов и экономии от проследования вагонами технической станции без пере- работки.

Для получения решений, устойчивых ко всевозможного рода изменениям входных параметров (шуму, выбросам, помехам и т. д., к которым можно отнести и колебания вагонопотоков), в последнее время все чаще начинают использовать специальные методы и алгоритмы, относящиеся к области искусственного интеллекта [1–16]. Данный подход обладает определенной эффективностью [17–21], как правило, превышающей достигнутую при использовании «классических» методов. В данной статье предлагается методика повышения устойчивости отдельных назначений плана формирования поездов с помощью нечетких множеств и методов принятия решений в неопределенных условиях.

1. Проверка на соответствие условиям выделения струи вагонопотока в поездное назначение

1.1. Исходные данные для расчета

Исходными данными для расчета являются:

– нечеткое число $U = (u_1, u_2, u_3)$, содержащее информацию о колебаниях отдельной струи вагонопотока и задаваемое следующей функцией принадлежности:

$$\mu_A(U) = \begin{cases} 0, & u < u_1 \\ \left(\frac{u - u_1}{u_2 - u_1} \right), & u_1 \leq u \leq u_2 \\ \left(\frac{u_3 - u}{u_3 - u_2} \right), & u_2 \leq u \leq u_3 \\ 0, & u > u_3. \end{cases} \quad (1)$$

– нечеткое число $cm = (cm_1, cm_2, cm_3)$, определяющее для каждого значения вагонопотока из U соответствующее ему значение затрат вагоно-часов на накопление составов. Задается функцией принадлежности следующего вида:

$$\mu(cm) = \begin{cases} 0, & cm < cm_1 \\ \left(\frac{(\sqrt{u_1} - \sqrt{u})(3,1 - 0,014\sqrt{u}u_1)(3,1 + 0,014u_2)}{(\sqrt{u_1} - \sqrt{u_2})(3,1 - 0,014\sqrt{u_1}u_2)(3,1 + 0,014u)} \right), & cm_1 \leq cm \leq cm_2 \\ \left(\frac{(\sqrt{u} - \sqrt{u_3})(3,1 - 0,014\sqrt{u}u_3)(3,1 + 0,014u_2)}{(\sqrt{u_2} - \sqrt{u_3})(3,1 - 0,014\sqrt{u_2}u_3)(3,1 + 0,014u)} \right), & cm_2 \leq cm \leq cm_3 \\ 0, & cm > cm_3. \end{cases} \quad (2)$$

– нечеткое число $t_{\text{эк}} = (t_{\text{эк1}}, t_{\text{эк2}}, t_{\text{эк3}})$, характеризующее изменение значений экономии времени от проследования вагонами технической станции без переработки с учетом изменения объемов переработки станции вследствие колебаний рассматриваемой струи вагонопотока. Задается следующей функцией принадлежности:

$$t_{\text{ЭК}} = \begin{cases} 0, & u < u_1 \\ \frac{u_2 \left(\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^o (u - u_1) + u u_1 (t_{\text{ЭК},j}^o - t_{\text{ЭК},j1}^o) \right)}{u \left(\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^o (u_2 - u_1) + u_1 u_2 (t_{\text{ЭК},j2}^o - t_{\text{ЭК},j1}^o) \right)}, & u_1 \leq u \leq u_2 \\ \frac{u_2 \left(\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^o (u_3 - u) + u u_3 (t_{\text{ЭК},j3}^o - t_{\text{ЭК},j}^o) \right)}{u \left(\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^o (u_3 - u_2) + u_2 u_3 (t_{\text{ЭК},j3}^o - t_{\text{ЭК},j2}^o) \right)}, & u_2 \leq u \leq u_3 \\ 0, & u > u_3. \end{cases} \quad (3)$$

Более подробно нахождение нечеткого представления данных величин описано в работах [22–27].

1.2. Определение категорий струй вагонопотоков

При учете в расчетах нечеткого характера исходных данных общее достаточное условие выделения струи вагонопотока в отдельное поездное назначение можно переписать в виде:

$$(cm_1, cm_2, cm_3) \leq (u_1 \cdot t_{\text{ЭК}1}^{\min}, u_2 \cdot t_{\text{ЭК}2}^{\min}, u_3 \cdot t_{\text{ЭК}3}^{\min}). \quad (4)$$

Тогда нечеткое значение экономии вагоно-часов $B_{\text{ЭК}}$, получившееся в результате выделения струи вагонопотока в назначение плана формирования, найденное по формуле (4), может принять следующие значения:

$$B_{\text{ЭК}} = (u_1 t_{\text{ЭК}1}^{\min} - cm_1, u_2 t_{\text{ЭК}2}^{\min} - cm_2, u_3 t_{\text{ЭК}3}^{\min} - cm_3) = (B_{\text{ЭК}1}, B_{\text{ЭК}2}, B_{\text{ЭК}3}). \quad (5)$$

$$B_{\text{ЭК}} = (u_1 t_{\text{ЭК}1}^{\min} - cm_1, u_2 t_{\text{ЭК}2}^{\min} - cm_2, u_3 t_{\text{ЭК}3}^{\min} - cm_3) = (-B_{\text{ЭК}1}, -B_{\text{ЭК}2}, -B_{\text{ЭК}3}). \quad (6)$$

$$B_{\text{ЭК}} = (u_1 t_{\text{ЭК}1}^{\min} - cm_1, u_2 t_{\text{ЭК}2}^{\min} - cm_2, u_3 t_{\text{ЭК}3}^{\min} - cm_3) = (-B_{\text{ЭК}1}, -B_{\text{ЭК}2}, B_{\text{ЭК}3}). \quad (7)$$

$$B_{\text{ЭК}} = (u_1 t_{\text{ЭК}1}^{\min} - cm_1, u_2 t_{\text{ЭК}2}^{\min} - cm_2, u_3 t_{\text{ЭК}3}^{\min} - cm_3) = (-B_{\text{ЭК}1}, B_{\text{ЭК}2}, B_{\text{ЭК}3}). \quad (8)$$

В соответствии с выражениями (5–8) струи вагонопотока распределяются по четырем категориям следующим образом:

- безусловно удовлетворяющие условиям выделения в поездное назначение — формула (5);
- безусловно не удовлетворяющие условиям выделения в поездное назначение — формула (6);
- частично удовлетворяющие условиям выделения в поездное назначение — формула (7);
- частично не удовлетворяющие условиям выделения в поездное назначение — формула (8).

Струи первой и второй категорий переносятся во все варианты плана формирования поездов без изменений и составляют их основу. Струи третьей и четвертой категорий в силу их неоднозначного поведения формируют варианты ПФП. Для определения того объема вагонопотока, при котором следует выделять их в самостоятельные поездные назначения или, наоборот, объединять с другими струями, следует обратиться к нечеткому значению пороговой мощности вагонопотока $U_{\Pi} = (u_{\Pi}^1, u_{\Pi}^2, u_{\Pi}^3)$ [28], определяемой следующим образом:

$$U_{\pi} = \left(\frac{cm_1}{t_{\text{эк}3}^{\min}}, \frac{cm_2}{t_{\text{эк}2}^{\min}}, \frac{cm_3}{t_{\text{эк}1}^{\min}} \right) = (u_{\pi}^1, u_{\pi}^2, u_{\pi}^3). \quad (9)$$

Струи этих категорий будут являться назначениями плана формирования поездов в случае, когда в результате «всплеска» мощность вагонопотока превысит пороговое значение. И наоборот, если в результате «спада» вагонопотока мощность станет меньше порогового значения, то поездное назначение следует отменять.

С учетом нечеткого характера как U_{π} , так и остальных расчетных параметров, следует говорить о *пороговой мощности вагонопотока, оптимальной в условиях неравномерности*. В заданных условиях нахождение ее значения полностью соответствует задаче принятия решений в нечетких условиях. Механизм постановки и решения таких задач описан Р. Беллманом и Л. Заде в работе [29] и включает в себя следующую последовательность действий:

1. Определение нечетких целей (*Goals, G*).
2. Наложение на нечеткие цели нечетких ограничений (*Constraint, C*).
3. Получение нечеткого решения (*Decision, D*) путем пересечения нечетких целей и ограничений.
4. Получение при необходимости четкого решения путем нахождения элемента в D , имеющего максимальную к нему степень принадлежности.

2. Лингвистическая модель определения оптимального порогового значения

2.1. Оптимальное пороговое значение для частично удовлетворяющих условиям выделения струй

Для струй вагонопотока, частично удовлетворяющих условиям выделения, лингвистическая модель определения порогового значения вагонопотока, оптимального в условиях неравномерности, формулируется следующим образом: «Вагонопоток должен быть больше порогового значения и изменяться в пределах от порогового значения до своего максимального значения» (10). Здесь стоит отметить, что цель имеет составной характер и задается тремя функциями принадлежности — непосредственно вагонопоток, пороговым его значением, а также той частью, что превышает это значение.

$$\mu_D(U_{\pi}^{\text{опт}}) = \mu_{G1}(U) \wedge \mu_{G2}(> U_{\pi}) \wedge \mu_{G3}(U_{\pi}) \wedge \mu_C(U_{\pi} < u < u_{\max}), \quad (10)$$

где $\mu_D(U_{\pi}^{\text{опт}})$ — функция принадлежности оптимального в условиях неравномерности порогового значения вагонопотока на рассматриваемом направлении;

$\mu_{G1}(U)$ — функция принадлежности первой цели (вагонопоток), определяется формулой (1);

$\mu_{G2}(> U_{\pi})$ — функция принадлежности второй цели (больше порогового значения);

$\mu_{G3}(U_{\pi})$ — функция принадлежности третьей цели, порогового значения вагонопотока. Определяется путем деления параметра накопления, найденного по формуле (2), на экономию от проследования вагонами технической станции без переработки (формула 3);

$\mu_C(U_{\pi} < u < u_{\max})$ — функция принадлежности ограничения (в пределах от порогового значения до своего максимального значения).

Функция принадлежности второй цели задается формулой (11):

$$\mu_{G2}(> U_{\Pi}) = \begin{cases} 0, & u < u_{\Pi}^1 \\ \left(\frac{u - u_{\Pi}^1}{(u_{\Pi}^1 + u_{\max})/2 - u_{\Pi}^1} \right), & u_{\Pi}^1 \leq u \leq (u_{\Pi}^1 + u_{\max})/2 \\ \left(\frac{u_{\max} - u}{u_{\max} - (u_{\Pi}^1 + u_{\max})/2} \right), & (u_{\Pi}^1 + u_{\max})/2 \leq u \leq u_{\max} \\ 0, & u > u_{\max}. \end{cases} \quad (11)$$

Функцию принадлежности третьей цели представим в следующем виде (12):

$$\mu_{G3}(U_{\Pi}) = \begin{cases} 0, & u_{\Pi} < u_{\Pi}^1 \\ \left(\frac{u_{\Pi} - u_{\Pi}^1}{u_{\Pi}^2 - u_{\Pi}^1} \right), & u_{\Pi}^1 \leq u_{\Pi} \leq u_{\Pi}^2 \\ \left(\frac{u_{\Pi}^3 - u_{\Pi}}{u_{\Pi}^3 - u_{\Pi}^2} \right), & u_{\Pi}^2 \leq u_{\Pi} \leq u_{\Pi}^3 \\ 0, & u_{\Pi} > u_{\Pi}^3. \end{cases} \quad (12)$$

Функция принадлежности ограничения — формулой (13):

$$\mu_C(U_{\Pi} < u < u_{\max}) = \begin{cases} 0, & u < u_{\Pi}^1 \\ \left(\frac{u - u_{\Pi}^1}{(u_{\Pi}^1 + u_{\max})/2 - u_{\Pi}^1} \right), & u_{\Pi}^1 \leq u \leq (u_{\Pi}^1 + u_{\max})/2 \\ \left(\frac{u_{\max} - u}{u_{\max} - (u_{\Pi}^1 + u_{\max})/2} \right), & (u_{\Pi}^1 + u_{\max})/2 \leq u \leq u_{\max} \\ 0, & u > u_{\max}. \end{cases} \quad (13)$$

Тогда выражение (10) можно переписать в следующем виде (14):

$$\mu_D(U_{\Pi}^{\text{опт}}) = \begin{cases} 0 \\ \left(\frac{u - u_1}{u_2 - u_1} \right) \\ \left(\frac{u_3 - u}{u_3 - u_2} \right) \\ 0 \end{cases} \cap \begin{cases} 0 \\ \left(\frac{u - u_{\Pi}^1}{u_{\Pi}^3 - u_{\Pi}^1} \right) \\ 1 \end{cases} \cap \begin{cases} 0 \\ \left(\frac{u_{\Pi} - u_{\Pi}^1}{u_{\Pi}^2 - u_{\Pi}^1} \right) \\ \left(\frac{u_{\Pi}^3 - u_{\Pi}}{u_{\Pi}^3 - u_{\Pi}^2} \right) \\ 0 \end{cases} \cap \begin{cases} 0 \\ \left(\frac{u - u_{\Pi}^1}{(u_{\Pi}^1 + u_{\max})/2 - u_{\Pi}^1} \right) \\ \left(\frac{u_{\max} - u}{u_{\max} - (u_{\Pi}^1 + u_{\max})/2} \right) \\ 0 \end{cases}. \quad (14)$$

Графическая интерпретация нахождения нечеткого решения, полученного по формуле (14), представлена на рис. 1.

2.2. Оптимальное пороговое значение для частично не удовлетворяющих условиям выделения струй

Для струй вагонопотока, частично не удовлетворяющих условиям выделения, лингвистическая модель определения порогового значения вагонопотока, оптимального в условиях неравномерности, формулиру-

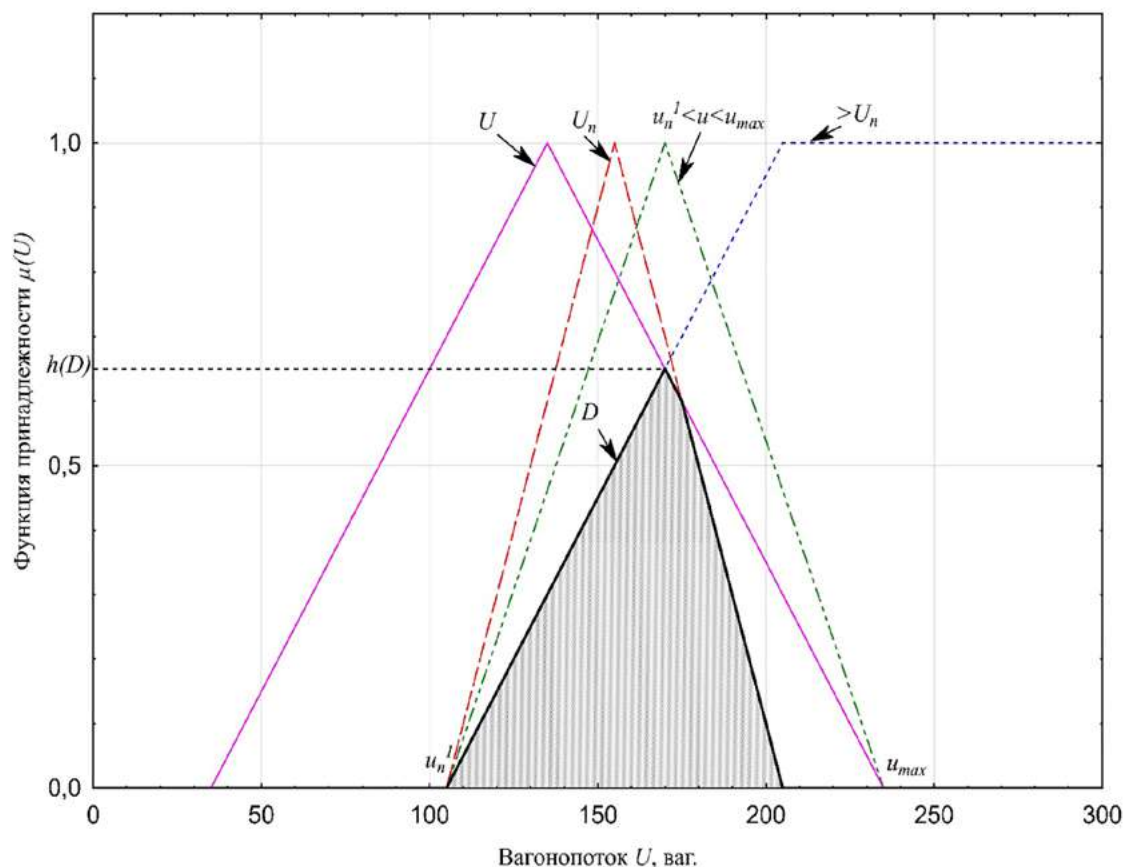


Рис. 1. Графическая интерпретация нахождения порогового значения вагонопотока, оптимального в условиях неравномерности, для струй вагонопотока, частично удовлетворяющих условиям выделения

ется следующим образом: «Вагонопоток должен быть меньше порогового значения и изменяться в пределах от своего минимального значения до порогового значения». В этом случае формула (10) примет вид:

$$\mu_D(U_n^{\text{опт}}) = \mu_{G1}(U) \wedge \mu_{G2}(< U_n) \wedge \mu_{G3}(U_n) \wedge \mu_C(u_{\min} < u < U_n),$$

где функции принадлежности первой $\mu_{G1}(U)$ и третьей $\mu_{G3}(U_n)$ целей задаются по формулам (1) и (12) соответственно;

$\mu_{G2}(< U_n)$ — функция принадлежности второй цели (меньше порогового значения), задается формулой (15):

$$\mu_G(< U_n) = \begin{cases} 1, & u < u_n^1 \\ \left(\frac{u_n^3 - u}{u_n^3 - u_n^1} \right), & u_n^1 \leq u \leq u_n^3 \\ 0, & u > u_n^3. \end{cases} \quad (15)$$

$\mu_C(u_{\min} < u < U_n)$ — функция принадлежности ограничения, задается формулой (16):

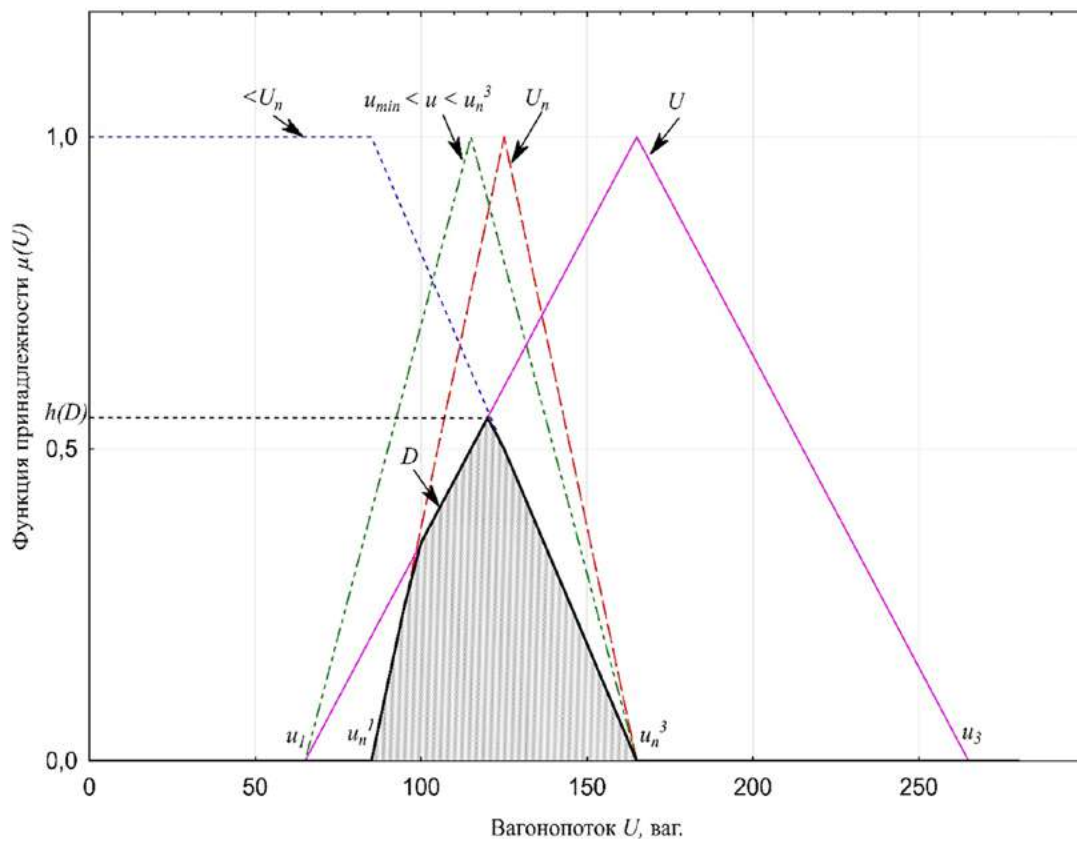


Рис. 2. Графическая интерпретация нахождения порогового значения вагонопотока, оптимального в условиях неравномерности, для струй вагонопотока, частично не удовлетворяющих условиям выделения

$$\mu_C(u_{\min} < u < U_n) = \begin{cases} 0, & u < u_{\min} \\ \left(\frac{u - u_{\min}}{(u_n^3 + u_{\min})/2 - u_{\min}} \right), & u_{\min} \leq u \leq (u_n^3 + u_{\min})/2 \\ \left(\frac{u_n^3 - u}{u_n^3 - (u_n^3 + u_{\min})/2} \right), & (u_n^3 + u_{\min})/2 \leq u \leq u_n^3 \\ 0, & u > u_n^3. \end{cases} \quad (16)$$

Тогда нечеткое решение для струй, частично не удовлетворяющих условиям выделения, примет вид:

$$\mu_D(U_n^{\text{опт}}) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \left(\frac{u - u_1}{u_2 - u_1} \right) \\ \left(\frac{u_3 - u}{u_3 - u_2} \right) \\ 0 \end{array} \right\} \cap \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ \left(\frac{u_n^3 - u}{u_n^3 - u_n^1} \right) \\ 0 \end{array} \right\} \cap \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \left(\frac{u_n - u_n^1}{u_n^2 - u_n^1} \right) \\ \left(\frac{u_n^3 - u_n}{u_n^3 - u_n^2} \right) \\ 0 \end{array} \right\} \cap \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \left(\frac{u - u_{\min}}{(u_n^3 + u_{\min})/2 - u_{\min}} \right) \\ \left(\frac{u_n^3 - u}{u_n^3 - (u_n^3 + u_{\min})/2} \right) \\ 0 \end{array} \right\}. \quad (17)$$

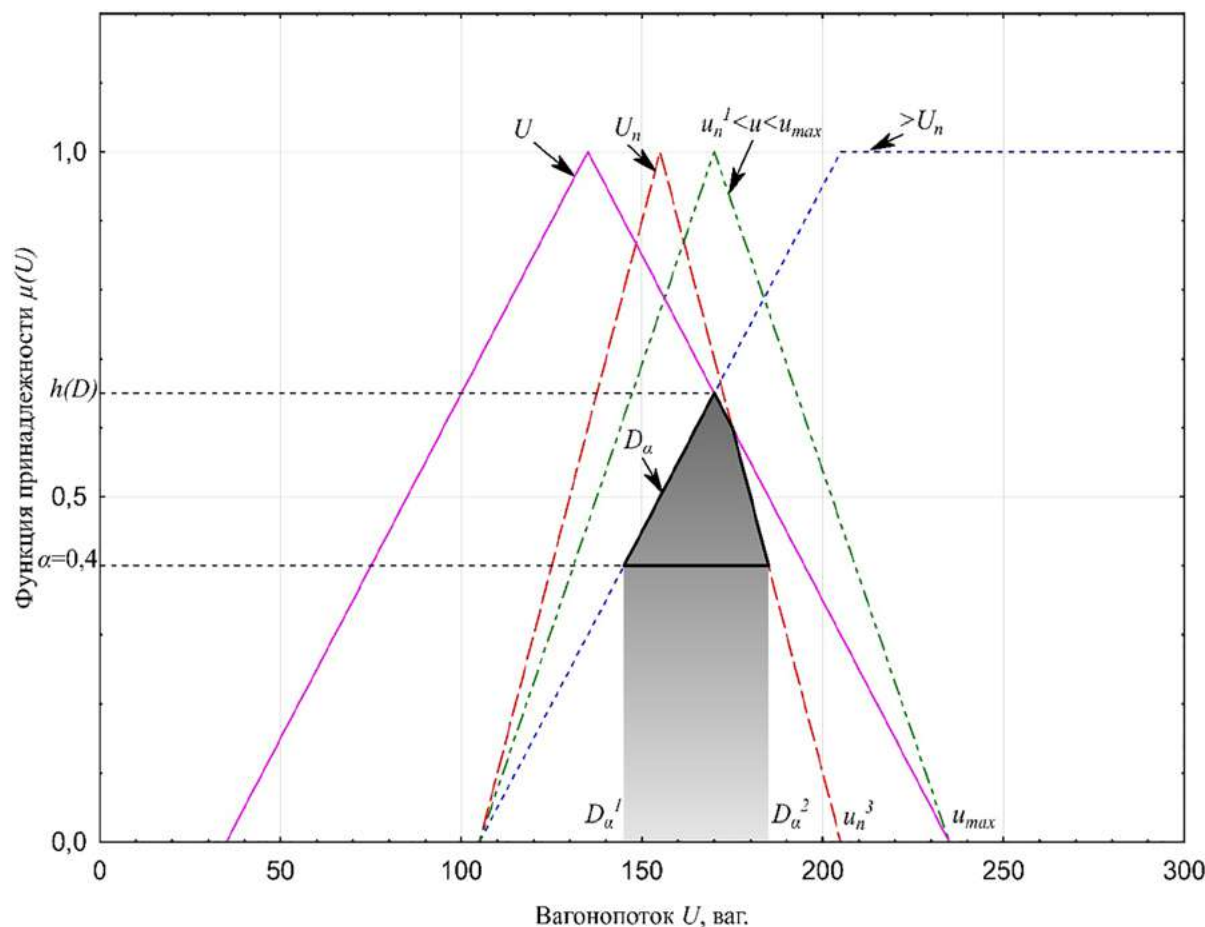


Рис. 3. Графическая интерпретация определения зоны оптимальных пороговых значений вагонопотока с использованием множества α -уровня при $\alpha = 0,4$

Графическая интерпретация нахождения нечеткого решения, полученного по формуле (17), представлена на рис. 2.

3. Интерпретация и использование результатов

Представленные на рис. 1 и 2 заштрихованные области соответствуют нечеткому решению D , соответствующему пороговому значению вагонопотока на направлении в условиях неравномерности расчетных нормативов плана формирования поездов. Стоит отметить, что данное решение представляет собой именно нечеткое множество, а не число, так как для него нарушены условия монотонности и нормальности (то есть $h(D) \neq 1$).

Множество D в целом можно рассматривать как *зону оптимальных значений* вагонопотока и производить корректировку назначения плана формирования только тогда, когда его вагонопоток выходит за эти границы. Данное решение можно обосновать, обратившись к понятию α -среза нечеткого множества (множеству α -уровня), которое для рассматриваемого примера можно определить следующим образом:

$$D_\alpha = \{u \mid \mu_D(u) \geq \alpha\}.$$

В зависимости от характера колебаний вагонопотока рассматриваемого назначения, лицо, принимающее решение (инженер по плану формирования), при необходимости может сам устанавливать значение α -уровня в соответствии со

своим опытом и навыками. Пример определения зоны оптимальных пороговых значений вагонопотока представлен на рис. 3 серой областью под множеством D_α при $\alpha = 0,4$.

В этом случае если струя вагонопотока впервые пересекает любую границу множества D , то производится корректировка данного назначения. При ее дальнейших колебаниях, остающихся в границах $[D_\alpha^1, D_\alpha^2]$, корректировочные воздействия можно не применять и производить их только при выходе колебаний за данные границы.

Четкое значение множества D , являющееся в данной задаче глобальным оптимумом, определяется как элемент, имеющий максимальную степень принадлежности к данному множеству. В этом случае четкое пороговое значение вагонопотока, оптимальное в условиях неравномерности, задается следующим образом:

$$\mu_{D^M}(U_{\Pi}^{\text{опт}}) = \begin{cases} \max \mu_D(u), & u \in K \\ 0, & u \notin K, \end{cases}$$

где K — множество элементов в D , где функция μ_D достигает максимума.

Представленные варианты решений позволят повысить устойчивость как отдельных назначений, так и плана формирования поездов в целом в течение расчетного периода.

Заключение

В данной статье представлена методика применения переменных нормативов при разработке плана формирования поездов, которая позволяет получать более устойчивые решения по сравнению с расчетом по средним значениям.

Библиографический список

1. Xiao J. Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan / J. Xiao, B. Lin // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. — 2016. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.09.002>.

2. Yaghini M. Solving railroad blocking problem using ant colony optimization algorithm / M. Yaghini, A. Foroughi, B. Nadjari // *Applied Mathematical Modelling*. — 2011. — Iss. 35. — Pp. 5579–5591. — DOI: 10.1016/j.apm.2011.05.018.

3. Yaghini M. A fuzzy railroad blocking model with genetic algorithm solution approach for Iranian railways / M. Yaghini, M. Momeni, M. Sarmadi et al. // *Applied Mathematical Modelling*. — 2015. — Iss. 39. — Pp. 6114–6125. — DOI: 10.1016/j.apm.2015.01.052.

4. Кукушкина Я. В. Зависимость величины переходящего остатка от накопления смежных составов / Я. В. Кукушкина // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2010. — № 3(24). — С. 132–140.

5. Панков А. Н. О составообразовании на сортировочных станциях / А. Н. Панков, В. А. Кудрявцев, Я. В. Кукушкина и др. // *Железнодорожный транспорт*. — 2016. — № 3. — С. 45–50.

6. Zadeh L. A. Fuzzy Sets / L. A. Zadeh // *Information and Control*. — 1965. — Vol. 8. — Pp. 338–353.

7. Dolgoplov P. Optimization of train routes based on neuro-fuzzy modeling and genetic algorithms / P. Dolgoplov, D. Konstantinov, L. Rybalchenko et al. // *Procedia Computer Science*. — 2019. — Iss. 149. — Pp. 11–18. — DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.101.

8. Milenković M. A fuzzy random model for rail freight car fleet sizing problem / M. Milenković, N. Bojović // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. — August 2013. — Vol. 33. — DOI: 10.1016/j.trc.2013.05.003.

9. Yang L. Railway freight transportation planning with mixed uncertainty of randomness and fuzziness / L. Yang, Z. Gao, K. Li // *Applied Soft Computing*. — January 2011. — Vol. 11. — Iss. 1. — DOI: 10.1016/j.asoc.2009.12.039.

10. Schneider M. Minimising economic losses due to inefficient rescheduling / M. Schneider, N. Nießen // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. — 2016. — DOI: 10.1016/j.jrtpm.2016.05.002.

11. Yang Z. Semi-active Control of High-speed Trains Based on Fuzzy PID Control / Z. Yang, J. Zhang, Z. Chen et al. // *Procedia Engineering*. — 2011. — Iss. 15. — Pp. 521–525. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.099.

12. Бадецкий А. П. Использование самонастраивающихся нечетких моделей для принятия решений о корректировке назначений плана формирования поездов / А. П. Бадецкий, О. А. Медведь // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2016: материалы международной научно-практической конференции. — СПб.: ИПТРАН, 2016. — С. 221–224.
13. Осьминин А. Т. Модуль оперативной корректировки назначений плана формирования поездов / А. Т. Осьминин, И. И. Осьминина, А. П. Бадецкий и др. // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2016): труды пятой научно-технической конференции. — М.: НИИАС, 2016. — С. 86–89.
14. Alekseychik T. The choice of transport for freight and passenger traffic in the region, using econometric and fuzzy modeling / T. Alekseychik, T. Bogachev, V. Bogachev et al. // Procedia Computer Science. — 2017. — Iss. 120. — Pp. 830–834. — DOI: 10.1016/j.procs.2017.11.314.
15. Ковалев К. Е. Механизм диагностики эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий на основе нечеткого моделирования / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин, И. Л. Сакович и др. // Автоматика на транспорте. — 2023. — Т. 9. — № 1. — С. 72–86
16. Рыбин П. К. Метод оптимизации структуры нейронной сети для задачи планирования подвода поездов к припортовым станциям / П. К. Рыбин, Р. В. Горин // Вестник транспорта Поволжья. — 2017. — № 5. — С. 55–63
17. Yugrina O. Specific features of the railway polygon operation with empty car traffic / O. Yugrina, L. Zharikova, A. Bessolitsyn et al. // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021. Vol. 2. Lecture Notes in Networks and Systems. — 2022. — Pp. 376–384. — DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_42.
18. Осьминин А. Т. Увеличение пропускных и провозных способностей за счет повышения эффективности перевозочного процесса и транспортного обслуживания / А. Т. Осьминин // Бюллетень объединенного ученого совета ОАО «РЖД». — 2018. — № 2. — С. 14–31
19. Осьминин А. Т. Реинжиниринг модели управления перевозочным процессом / А. Т. Осьминин // РЖД-Партнер. — 2020. — № 1-2. — С. 46–49.
20. Осьминин А. Т. Совершенствование системы планирования перевозок грузов / А. Т. Осьминин, И. Г. Белозерова // Железнодорожный транспорт. — 2020. — № 3. — С. 17–21.
21. Осьминин А. Т. Организация грузовых перевозок и управление товаропотоками в цепочке создания стоимости / А. Т. Осьминин // Техник транспорта: образование и практика. — 2020. — Т. 1. — № 2. — С. 94–105.
22. Кудрявцев В. А. Учет колебаний вагонопотоков при расчете плана формирования поездов / В. А. Кудрявцев, А. П. Бадецкий // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2012. — № 3. — С. 10–16.
23. Badetskii A. P. Improving the Stability of the Train Formation Plan to Uneven Operational Work / A. P. Badetskii, O. A. Medved // Transportation Research Procedia, Novosibirsk, 25–29 мая 2020 года. — Novosibirsk, 2021. — Pp. 559–567. — DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.108.
24. Бадецкий А. П. Разработка расчетных вагонопотоков плана формирования поездов с учетом их неравномерности / А. П. Бадецкий // Вестник транспорта Поволжья. — 2013. — № 3. — С. 53–60.
25. Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД». — М., 2007. — 547 с.
26. Бадецкий А. П. Учет переменного характера расчетных нормативов плана формирования поездов с использованием технологий вычислительно интеллекта / А. П. Бадецкий, О. А. Медведь, Я. В. Кукушкина // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 3. — С. 32–45. — DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-32-45
27. Бадецкий А. П. Влияние колебаний вагонопотока на параметр накопления / А. П. Бадецкий // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2014: материалы международной научно-практической конференции. — СПб., 2014. — С. 191–195.

28. Котенко А. Г. Определение порогового значения вагонопотока, оптимального в условиях неравномерности / А. Г. Котенко, А. П. Бадецкий, А. С. Бессолицын // Вестник транспорта Поволжья. — 2013. — № 4. — С. 20–27.

29. Беллман Р. Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. — М.: Мир, 1976. — С. 172–215.

Дата поступления: 27.09.2023

Решение о публикации: 22.11.2023

Контактная информация:

БАДЕЦКИЙ Александр Петрович — канд. техн. наук, доц.; badetsklii@pgups.ru

МЕДВЕДЬ Оксана Анатольевна — канд. техн. наук, доц.; oa.medved@yandex.ru

КУКУШКИНА Яна Васильевна — канд. техн. наук, доц.; kukushkina@pgups.ru

Methodology for the Application of Variable Standards by the Development of a Train Formation Plan

A. P. Badetsky, O. A. Medved', Ya. V. Kukushkina

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

For citation: Badetsky A. P., Medved' O. A., Kukushkina Ya. V. Methodology for the Application of Variable Standards by the Development of a Train Formation Plan // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 954–966. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-954-966

Summary

Purpose: The train formation plan is a fundamental technological document that affects the rational organization of the operational work of railways of JSCo “Russian Railways”. The amount of operating costs, the stability of the operation of stations, sections and transport hubs depends on its correct development. The existing practice assumes the use of the average values of its design parameters when calculating the train formation plan, without taking into account their variable nature. In this case, it is not always possible to guarantee that the optimal decision is taken on the organization of car traffic. The purpose of the article is to describe a method for taking into account the variable nature of the design parameters of the train formation plan, which will increase the stability of its individual assignments to the unevenness of operational work. **Methods:** Methods of theoretical analysis are used, existing analytical dependencies are described, which allow determining the calculated parameters of the train formation plan. Fuzzy set theory and its natural extension, fuzzy mathematics, have been used to describe the variable nature of the calculated parameters. To make an optimal decision on the adjustment of individual assignments of the train formation plan, the methods of decision-making theory have been used, namely, the Bellman-Zadeh method of decision-making in fuzzy conditions. **Results:** Calculation formulas have been obtained that allow determining the design parameters of the train formation plan in conditions of uneven operational work directly, without using auxiliary tables and graphs, having information only about the fluctuations of the car traffic of a specific purpose of the formation plan. A method has been developed for determining the threshold value of the car traffic, optimal in conditions of unevenness. **Practical significance:** Taking into account the variable nature of the design standards of the train formation plan during its development will increase the stability of its specific assignments, reduce operating costs for its implementation during the life cycle, reduce the number of operational adjustments.

Keywords: Threshold value of car traffic, fuzzy sets, unevenness of car traffic, linguistic model for extracting the train flow.

References

1. Xiao J., Lin B. Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2016. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.09.002>.
2. Yaghini M., Foroughi A., Nadjari B. Solving railroad blocking problem using ant colony optimization algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, Iss. 35, pp. 5579–5591. DOI: 10.1016/j.apm.2011.05.018.
3. Yaghini M., Momeni M., Sarmadi M. et al. A fuzzy railroad blocking model with genetic algorithm solution approach for Iranian railways. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, Iss. 39, pp. 6114–6125. DOI: 10.1016/j.apm.2015.01.052.
4. Kukushkina Ya. V. Zavisimost' velichiny perekhodyashego ostatka ot nakopleniya smezhnyh sostavov [Dependence of the amount of the rolling balance on the accumulation of adjacent train composition] *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2010, vol. 24, Iss. 3, pp. 132–140. (In Russian)
5. Pankov A. N., Kudryavtsev V. A., Kukushkina Ya. V. et al. O sostavooobrazovanii na sortirovochnykh stantsiyah [About composition formation at marshalling yards]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport]. 2016, vol. 3, pp. 45–50. (In Russian)
6. Zadeh L. A. Fuzzy Sets, Information and Control, 1965, vol. 8, pp. 338–353.
7. Dolgoplov P., Konstantinov D., Rybalchenko L. et al. Optimization of train routes based on neuro-fuzzy modeling and genetic algorithms, *Procedia Computer Science*, 2019, Iss. 149, pp. 11–18. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.101.
8. Milenković M., Bojović N. A fuzzy random model for rail freight car fleet sizing problem, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, August 2013, vol. 33. DOI: 10.1016/j.trc.2013.05.003.
9. Yang L., Gao Z., Li K. Railway freight transportation planning with mixed uncertainty of randomness and fuzziness. *Applied Soft Computing*, January 2011, vol. 11, Iss. 1. DOI: 10.1016/j.asoc.2009.12.039.
10. Schneider M., Nießen N. Minimising economic losses due to inefficient rescheduling. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2016. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2016.05.002.
11. Yang Z., Zhang J., Chen Z. et al. Semi-active Control of High-speed Trains Based on Fuzzy PID Control, *Procedia Engineering*, 2011, Iss. 15, pp. 521–525. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.099.
12. Badetskii A. P., Medved O. A. Ispol'zovanie samonastroyayushchih nechetkih modelej dlya prinyatiya reshenij o korrektyrovke naznacheniya plana formirovaniya poezdov [The use of self-adjusting fuzzy models for making decisions on adjusting the assignments of the train formation plan]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2016: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Transport of Russia: problems and prospects — 2016: materials of the international scientific and practical conference]. Saint-Petersburg: IPT RAN Publ., 2016, vol. 2, pp. 221–224. (In Russian)
13. Os'minin A. T., Os'minina I. I., Badetskii A. P. et al. Modul' operativnoj korrektyrovki naznacheniya plana formirovaniya poezdov [Module for operational adjustment of train formation plan assignments] *Intellectual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZHT-2016). Trudy pyatoy nauchno-tehnicheskoy konferencii*. [Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZHT-2016). Proceedings of the fifth Scientific and Technical Conference]. Moscow: NIIAS Publ., 2016, pp. 86–89. (In Russian)
14. Alekseychik T., Bogachev T., Bogachev V. et al. The choice of transport for freight and passenger traffic in the region, using econometric and fuzzy modeling, *Procedia Computer Science*, 2017, Iss. 120, pp. 830–834. DOI: 10.1016/j.procs.2017.11.314.
15. Kovalev K. E., Novichikhin A. V., Sakovich I. L. et al. Mekhanizm diagnostiki ekspluatatsii malointensivnykh zheleznodorozhnykh liniy na osnove nechetkogo modelirovaniya [Mechanism of diagnostics of operation of low-intensity railway lines based on fuzzy modeling]. *Avtomatika na transporte* [Automation on transport]. 2023, vol. 9, Iss. 1, pp. 72–86. (In Russian)
16. Rybin P. K., Gorin R. V. Metod optimizatsii struktury nejronnoj seti dlya zadachi planirovaniya podvoda poezdov k priortovym stantsiyam [Method of optimizing the neural network structure for the task of planning the supply of trains to port stations] *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region]. 2017, Iss. 5, pp. 55–63. (In Russian)

17. Yugrina O., Zharikova L., Bessolitsyn A. et al. Specific features of the railway polygon operation with empty car traffic. *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia* — 2021. Vol. 2. Lecture Notes in Networks and Systems, 2022, pp. 376–384. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_42.
18. Osminin A. T. Uvelichenie propusknyh i provoznyh sposobnostej za schet povysheniya effektivnosti perevozochnogo processa i transportnogo obsluzhivaniya [Increase in throughput and carrying capacity by increasing the efficiency of the transportation process and transport services] *Byulleten' ob "edinennogo Uchenogo soveta OAO "RZHD"* [Bulletin of the Joint Scientific Council of JSC "Russian Railways"]. 2018, Iss. 2, pp. 14–31. (In Russian)
19. Osminin A. T. Reinzhiniring modeli upravleniya perevozochnym processom [Reengineering of the transportation process management model]. *RZHD-Partner* [RZD-Partner]. 2020, Iss. 1-2, pp. 46–49. (In Russian)
20. Osminin A. T., Belozerova I. G. Sovershenstvovanie sistemy planirovaniya perevozok грузов [Improving the cargo transportation planning system]. *Zheleznodorozhnyj transport* [Railway transport]. 2020, Iss. 3, pp. 17–21. (In Russian)
21. Osminin A. T. Organizaciya gruzovyh perevozok i upravlenie tovaropotokami v cepochke sozdaniya stoimosti [Organization of cargo transportation and management of commodity flows in the value chain] *Tekhnika transporta: obrazovanie i praktika* [Transport technician: education and practice]. 2020, vol. 1, Iss. 2, pp. 94–105. (In Russian)
22. Kudryavtsev V. A., Badetskii A. P. Uchet kolebanij vagonopotovkov pri raschete plana formirovaniya poezdov [Accounting for fluctuations in railcar traffic when calculating the train formation plan] *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2012, Iss. 3, pp. 10–16. (In Russian)
23. Badetskii A. P., Medved O. A. Improving the Stability of the Train Formation Plan to Uneven Operational Work. *Transportation Research Procedia*, Novosibirsk, 2021, pp. 559–567. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.108.
24. Badetskii A. P. Razrabotka raschetnyh vagonopotovkov plana formirovaniya poezdov s uchetom ih neravnomernosti [Development of calculated car flows of the train formation plan taking into account their unevenness]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region]. 2013, Iss. 3, pp. 53–60. (In Russian)
25. *Instruktivnye ukazaniya po organizacii vagonopotovkov na zheleznih dorogah OAO "RZHD"* [Instructional instructions on the organization of car traffic on railways of JSC "Russian Railways"]. Moscow, 2007, 547 p. (In Russian)
26. Badetskii A. P., Medved O. A., Kukushkina Ya. V. Uchet peremennogo haraktera raschetnyh normativov plana formirovaniya poezdov s ispol'zovaniem tekhnologij vychislitel'nogo intellekta [Taking into account the variable nature of the calculation standards of the train formation plan using computational intelligence technologies]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij* [Bulletin of scientific research results]. 2023, Iss. 3, pp. 32–45. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-32-45.
27. Badetskii A. P. Vliyanie kolebanij vagonopotoka na parametr nakopleniya [The influence of fluctuations in car traffic on the accumulation parameter]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2014: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Transport of Russia: problems and prospects — 2014. Materials of the international scientific and practical conference]. 2014, pp. 191–195. (In Russian)
28. Kotenko A. G., Badetskii A. P., Bessolitsyn A. S. Opredelenie porogovogo znacheniya vagonopotoka, optimal'nogo v usloviyah neravnomernosti [Determination of the threshold value of the car traffic, optimal in conditions of unevenness]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region]. 2013, Iss. 4, pp. 20–27. (In Russian)
29. Bellman R., Zadeh L. Prinyatie reshenij v rasplyvchatykh usloviyah [Decision-making in vague conditions]. *Voprosy analiza i procedury prinyatiya reshenij* [Issues of analysis and decision-making procedures]. Moscow: Mir Publ., 1976, pp. 172–215. (In Russian)

Received: September 27, 2023

Accepted: November 22, 2023

Author's information:

Aleksandr P. BADETSKY — PhD in Engineering, Associate Professor; badetskii@pgups.ru

Oksana A. MEDVED' — PhD in Engineering, Associate Professor; oa.medved@yandex.ru

Yana V. KUKUSHKINA — PhD in Engineering, Associate Professor; kukushkina@pgups.ru

УДК 656.078.11

Обслуживание пассажиров на основе принципа «сухие ноги». Цикл статей. Часть 1

Т. М. Шманев^{1,2}

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

²Октябрьская детская железная дорога, Российская Федерация, 195112, Санкт-Петербург, Библиотечный пер., 4

Для цитирования: Шманев Т. М. Обслуживание пассажиров на основе принципа «сухие ноги». Цикл статей. Часть 1 // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 967–974. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-967-974

Аннотация

Цель: Проведение анализа существующих источников формирования толкования и использования термина и близких по смыслу и существу терминов: «транспортный узел» и «транспортно-пересадочный узел» и их оценка. **Методы:** Основными инструментами анализа и управления пассажирского комплекса при осуществлении постоянной деятельности служат: причинно-следственные связи, алгоритмизация, картирование, анализ данных и др. **Результаты:** Рассмотрены характеристики определений понятия видов ОП, ТУ, ТПУ, ТПК, обозначенных в открытых литературных и научных источниках, в том числе и иностранных, а также выведена впервые формулировка термина «транспортно-подсадочный узел». **Практическая значимость:** Новый подход к организации пассажирских перевозок, через пересмотр, актуализацию отдельных понятий (терминов) и ввод новых определений, позволит поднять транспортно-логистическую систему на новый уровень за счет перехода от организации локальных ТПУ к рассмотрению всего маршрута (по принципу «от двери до двери») пассажира на основе принципа «сухие ноги».

Ключевые слова: Пассажир, транспортный потенциал, поточное следование пассажира, принцип «сухие ноги», инфраструктура, комфорт.

Введение

Развитие различных видов транспорта и усиливающаяся в последнее время конкуренция между ними (в России это стало особенно актуально последние тридцать лет при переходе от плановой к рыночной экономике) заставляют эволюционировать и подстраиваться под современные условия старые подходы к организации перевозок пассажиров. Анализ по перераспределению пассажиропотоков между видами транспорта и направлениями движения в разное время посвящали свои работы специалисты разных научных направлений [1–7]. В настоящее время

анализ разночтений понятия «транспортного узла», особенно в железнодорожном транспорте, вызван обстоятельствами, что разные источники научных исследований, а порой и смежные области наук используют не полное, а в отдельных случаях противоречивое толкование и применение близких по смыслу и существу терминов «транспортный узел» и «транспортно-пересадочный узел» в своих работах.

В этих условиях приходится констатировать, что трактовка определений транспортного узла и транспортно-пересадочного узла требует коррекции, дополнения, а в некоторых случаях опре-



Рис. 1. Трансформация системы обслуживания пассажирских перевозок через призму организации по принципу «сухие ноги»

деления и выделения отдельных понятий (терминов). Появляется необходимость разобраться в существующих определениях, отследить эволюцию формирования определения термина и предложить классификацию определений таким образом, чтобы описание (обозначение) обеспечивало единообразие суждений [8–10]. Так наблюдается переход от исторического понятия «транспортный узел» (далее — ТУ) к понятию — транспортно-пересадочный узел (далее — ТПУ) и, в свою очередь, транспортно-пересадочный комплекс (далее — ТПК). Транспортно-подсадочный пункт (далее — ТПП) — как отдельное понятие, на локальных (подсадочных) пунктах (объектах) стыкования звеньев пассажирского движения.

В настоящем исследовании представлена сравнительная характеристика определений понятия ТПУ, проведен анализ текущего состояния и развития ТПУ, приведена необходимость обоснования формирования ТПП в рамках логистических цепочек маршрутов пассажиров с учетом стыкования звеньев маршрута — как различными видами транспорта, так и в рамках одного вида транспорта, а также переход от состояния статуса ТПУ к состоянию статуса ТПК.

Необходимо отметить, что четкого определения для ТПУ в контексте железнодорожных пас-

сажирских перевозок не существует. Существует общее (для перевозки грузов и пассажиров) понятие ТУ, определение которого закреплено в энциклопедии «Железнодорожный транспорт» под ред. Н. С. Конарева, 1994, с. 458 [11]. Как следует из определения ТУ, стыки нескольких видов транспорта, выполняющих перевозки пассажиров, могут быть в условиях агломерации значительно удалены друг от друга и зачастую находиться в разных частях агломерации. При этом такой критерий обслуживания пассажиров, как качество, в данном случае играет второстепенную роль. Это обусловлено тем, что каждый вид транспорта обустроивал и проектировал только свой стык и рассмотрение обслуживания пассажиров по принципу «сквозного маршрута» не производилось.

В настоящее время отмечаются повышенные требования к ряду показателей. К ним относятся: время в пути, время прибытия и отправления поездов, обслуживание пассажиров на вокзалах, безопасность, комфортабельность поездки, соблюдение выполнения расписания движения, организация питания и досуга. Эти повышенные требования пассажиров потребовали пересмотра подхода к системе обслуживания пассажирских перевозок и созданию ТПУ вместо ТУ (рис. 1). При этом ТПУ тоже, в свою очередь, может являться

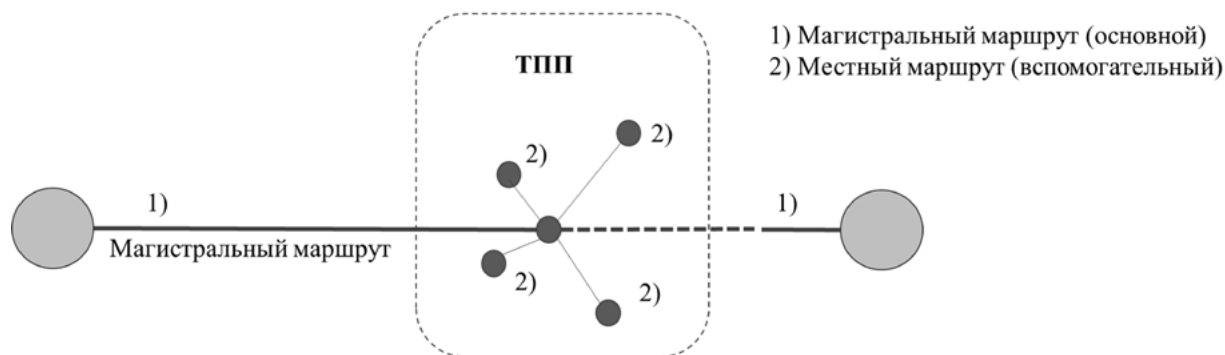


Рис. 2. Схема звена маршрутизации пассажиров (ТПП)

промежуточной формой и преобразовываться в ТПК как на стадии проектирования, так и в ходе реконструкции существующих транспортных узлов. В таком случае ТПУ становится местом притяжения деловой и досугово-бытовой активности населения, а не только используется как место пересадки пассажиров [12–15].

Основная задача, которая ставилась автором, — проанализировать и сконцентрировать источники формирования понятия (терминологическую информацию) с учетом фактического положения дел и формулировок «тела» определений [16–18]. Хочется отметить, что основополагающим применением терминологии изначально служит профессиональная деятельность сферы перевозки грузов морским транспортом, отчасти и железнодорожным, поэтому идею разграничения необходимо отдельно использовать и тиражировать в пассажирском транспорте, но с учетом тех аспектов и потребностей, чтобы можно было развивать эту систему уже на поле логистики пассажирского комплекса. По итогам исследований выявлено, что часть понятий уже адаптирована и частично применяется в пассажирской логистике перевозок по аналогии с существующими определениями (ОП, ТУ, ТПУ, ТПК). Кроме того, предлагается выделить и использовать новое определение (ТПП).

Как было упомянуто выше, определение ТПП важно выделить (вывести) из определения оста-

новочного пункта в отдельную категорию для решения вопросов на паритетной основе (общее целеполагание, синхронизация) и взаимодействия эксплуатационных служб на регламентирующей основе, связанных с организацией обслуживания оборудования и инфраструктуры, с целью разработки методик, позволяющих повысить эффективность обслуживания пассажиров с местными органами власти. Информационная емкость термина видится автором в такой формулировке: транспортно-подсадочный пункт (ТПП) — отдельный вид остановочного пункта, комбинирующий в себе элементы ОП и ТУ (от ОП — в части посадки-высадки пассажиров на проходящие поезда; от ТУ — в части увязанных в единую (иногда сквозную) технологию процессов, которые направлены на пересадку пассажиров с одного вида транспорта на другой). В ТПП также могут использоваться совместные организационные формы управления и собственности. Как правило, ТПП расположен в населенных пунктах, имеющих логистическую автомобильную связь с населенными пунктами (малыми, а также не имеющими железнодорожного сообщения), и является местом (хабом) притяжения к магистральному (основному) маршруту местных (касательно-вспомогательных) (рис. 2).

В сумме ожидается базирующийся на объекте транспортно-подсадочного пункта стабильный пассажиропоток, сейчас это работает в контексте

«сжато» — под расписание поездов или отсутствует вовсе, когда пассажир прибывает в пункт посадки на железнодорожный транспорт и зачастую находится в длительном ожидании, без организации со стороны перевозчика и местных органов власти пунктов посадки, с минимальным набором услуг и комфортом для пассажира.

Заключение

В первом цикле статьи определен основной информационный фон [19], выступающий ориентиром для дальнейшего исследования, и дано определение новому понятию ТПП, которые позволят выработать новый подход к организации интермодальных и мультимодальных перевозок за счет перехода от организации локальных ТПУ к рассмотрению всего маршрута (цепочек) пассажиров, с охватом всех участков маршрута (транспортных звеньев), как на этапе преобразования, так и проектирования (как внутри вида транспорта, так и межвидовых). Данный результат вносит отличие от ситуативного подхода (или принципа) и предусматривает переход уже к сетцентрическому подходу, который, в свою очередь, делает акцент на развитие не только локального ТПУ, а увязывает в едином географическом пространстве всю идею концепции организации маршрута (по принципу «от двери до двери») пассажира на основе принципа «сухие ноги».

Таким образом, можно сделать вывод, что в настоящее время использование принципа «сухие ноги», при организации и развитии ТПУ, применяется на основе ситуативного подхода, который заключается в принятии решений на основе критериев, которые предусматривают конкретно существующие условия внутренней и внешней среды. Но, учитывая приведенные примеры терминологических понятий (имеющие как положительные, так и отрицательные аспекты), практика показывает, что необходима выработка нового подхода и методик к органи-

зации маршрута пассажира на основе принципа «сухие ноги».

Библиографический список

1. Гледьян Т. Особенности мирового опыта проектирования транспортно-пересадочного комплекса / Т. Гледьян // Инновации и инвестиции. — 2022. — № 4. — С. 169–171. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-mirovogo-opyta-proektirovaniya-transportno-peresadochnogo-kompleksa> (дата обращения: 14.09.2023).
2. Torab F. Passengers preferences for using emerging modes as first/last mile transport to and from a multimodal hub case study Delft Campus railway station / F. Torab, Y. Aragah, N. svan Oort et al. // Case Studies on Transport Policy. — March 2022. — Vol. 10. Iss. 1. — Pp. 300–314. — DOI: 10.1016/j.cstp.2021.12.011.
3. Chauhan V. Demystifying service quality of Multimodal Transportation Hub (MMTH) through measuring users' satisfaction of public transport / V. Chauhan, A. Gupta, M. Parida // Transport Policy. — March 2021. — Vol. 102. — Pp. 47–60. — DOI: 10.1016/j.tranpol.2021.01.004.
4. Воронов В. А. Транспортно-пересадочные узлы и интермодальные комплексы. Термины и определения / В. А. Воронов, К. Ю. Чистяков // АМІТ. — 2020. — № 3(52). — С. 252–264. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/transportno-peresadochnye-uzly-i-intermodalnye-kompleksy-terminy-i-opredeleniya> (дата обращения: 14.09.2023).
5. Свечкарь Е. С. Функционально-планировочные приемы при реконструкции железнодорожных вокзалов и преобразование их в транспортно-пересадочные узлы / Е. С. Свечкарь, А. Г. Адигеев // АМІТ. — 2021. — № 3(56). — С. 104–118. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/funktsionalno-planirovochnye-priemy-pri-rekonstruktsii-zheleznodorozhnyh-vokzalov-i-preobrazovanie-ih-v-transportno-peresadochnye> (дата обращения: 14.09.2023).
6. Калмыков М. Ю. Транспортно-пересадочного узла Купчино / М. Ю. Калмыков, Е. К. Коровяковский, А. Е. Поляков и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2022. — № 1. — С. 56–67.

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-transportno-peresadochnogo-uzla-kupchino> (дата обращения: 14.09.2023).

7. Monzón A. Efficient Urban Interchanges: The City-HUB Model / A. Monzón, S. Hernández, F. Di Ciommo // *Transportation Research Procedia*. — 2016. Vol. 14. — Pp. 1124–1133. — DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.183.

8. Зеленина Н. М. Ассертивность: проблема определения понятия / Н. М. Зеленина // *Universum: психология и образование*. — 2022. — № 6(96). — С. 39–41. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/assertivnost-problema-opredeleniya-ponyatiya> (дата обращения: 14.09.2023).

9. Шеенко Е. И. Общее представление и сравнительная характеристика определений понятия «спорт» / Е. И. Шеенко, В. В. Юров, П. П. Сапрыкин // *Известия ТулГУ. Физическая культура. Спорт*. — 2021. — № 7. — С. 121–129. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obshee-predstavlenie-i-sravnitel'naya-harakteristika-opredeleniy-ponyatiya-sport> (дата обращения: 14.09.2023).

10. Казанцев С. В. Экономическая безопасность. Определение понятий / С. В. Казанцев // *Мир новой экономики*. — 2014. — № 2. — С. 48–53. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskaya-bezopasnost-opredelenie-ponyatiy> (дата обращения: 14.09.2023).

11. Железнодорожный транспорт: энциклопедия // Гл. ред. Н. С. Конарев. — М.: Большая рос. энцикл., 1994. — 559 с.

12. Козлов П. И. Методика формирования комплексного критерия оценки условий движения пассажиров в пространстве закрытых коммуникационных элементов интермодальных транспортно-пересадочных узлов / П. И. Козлов // *Вестник евразийской науки*. — 2018. — № 3. — С. 54–63. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-formirovaniya-kompleksnogo-kriteriya-otsenki-usloviy-dvizheniya-passazhirov-v-prostranstve-zakrytyh-kommunikatsionnyh> (дата обращения: 14.09.2023).

13. Владыкина М. В. Понятие «транспортно-пересадочный узел» в контексте города Новосибирска / М. В. Владыкина, Т. Л. Вальтеран // *Творчество и современность*. — 2020. — № 1(12). — С. 108–118. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ponyatie-transportno-peresadochnyy-uzel-v-kontekste-goroda-novosibirska> (дата обращения: 30.09.2023).

14. Шаймарданова К. А. Транспортно-пересадочный узел как градообразующий фактор развития периферийных территорий / К. А. Шаймарданова, Е. И. Прокофьев // *Известия КазГАСУ*. — 2019. — № 4(50). — С. 175–182. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/transportno-peresadochnyy-uzel-kak-gradoobrazuyushiy-faktor-razvitiya-periferiynyh-territoriy> (дата обращения: 30.09.2023).

15. Боловинцев М. Ю. Организация работы вокзальных комплексов и транспортно-пересадочных узлов / М. Ю. Боловинцев, М. М. Зязиков // *StudNet*. — 2021. — № 6. — С. 2147–2171. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-raboty-vokzalnyh-kompleksov-i-transportno-peresadochnykh-uzlov> (дата обращения: 30.09.2023).

16. Дьякова О. В. Методологические основы экономического механизма функционирования предприятий строительного комплекса в вопросах управления затратами: основная терминология и понятийный инструментарий / О. В. Дьякова // *ИВД*. — 2018. — № 3(50). — С. 100–107. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-osnovy-ekonomicheskogo-mehanizma-funktsionirovaniya-predpriyatiy-stroitel'nogo-kompleksa-v-voprosah-upravlenie> (дата обращения: 30.09.2023).

17. Грибанов Ю. И. Цифровая экономика как новая система управления / Ю. И. Грибанов // *Известия СПбГЭУ*. — 2022. — № 1(133). — С. 124–129. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-ekonomika-kak-novaya-sistema-upravleniya> (дата обращения: 30.09.2023).

18. Нечаева Н. А. Информационно-понятийная структура терминологии / Н. А. Нечаева // *Вопросы когнитивной лингвистики*. — 2010. — № 1. — С. 112–115. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionno-ponyatiynaya-struktura-terminologii> (дата обращения: 30.09.2023).

19. Си Ф. Развитие концепции устойчивого развития / Ф. Си // *Инновации и инвестиции*. — 2022. — № 1. — С. 4–9. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-kontseptsii-ustoychivogo-razvitiya> (дата обращения: 30.09.2023).

Дата поступления: 03.10.2023

Решение о публикации: 21.11.2023

Контактная информация:

ШМАНЕВ Тимофей Михайлович — канд. техн. наук, доц.; t.schmaniov@yandex.ru

Passenger Service Based on the Principle of "Clean Feet". A Series of Articles. Part 1

T. M. Shmanev^{1,2}

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

²Oktyabrskaya Children's Railway, 4, Bibliotchny Lane, Saint Petersburg, 195112, Russian Federation

For citation: Shmanev T. M. Passenger Service Based on the Principle of "Clean Feet". A Series of Articles. Part 1 // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 967–974. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-967-974

Summary

Purpose: Conducting a comparative analysis of the existing sources of the formation of the interpretation and use of the term and terms similar in meaning and essence: "transport hub" and "transport interchange hub" and their assessment. **Methods:** The main tools for the analysis and management of the passenger complex in the implementation of permanent activities are: cause-and-effect relationships, algorithmization, mapping, data analysis, etc. **Results:** The characteristics of the definitions of the concept of types of SP (stop point), TH (transport hub), TIH (transport interchange hub) and TIC (transport interchange complex) designated in open literary and scientific sources, including foreign ones, are considered, and the formulation of the term is derived for the first time: "transport boarding hub". **Practical significance:** A new approach to the organization of passenger transportation, through the revision, updating of individual concepts (terms) and the introduction of new definitions, will allow the transport and logistics system to be raised to a new level, due to the transition from the organization of local TIHs to the consideration of the entire route (based on the principle of "door to door") of the passenger based on the principle of "clean feet".

Keywords: Passenger, transport potential, passenger flow movement, the principle of "clean feet", infrastructure, comfort.

References

1. Gled'yan T. Osobennosti mirovogo opyta proektirovaniya transportno-peresadochnogo kompleksa [Features of world experience in designing a transport interchange complex]. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and investments]. 2022, Iss. 4, pp. 169–171. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-mirovogo-opyta-proektirovaniya-transportno-peresadochnogo-kompleksa> (accessed: September 14, 2023).
2. Torab F., Aragh Y., Oort svan N. et al. Passengers preferences for using emerging modes as first/last mile transport to and from a multimodal hub case study Delft Campus railway station. *Case Studies on Transport Policy*. March 2022, vol. 10, Iss. 1, pp. 300–314. DOI: 10.1016/j.cstp.2021.12.011.
3. Chauhan V., Gupta A., Parida M. Demystifying service quality of Multimodal Transportation Hub (MMTH) through measuring users' satisfaction of public transport. *Transport Policy*. March 2021, vol. 102, pp. 47–60. DOI: 10.1016/j.tranpol.2021.01.004.
4. Voronov V. A., Chistyakov K. Yu. Transportno-peresadochnye uzly i intermodal'nye komplekсы. Terminy i opredeleniya. *AMIT*, 2020, Iss. 3(52), pp. 252–264. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/transportno-peresadochnye-uzly-i-intermodalnye-komplekсы-terminy-i-opredeleniya> (accessed: September 14, 2023).
5. Svechkar' E. S., Adigeev A. G. *Funktsional'no-planirovochnye priemy pri rekonstruktsii zheleznodorozhnykh vokzalov i preobrazovanie ikh v transportno-peresadochnye uzly* [Functional planning techniques for the reconstruction

of railway stations and their transformation into transport hubs]. AMIT, 2021, Iss. 3(56), pp. 104–118. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/funktsionalno-planirovochnye-priemy-pri-rekonstruktsii-zheleznodorozhnyh-vokzalov-i-preobrazovanie-ih-v-transportno-peresadochnye> (accessed: September 14, 2023).

6. Kalmykov M. Yu., Korovyakovskiy E. K., Polyakov A. E. et al. Transportno-peresadochnogo uzla Kupchino [Kupchino transport hub]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [News of the St. Petersburg University of Railway Transport]. 2022, Iss. 1, pp. 56–67. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-transportno-peresadochnogo-uzla-kupchino> (accessed: September 14, 2023).

7. Monzón A., Hernández S., Ciommo F. Di Efficient Urban Interchanges: The City-HUB Model. *Transportation Research Procedia*, 2016, vol. 14, pp. 1124–1133. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.183.

8. Zelenina N. M. Assertivnost': problema opredeleniya ponyatiya [Assertiveness: the problem of defining the concept]. *Universum: psikhologiya i obrazovanie* [Universum: psychology and education]. 2022, Iss. 6(96), pp. 39–41. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/assertivnost-problema-opredeleniya-ponyatiya> (accessed: September 14, 2023).

9. Sheenko E. I., Yurov V. V., Saprykin P. P. Obshee predstavlenie i sravnitel'naya kharakteristika opredeleniy ponyatiya "sport" [General presentation and comparative characteristics of the definitions of the concept "sport"]. *Izvestiya TulGU. Fizicheskaya kul'tura. Sport* [News of Tula State University. Physical Culture. Sport]. 2021, Iss. 7, pp. 121–129. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obshee-predstavlenie-i-sravnitel'naya-kharakteristika-opredeleniy-ponyatiya-sport> (accessed: September 14, 2023).

10. Kazantsev S. V. Ekonomicheskaya bezopasnost'. Opredelenie ponyatii [Economic security. Definition of concepts]. *Mir novoy ekonomiki* [World of new economics]. 2014, Iss. 2, pp. 48–53. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskaya-bezopasnost-opredelenie-ponyatiy> (accessed: September 14, 2023).

11. *Zheleznodorozhnyy transport: entsiklopediya; gl. red. N. S. Konarev* [Railway transport: encyclopedia; ch. ed. N. S. Konarev]. Moscow: Bol'shaya ros. entsikl. Publ., 1994, 559 p.

12. Kozlov P. I. Metodika formirovaniya kompleksnogo kriteriya otsenki usloviy dvizheniya passazhirov v prostranstve zakrytykh kommunikatsionnykh elementov intermodal'nykh transportno-peresadochnykh uzlov [Methodology for the formation of a complex criterion for assessing the conditions of passenger movement in the space of closed communication elements of intermodal transport hubs]. *Vestnik evraziyskoy nauki* [Bulletin of Eurasian Science]. 2018, Iss. 3, pp. 54–63. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-formirovaniya-kompleksnogo-kriteriya-otsenki-usloviy-dvizheniya-passazhirov-v-prostranstve-zakrytykh-kommunikatsionnykh> (accessed: September 14, 2023).

13. Vladykina M. V., Val'teran T. L. Ponyatie «transportno-peresadochnyy uzel» v kontekste goroda Novosibirska [The concept of "transport hub" in the context of the city of Novosibirsk]. *Tvorchestvo i sovremennost'* [Creativity and modernity]. 2020, Iss. 1(12), pp. 108–118. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ponyatie-transportno-peresadochnyy-uzel-v-kontekste-goroda-novosibirska> (accessed: September 30, 2023).

14. Shaymardanova K. A., Prokof'ev E. I. Transportno-peresadochnyy uzel kak gradoobrazuyushchiy faktor razvitiya periferiynykh territoriy [Transport hub as a city-forming factor in the development of peripheral territories]. *Izvestiya KazGASU* [News of KazGASU]. 2019, Iss. 4(50), pp. 175–182. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/transportno-peresadochnyy-uzel-kak-gradoobrazuyushchiy-faktor-razvitiya-periferiynykh-territoriy> (accessed: September 30, 2023).

15. Bolovintsev M. Yu., Zyazikov M. M. *Organizatsiya raboty vokzal'nykh kompleksov i transportno-peresadochnykh uzlov* [Organization of work of station complexes and transport hubs]. StudNet, 2021, Iss. 6, pp. 2147–2171. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-raboty-vokzalnykh-kompleksov-i-transportno-peresadochnykh-uzlov> (accessed: September 30, 2023).

16. D'yakova O. V. *Metodologicheskie osnovy ekonomicheskogo mekhanizma funktsionirovaniya predpriyatiy stroitel'nogo kompleksa v voprosakh upravleniya zatratami: osnovnaya terminologiya i ponyatiynyy instrumentariy* [Methodological foundations of the economic mechanism of functioning of enterprises of the construction com-

plex in matters of cost management: basic terminology and conceptual tools]. *IVD*, 2018, Iss. 3(50), pp. 100–107. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-osnovy-ekonomicheskogo-mehanizma-funktsionirovaniya-predpriyatiy-stroitel'nogo-kompleksa-v-voprosah-upravlenie> (accessed: September 30, 2023).

17. Griбанov Yu. I. Tsifrovaya ekonomika kak novaya sistema upravleniya [Digital economy as a new management system]. *Izvestiya SPbGEU* [News of St. Petersburg State Economic University]. 2022, Iss. 1(133), pp. 124–129. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-ekonomika-kak-novaya-sistema-upravleniya> (accessed: September 30, 2023).

18. Nechaeva N. A. Informatsionno-ponyatiynaya struktura terminologii [Information and conceptual structure of terminology]. *Voprosy kognitivnoy lingvistiki* [Questions of

cognitive linguistics]. 2010, Iss. 1, pp. 112–115. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionno-ponyatiynaya-struktura-terminologii> (accessed: September 30, 2023).

19. Si F. Razvitie kontseptsii ustoychivogo razvitiya [Development of the concept of sustainable development]. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and investments]. 2022, Iss. 1, pp. 4–9. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-kontseptsii-ustoychivogo-razvitiya> (accessed: September 30, 2023).

Received: October 03, 2023

Accepted: November 21, 2023

Author's information:

Timofey M. SHMANEV — PhD in Engineering, Associate Professor; t.schmaniov@yandex.ru

УДК 378:011.5

Снижение экономических потерь в контактной сети и воздушных линиях, электрифицированных на переменном токе

М. В. Шевлюгин, А. А. Куликов, Д. В. Семенова

Российский университет транспорта (МИИТ), Российская Федерация, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9/9

Для цитирования: Шевлюгин М. В., Куликов А. А., Семенова Д. В. Снижение экономических потерь в контактной сети и воздушных линиях, электрифицированных на переменном токе // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 975–986. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-975-986

Аннотация

Цель: Снизить экономические потери в контактной сети и воздушных линиях, электрифицированных на переменном токе. Существующие электромагнитные влияния на железной дороге на переменном токе приводят к существенным экономическим потерям. Дополнительно присутствует проблема пережога контактного провода (КП) при прохождении нейтральной вставки с поднятым токоприемником под напряжением на высокоскоростной магистрали (ВСМ). Пережог КП приводит к выходу из строя контактной сети, затратам на ремонт, возможному повреждению чужого имущества и подвижного состава. В совокупности это все представляет собой большие экономические потери. **Методы:** Проводился анализ материальных и временных затрат на устранение проблем, которые возникают по причине пережога КП или из-за использования ручного труда при монтаже ВЛ, в сравнении с предлагаемыми решениями для снижения экономических потерь. **Результаты:** В решении проблемы негативного электромагнитного влияния контактной сети (КС) на воздушную линию (ВЛ) призван помочь мобильный механизированный комплекс (ММК), который выполняет транспозицию проводов ВЛ в 6 шагов с прокруткой на 60° каждую опору. Данный способ позволит расположить провода ВЛ на равноудаленном расстоянии от контактного провода. Прокрутка с частотой в каждую опору выровнит несимметрию погонных электрических параметров. В совокупности ММК выполняет монтаж в автоматизированном режиме. Проблемы пережога КП способно снизить устройство изолирующего сопряжения (УИС) КС. УИС КС представляет собой набор ступенчатых сопротивлений, которые располагаются на крайних участках фазных проводов перед и после нейтральной вставки. Оно направлено на снижение тока до безопасной величины, который не приведет к пережогу контактного провода, выходу КС и/или подвижного состава из строя и возможному причинению вреда чужому имуществу. **Практическая значимость:** Итогом является комплекс мер в виде ММК для снижения экономических потерь в ВЛ от влияния КС и УИС КС для снижения потерь в контактной сети за счет сохранения работоспособности контактного провода.

Ключевые слова: Транспозиция, шестишаговая транспозиция, монтажный комплекс, электромагнитное влияние, несимметрия, пережог, контактный провод, устройство изолирующего сопряжения, ступенчатые сопротивления, воздушная линия, контактная сеть.

Количество экономических потерь на железной дороге зависит от количества ошибок, допущенных при проектировании того или иного участка дороги. В случае электрифицированной

железной дороги проблемы будут отличаться в соответствии с типом тока, которым питается подвижной состав. На железной дороге переменного тока на сегодняшний день основными

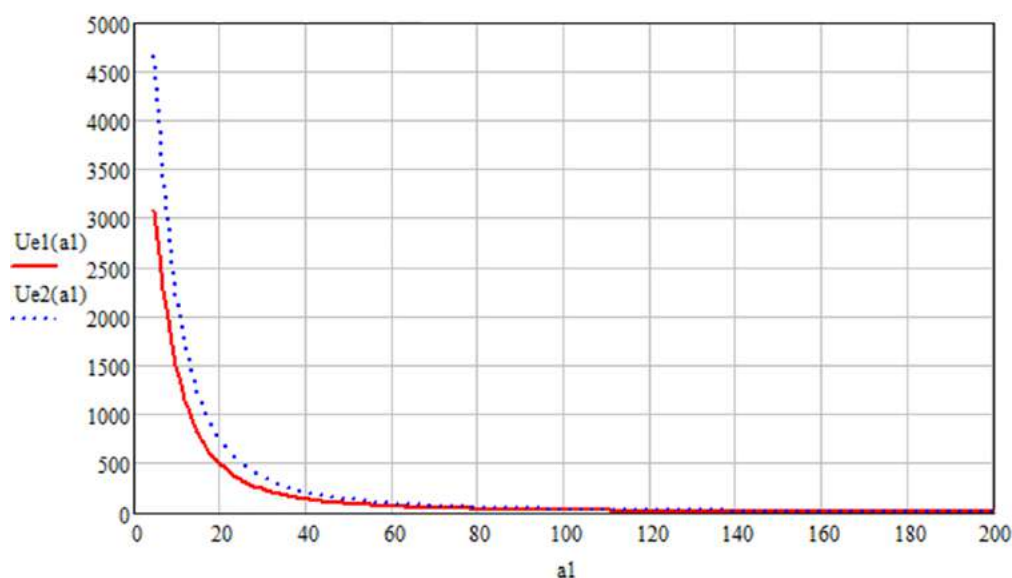


Рис. 1. Зависимость электрических влияний участка тяговой сети переменного тока на одиночный провод изолированной от земли воздушной линии:
 Ue1 — электрические влияния на однопутном участке, Ue2 — на двухпутном участке

источниками экономических потерь являются потери электроэнергии. Поэтому можно выделить два основных направления потерь: проблемы линий, расположенных вдоль контактной сети, и проблемы непосредственно самой контактной сети.

Качество электроэнергии напрямую связано с эффективностью подвижного состава, работающего от постоянного или переменного тока [1]. Помимо внедрения новых методик расчета и учета электроэнергии, актуальным остается решение задачи практического плана [2–4]. Одной из таких проблем является негативное электромагнитное влияние контактной сети (КС) переменного тока на воздушную линию продольного электроснабжения [5].

В ходе исследования электрических влияний тяговой сети переменного тока 27,5 кВ на воздушную линию были получены зависимости, отражающие характер негативных электромагнитных влияний (рис. 1, 2).

Расчет электрических влияний производился по формуле [6]

$$U_{\text{э}} = U_{\text{к}} \frac{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}{\ln\left(\frac{2b_{\text{к}}}{\rho_{\text{к}}}\right)},$$

где $U_{\text{к}}$ — напряжение контактной сети, $U_{\text{к}} = 27\,500$ В;

$b_{\text{к}}$ — высота подвеса эквивалента контактной сети, можно принять $b_{\text{к}} = 6,93$ м;

$\rho_{\text{к}}$ — радиус эквивалента контактной подвески, м.

Исследование проводилось для однопутного и двухпутного участков с учетом ширины сближения контактной сети и линии от 5 до 200 м, изменение высота подвеса $b_{\text{д}}$ принималось от 3 до 15 м.

Из рис. 1 следует, что при ширине сближения провода с контактной сетью, равной 5 м, электрическое влияние на провод достигает 3072 и 4654 В для однопутного и двухпутного участка соответственно. Заметное снижение электрического влияния происходит с увеличением ширины сближения до 40 м. При достижении ширины сближения

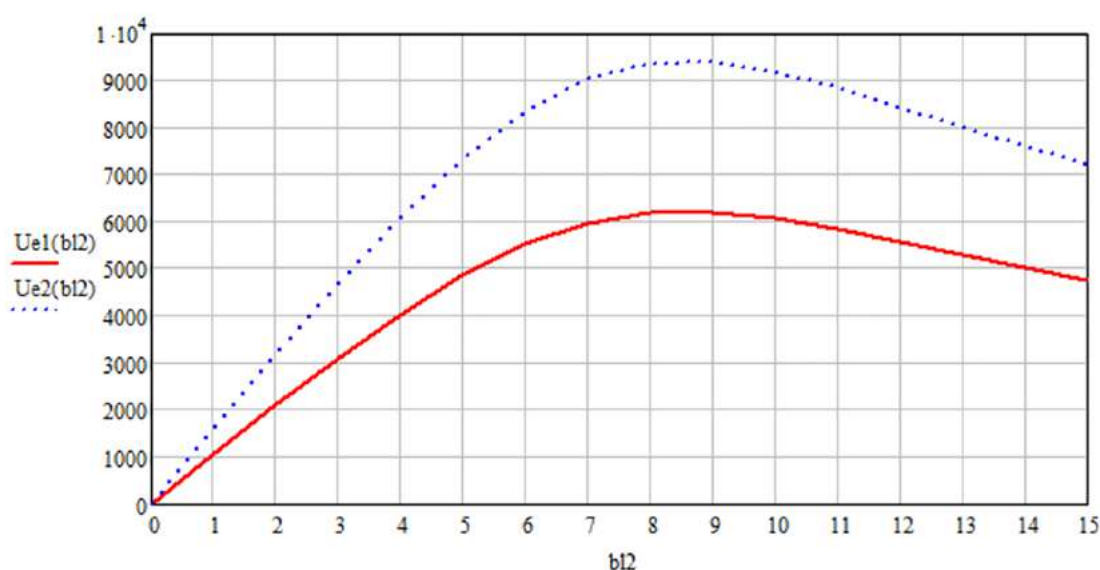


Рис. 2. Зависимость для исследования электрических влияний участка тяговой сети переменного тока на одиночный провод изолированной от земли воздушной линии:

U_{e1} — электрические влияния на однопутном участке, U_{e2} — на двухпутном участке

в 200 м электрическое влияние снижается до незначительных величин.

На рис. 2 представлена зависимость электрических влияний от изменения высоты подвеса от 3 до 15 м с учетом ширины сближения 5 м. Максимальные значения будут наблюдаться при $b_d = 9$ м и составляют 6200 и 9400 В соответственно для однопутных и двухпутных участков.

Проведенное исследование показывает существенное влияние при сближении воздушной линии и контактной сети железной дороги переменного тока. Также в [7] приводится описание математической модели напряжений нулевой последовательности, которые возникают в ВЛ 6–10 кВ железнодорожного транспорта по причине близкого расположения к КС, в том числе на опорах КС. В виде решения предлагается интегрирование дополнительных емкостей на каждой фазе.

Другим решением, которое также является итогом исследования на рис. 1 и 2, будет отдаление ВЛ от КС на существенное расстояние. Но есть места, где нерационально или невозможно использовать этот метод. Такими местами явля-

ются тоннели, горная местность, поймы рек, районы вечной мерзлоты.

Помимо указанных электромагнитных влияний существует другая сторона проблемы — выполнение монтажа ВЛ в ручном или в полуавтоматическом режимах. В обоих случаях присутствует высокая вероятность ошибки по причине человеческого фактора, а также имеются высокие временные и экономические затраты и другие проблемы, присущие указанным видам монтажа.

Для решения сразу всех указанных выше проблем предлагается устройство монтажа транспозиционной геометрии проводов ВЛ [8]. В первую очередь данное устройство направлено на осуществление симметрии погонных электрических параметров, которые и являются причиной низкого качества передаваемой энергии. По [9] для выполнения симметрии необходимо выполнять транспозицию проводов по вершинам равностороннего треугольника. Но предлагаемое авторами данной статьи устройство выполняет транспозицию с заметным отличием от принятой на сегод-

нявший день [10], а именно в шесть шагов, получившую название «шестишаговая транспозиция» [11].

Благодаря устройству транспозиции [12] при монтаже сохраняется равнопеременное равноудаленное расстояние между КС и каждым фазным проводом, которые, в свою очередь, расположены в вершинах равностороннего треугольника и совершают вращение на 60° на каждую опору [13]. Совокупность устройств, выполняющих данный монтаж ВЛ с прокруткой проводов, называется мобильным механизированным комплексом (ММК).

ММК включает в себя крутильную машину [14], манипулятор для перемещения проводов в пространстве, устройства закрепления и натяжения проводов на опоре, набор электродвигателей, датчиков и программных блоков. За управление всей системой ММК отвечает индивидуальное программное обеспечение, спроектированное с учетом технического задания. Сам ММК базируется на передвижной платформе, например полуприцеп стандартного типа.

ММК позволяет снизить количество рабочих в бригаде до 4 человек:

- бригадир, который контролирует выполнение работы;
- оператор ММК;
- водитель;
- разнорабочий — для выполнения вспомогательной работы.

Стоимость ММК по предварительным расчетам составляет около 20 млн рублей. Потери электроэнергии после монтажа ВЛ с помощью ММК и шестишаговой транспозиции стремятся к нулю. Потери проводов по причине воровства [15–17] или повреждения устраняются, так как при новом методе монтаж производится из барабанов, установленных в крутильную машину, непосредственно на опоры.

Снижение временных затрат составляет 70 % благодаря монтажу с помощью ММК в три раза

быстрее, чем существующим ручным методом с привлечением техники.

Один монтажный комплекс позволяет экономить в год от 5 до 7 млн рублей, в зависимости от сохранения или отсутствия двух работников на вышке манипулятора для контроля выполненной ММК работы. С учетом вышеизложенного окупаемость ММК составляет от 3 до 4 лет. Срок жизни ММК ограничен сроком жизни элементов электродвигателей и манипулятора, которые, в свою очередь, выбираются из производимых сегодня заводских решений, но не менее 10 лет. Срок жизни крутильной машины неограничен.

При снижении потерь от КС на ВЛ за счет сведения электромагнитного влияния к нулю остается вопрос эффективности КС переменного тока. Новые участки железной дороги стремятся проектировать с учетом известных на сегодняшний день проблем КС. Но при этом остается ряд нерешенных задач. Одной из таких является проход нейтральной вставки подвижным составом с поднятым токоприемником, что запрещено правилами технической эксплуатации [18]. Несоблюдение этого условия вызовет образование открытой электрической дуги на изолирующих сопряжениях, в результате появится короткое замыкание между фазой *A* и фазой *B* тягового трансформатора и контактная сеть будет перегорать и падать [19]. Это приводит к большим материальным затратам на восстановление КС, подвижного состава, а также возможное устранение вреда, нанесенного чужому имуществу.

Особенно актуальной эта проблема становится при проектировании высокоскоростной магистрали (ВСМ), где наиболее сложной задачей является обеспечение контактной подвеской проход ЭПС нейтральной вставки под рабочим током [20]. Чтобы исключить возникновение электрической дуги, а следовательно, и перегорание контактного провода, необходимо снизить питающий ток до минимального значения, кото-

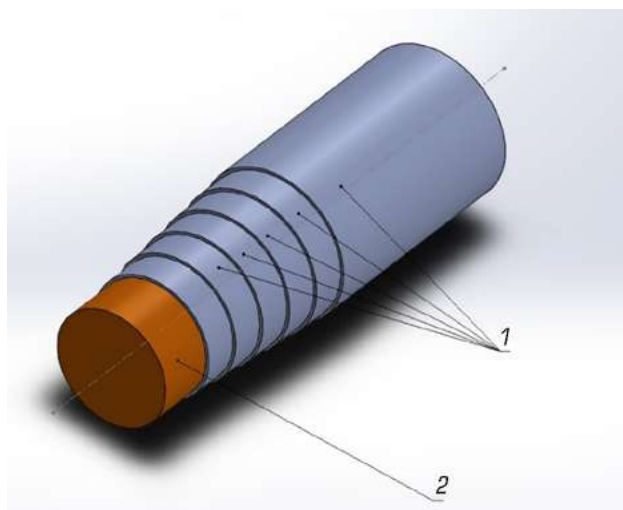


Рис. 3. Схематичное представление ступенчатых сопротивлений на контактном проводе:

1 — сопротивления разных номиналов,
2 — контактный провод

рое будет безопасным для провода в случае прохождения нейтральной вставки без опускания токоприемника.

С этим призвано справиться устройство изолирующего сопряжения контактной сети (УИС КС) и нейтральной вставки высокоскоростной железной дороги переменного тока [21], представляющее собой набор соединенных последовательно сопротивлений разного номинала, который возрастает, приближаясь к нейтральной вставке. Благодаря стремительному развитию технологий и процессов производства авторами предлагается заменить стандартные изоляторы сопротивлениями на композитной основе, формирующимися непосредственно на контактном проводе [22]. Такие сопротивления получили название «ступенчатые сопротивления», так как в схематичном виде образуют ступени из номиналов рассчитанных сопротивлений (рис. 3).

УИС КС располагается на конце фазного провода перед нейтральной вставкой и в начале провода другой фазы после нейтральной вставки.

Характеристики УИС КС зависят от количества участков с сопротивлениями, их величины и длины каждого участка. В ходе исследования [23] была построена математическая модель, принципиальная схема УИС КС, а также получены зависимости основных параметров участка цепи с УИС КС.

Изначально было выбрано 240 участков с постепенным равномерным изменением сопротивления на каждом последующем участке, пока не будет достигнут ток при размыкании $I_{\text{раз}} = 0,5$ А. В процессе были получены зависимости максимальных напряжений на участках при количестве участков $i = 40$ и $i = 90$ (рис. 4).

Как видно из рис. 4, максимальное напряжение при $i = 40$ составляет 4700 В и не превышает граничных условий, поэтому данное количество участков принимается за основное. После этого необходимо было посчитать количество тепла, которое, в свою очередь, будет находиться по закону Джоуля — Ленца:

$$Q_k = \sum_{i=1}^{40} \left[(I_i)^2 R_{yk} t \right].$$

Исследование проводилось для длины УИС КС $l_{\text{общ}} = 5$ м, $l_{\text{общ}} = 3$ м (рис. 5), $l_{\text{общ}} = 2$ м при разных скоростях движения подвижного состава $V_{\text{пс}} = 100$ км/ч, $V_{\text{пс}} = 200$ км/ч, $V_{\text{пс}} = 300$ км/ч, $V_{\text{пс}} = 400$ км/ч, соответствующих кривым Q_{024} , Q_{023} , Q_{022} , Q_{021} .

По рис. 5 видно, что максимальное количество тепла будет выделяться на участке № 5 вне зависимости от скорости подвижного состава. Уменьшением общей длины УИС КС удалось снизить максимальное количества тепла, выделяемого на проводе и при скорости $V_{\text{пс}} = 100$ км/ч, количество выделяемого тепла составляет $Q_{024\text{max}} = 0,613$ Вт · ч. Дальнейшее уменьшение длины УИС КС приводит к увеличению трудозатрат при формировании ступенчатых сопротивлений из-за плотной компоновки.

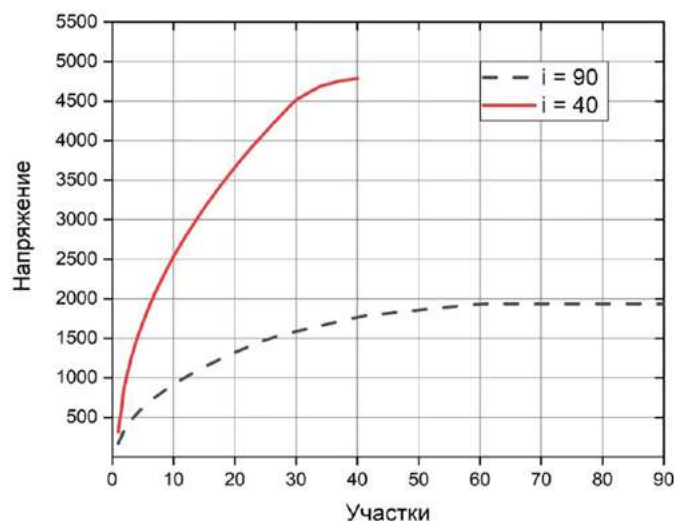
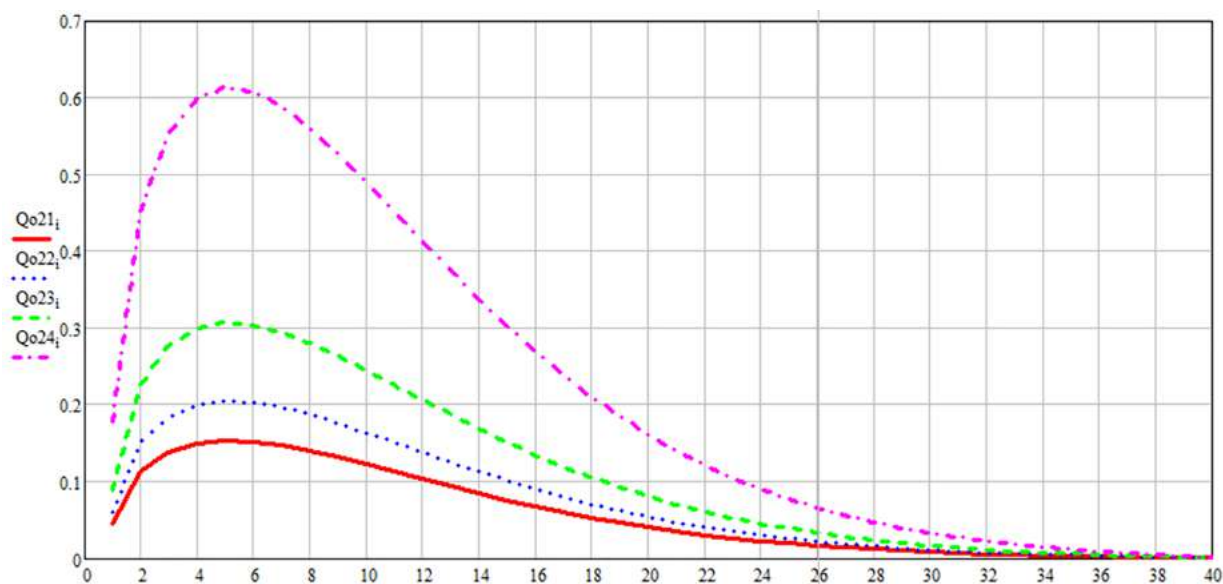


Рис. 4. Кривые напряжения

Рис. 5. Максимальные значения теплоты Q на i -тых участках при длине УИС КС $L_{\text{общ}} = 3$ м и при различных $V_{\text{пс}}$

На рис. 6 представлены зависимости максимального нагрева участка T_k , на котором находится подвижной состав при условии $l_{\text{общ}} = 3$ м, $i = 40$. Расчет производился также для четырех вариантов скоростей подвижного состава.

Как можно увидеть, участок № 5, которому сообщалось максимальное количества тепла (рис. 5), нагревается всего на 8 °С (рис. 6), что не приведет к расплавлению провода и выходу из строя контактной сети [24].

С учетом вышесказанного можно сделать вывод, что благодаря использованию УИС КС [21] прохождение нейтральной вставки на ВСМ возможно с поднятым токоприемником без последствий для КС, подвижного состава, а также чужого имущества благодаря снижению тока момента отрыва токоприемника от фазного провода.

Стоимость УИС КС напрямую зависит от стоимости формирования ступенчатых сопротивлений на контактом проводе и по предварительным

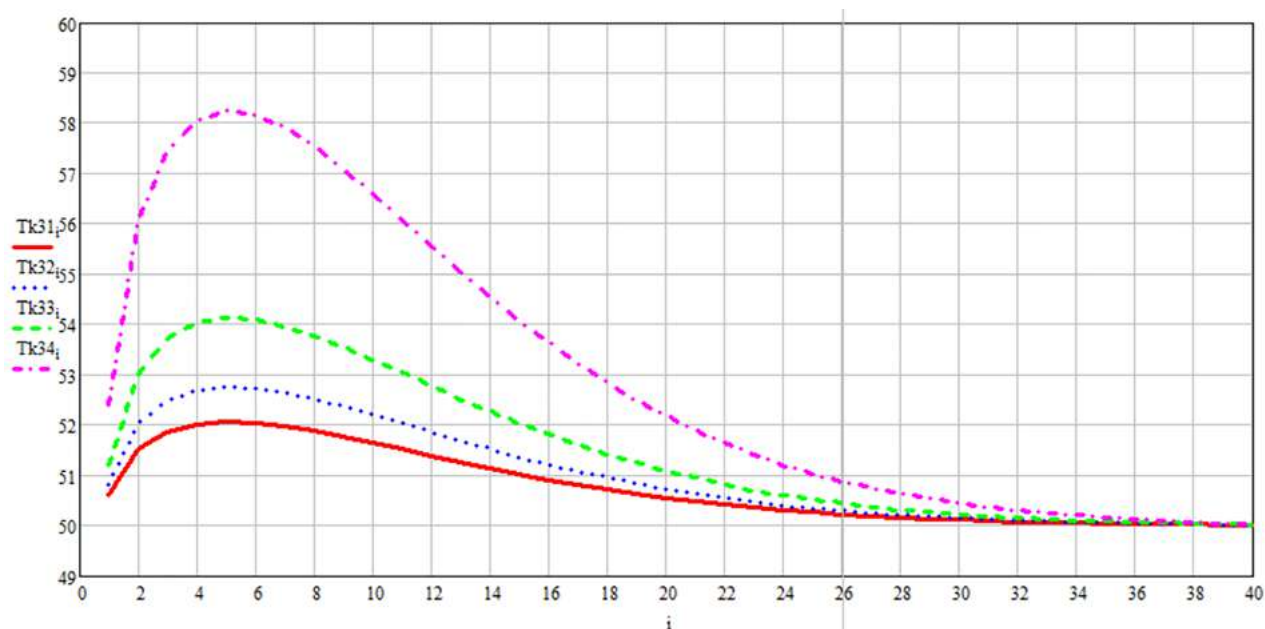


Рис. 6. Максимальные температуры i -тых участков T_k при максимальных Q на i -тых участках

расчетам должна составлять в 3–5 раз больше, чем аналогичная длина обычного контактного провода. Общая длина УИС КС составляет 3 м, а следовательно, на нейтральную вставку суммарно понадобится 6 м контактного провода со ступенчатыми сопротивлениями. В итоге на фоне общей стоимости строительства контактной сети это будет незначительное удорожание процесса. В большей мере удорожание за счет использования УИС КС будет заметно при модернизации старых контактных подвесок.

В любом из перечисленных случаев будет решена главная проблема — высокие экономические потери при обрыве контактного провода по причине перегрева во время движения по ВСМ с поднятым токоприемником.

Выводы

1. Экономические потери напрямую зависят от качества контактной сети и качества электроэнергии, которая передается по ней.
2. При сближении ВЛ и КС сильно проявляется электромагнитное влияние, которое является источником электрических потерь.

3. ММК призван решить проблему негативного электромагнитного влияния КС на ВЛ за счет автоматизации процесса монтажа, а также благодаря использованию шестишаговой транспозиции.

4. Данное решение позволит существенно снизить экономические потери, благодаря чему окупаемость ММК составит 3–4 года.

5. На ВСМ существует проблема перегрева контактного провода при прохождении нейтральной вставки с поднятым токоприемником, что ведет к большим экономическим потерям, вплоть до выхода из строя участка железной дороги и нанесения вреда чужому имуществу.

6. Решить проблему перегрева КП призвано УИС КС, которое представляет собой набор ступенчатых сопротивлений, расположенных на крайних частях фазных проводов.

7. Найденные участки с максимальным количеством тепла и максимальные температуры нагрева этих участков позволяют сделать вывод об отсутствии перегрева контактного провода, выхода из строя контактной сети и сохранении иного имущества.

8. Использование УИС КС позволит снизить экономические потери от пережога контактного провода, соответствующего выхода из строя контактной сети и/или подвижного состава, чужого имущества.

Библиографический список

1. Истомин С. Г. Оценка составляющих потерь электроэнергии электроподвижным составом и устройствами электроснабжения / С. Г. Истомин, А. Е. Перестенко // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2020. — Т. 17. — Вып. 3. — С. 387–396. — DOI: 10.20295/1815-588.
2. Истомин С. Г. Методология интеллектуального контроля потребления электроэнергии тягового подвижного состава железных дорог с учетом влияния изменяющихся в реальном времени параметров системы тягового электроснабжения и графиков движения поездов / С. Г. Истомин, К. И. Доманов, А. П. Шатохин и др. // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы VII всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Омск, 18 ноября 2022 года. — Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2022. — С. 480–490.
3. Дементьев А. П. Унификация первичных форм учета расхода электроэнергии в моторвагонном подвижном составе / А. П. Дементьев, И. Н. Спицына, А. А. Прудников и др. // Инновации в жизнь. — 2020. — № 1(32). — С. 17–23.
4. Дрожжина И. В. Оптимизация расходов электроэнергии моторвагонным подвижным составом за счет совершенствования системы планирования затрат электроэнергии / И. В. Дрожжина, А. А. Прудников, В. С. Голавский // Управленческий учет. — 2022. — № 8-2. — С. 258–265. — DOI: 10.25806/uu8-22022258-265.
5. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. — М.: УМК МПС РФ, 2002. — 637 с.
6. Карпов И. П. Расчеты электрического и магнитного влияния тяговой сети системы 25 кВ в послеаварийный период / И. П. Карпов // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2020. — № 2. — С. 6–11.
7. Бодров П. А. Моделирование электромагнитного влияния контактной сети в схеме замещения воздушной линии электропередачи / П. А. Бодров, Ю. И. Жарков, Ю. Г. Семенов и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2018. — № 1(69). — С. 119–125.
8. Пат. 2701601 Российская Федерация. Устройство монтажа транспозиционной геометрии проводов воздушной высоковольтной линии электроснабжения с повышенной симметрией погонных электрических параметров линии, находящейся в условиях интенсивного воздействия электромагнитного поля контактной сети железных дорог, электрифицированных на переменном токе / Е. Ю. Семенова, Ю. В. Иодко, Д. В. Семенова и др. Бюл. № 28
9. Зильберман С. М. Транспозиция линий электропередачи и ее неожиданный эффект / С. М. Зильберман, Т. Г. Красильникова, В. З. Манусов и др. // Электричество. — 2006. — № 5. — С. 11–16.
10. СП 226.1326000.2014. Электроснабжение нетяговых потребителей. Правила проектирования, строительства и реконструкции. — М., 2014.
11. Бадер М. П. Автоматизация монтажа проводов высоковольтной линии тягового электроснабжения на переменном токе / М. П. Бадер, А. А. Куликов // Электротехника. — 2022. — № 9. — С. 2–7. — DOI: 10.53891/00135860_2022_9_2.
12. Пат. 2460654 Российская Федерация. Устройство транспозиционной геометрии проводов воздушной высоковольтной линии электроснабжения с повышенной симметрией погонных электрических параметров линии, находящейся в условиях интенсивного воздействия электромагнитного поля контактной сети железных дорог, электрифицированных на переменном токе / Е. Ю. Семенова, Ю. В. Иодко, В. И. Карпенко и др. Бюл. № 25.
13. Бадер М. П. Меры защиты воздушных линий от воздействия контактной сети переменного тока / М. П. Бадер, Е. Ю. Семенова, А. А. Куликов // Энергетические системы. — 2022. — № 1. — С. 38–45. — DOI 10.34031/ES.2022.1.004.
14. Бадер М. П. Перспективные решения Для воздушных высоковольтных линий железнодорожного транспорта, электрифицированных на переменном токе / М. П. Бадер, Е. Ю. Семенова, А. А. Куликов // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2021: материалы Международной-научно практической конференции, Санкт-Петербург, 09–10 ноября 2021 года. Том 1. — Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, 2021. — С. 275–279.

15. Электронное периодическое издание RusCable. Ru. — URL: https://www.ruscable.ru/news/2023/05/24/_V_Bashkirii_raskryli_seriu_xischenij_provodov_LEP/ (дата обращения: 20.10.2023).
16. Электронное периодическое издание RusCable. Ru. URL: https://www.ruscable.ru/news/2023/05/18/Kabely_ukrali_zhiteli_saxalinskogo_sela_10_dnej_zh/ (дата обращения: 20.10.2023).
17. Электронное периодическое издание RusCable. Ru. URL: https://www.ruscable.ru/news/2023/04/06/_Ukravshego_kabelya_na_55 mln_rublej_zhitelya_Nori/ (дата обращения: 20.10.2023).
18. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Утверждены Приказом Минтранса России от 21 декабря 2010 г. № 286. М., 2011.
19. Марквардт К. Г. Контактная сеть / К. Г. Марквардт, И. И. Власов. — М.: Транспорт, 1977. — 3-е издание. — 272 с.
20. Беляев И. А. Устройство и обслуживание контактной сети при высокоскоростном движении / И. А. Беляев. — М.: Транспорт, 1989. — 143 с.
21. Патент 2533768 Российская Федерация. Устройство изолирующего сопряжения контактной сети и нейтральной вставки для высокоскоростных магистралей железных дорог, электрифицированных на переменном токе / Д. В. Семенова, В. И. Карпенко, Ю. В. Иодко и др. — 2006. — Бюл. № 31.
22. Шевлюгин М. В. Повышение эффективности высокоскоростной контактной подвески на переменном токе / М. В. Шевлюгин, Д. В. Семенова // Электричество. — 2021. — № 5. — С. 39–43. — DOI: 10.24160/0013-5380-2021-5-39-43.
23. Шевлюгин М. В. Расчет ступенчатых сопротивлений для высокоскоростной магистрали / М. В. Шевлюгин, Д. В. Семенова, А. А. Куликов // Кабели и провода. — 2023. — № 3(401). — С. 15–21. — DOI: 10.52350/2072215X_2023_3_15.
24. Ли В. Н. Механизмы разупрочнения и разрушения контактного провода / В. Н. Ли, А. И. Кондратьев, Е. В. Муромцева и др. // Дефектоскопия. — 2003. — № 12. — С. 32–38.

Дата поступления: 18.10.2023

Решение о публикации: 21.11.2023

Контактная информация:

ШЕВЛЮГИН Максим Валерьевич — д-р техн. наук, проф.; mx_sh@mail.ru

КУЛИКОВ Андрей Андреевич — аспирант; andrey.kulikov.1997@mail.ru

СЕМЕНОВА Дарья Владимировна — аспирант; semenovadar.ya@mail.ru

Reduction of Economic Losses in the Contact Network and Overhead Lines Electrified with Alternating Current

M. V. Shevlyugin, A. A. Kulikov, D. V. Semenova

Russian University of Transport (MIIT), 9/9, Obraztsova St., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Shevlyugin M. V., Kulikov A. A., Semenova D. V. Reduction of Economic Losses in the Contact Network and Overhead Lines Electrified with Alternating Current // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 975–986. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-975-986

Summary

Purpose: To reduce economic losses in the contact network (CN) and overhead lines (OL) electrified with alternating current. The existing electromagnetic influences on the alternating current railway lead to significant economic losses. Additionally, there is a problem of the contact wire (CW) burnout during the passage of a neutral section with a raised pantograph under voltage on a high-speed railway line (HSRL). CW burnout leads to failure of the contact network, repair costs, possible damage to other people's property and rolling stock. As a whole, all this represents significant economic losses. **Methods:** The analysis of material and time costs for the elimination of problems that arise due to the CW burnout or due to the use of manual labor during the installation of OL has been carried out, in comparison with the proposed solutions to reduce economic losses.

Results: In solving the problem of the negative electromagnetic influence of the contact line (CL) on the OL, a mobile mechanized complex (MMC) is designed to help, which performs the transposition of the OL wires in 6 steps with scrolling by 60° each support. This method will allow us to place the OL wires equidistantly from the contact wire. Scrolling with once-per-support frequency will align the asymmetry of the linear electrical parameters. All in all, MMC performs installation in an automated mode. The problems of the CW burnout can be reduced by the insulating coupling device (ICD) of the CL. ICD CL is a set of step resistances, which are located at the outer sections of the phase wires before and after the neutral section. It is aimed at reducing the current to a safe value, which will not lead to the contact wire burnout, failure of the CN and/or rolling stock and possible damage to other people's property. **Practical significance:** The result is a set of measures in the form of MMC to reduce economic losses in overhead lines from the influence of CN and ICD CL to reduce losses in the contact network by maintaining the operability of the contact wire.

Keywords: Transposition, six-step transposition, installation complex, electromagnetic influence, asymmetry, burnout, contact wire, insulating coupling device, step resistances, overhead line, contact network

References

1. Istomin S. G., Perestenko A. E. Otsenka sostavlyayushchikh poter' elektroenergii elektropodvizhnym sostavom i ustroystvami elektrosnabzheniya [Assessment of the components of electricity losses by electric rolling stock and power supply devices]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2020, vol. 17, Iss. 3, pp. 387–396. DOI: 10.20295/1815-588. (In Russian)
2. Istomin S. G., Domanov K. I., Shatokhin A. P. et al. Metodologiya intellektual'nogo kontrolya potrebleniya elektroenergii tyagovogo podvizhnogo sostava zheleznikh dorog s uchetom vliyaniya izmenyayushchikhsya v real'nom vremeni parametrov sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya i grafikov dvizheniya poezdov [Methodology for intelligent control of electricity consumption of traction rolling stock of railways, taking into account the influence of real-time changing parameters of the traction power supply system and train schedules]. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov: materialy VII vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Omsk, 18 noyabrya 2022 goda* [Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction: materials of the VII All-Russian scientific and technical conference with international participation, Omsk, November 18, 2022]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2022, pp. 480–490. (In Russian)
3. Dement'ev A. P., Spitsyna I. N., Prudnikov A. A. et al. Unifikatsiya pervichnykh form ucheta raskhoda elektroenergii v motorvagonnom podvizhnym sostave [Unification of primary forms of accounting for electricity consumption in multi-unit rolling stock]. *Innovatsii v zhizn'* [Innovations in life]. 2020, Iss. 1(32), pp. 17–23. (In Russian)
4. Drozhzhina I. V., Prudnikov A. A., Golavskiy V. S. Optimizatsiya raskhodov elektroenergii motorvagonnym podvizhnym sostavom za schet sovershenstvovaniya sistemy planirovaniya zatrat elektroenergii [Optimization of electricity costs of multi-unit rolling stock by improving the system for planning electricity costs]. *Upravlencheskiy uchet* [Management Accounting]. 2022, Iss. 8-2, pp. 258–265. DOI: 10.25806/uu8-22022258-265. (In Russian)
5. Bader M. P. *Elektromagnitnaya sovместимость* [Electromagnetic compatibility]. Moscow: UMK MPS RF Publ., 2002, 637 p. (In Russian)
6. Karpov I. P. Raschety elektricheskogo i magnitnogo vliyaniya tyagovoy seti sistemy 25 kV v posleavariynnyy period [Calculations of the electrical and magnetic influence of the traction network of a 25 kV system in the post-accident period]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. 2020, Iss. 2, pp. 6–11. (In Russian)
7. Bodrov P. A., Zharkov Yu. I., Semenov Yu. G. et al. Modelirovanie elektromagnitnogo vliyaniya kontaktnoy seti v skheme zameshcheniya vozduшной linii elektroperedachi [Modeling of the electromagnetic influence of the contact network in the equivalent circuit of an overhead power line].

Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [Bulletin of the Rostov State Transport University]. 2018, Iss. 1(69), pp. 119–125. (In Russian)

8. Semenova E. Yu., Iodko Yu. V., Semenova D. V. et al. *Ustroystvo montazha transpozitsionnoy geometrii provodov vozduшной высоковольтной линии электроснабжения с повышенной симметрией погонных электрических параметров линии, nakhodyashchiesya v usloviyakh intensivnogo vozdeystviya elektromagnitnogo polya kontaktной сети железных дорог, elektrifitsirovannykh na peremennom toke* [Device for mounting the transposition geometry of wires of an overhead high-voltage power supply line with increased symmetry of linear electrical parameters of the line, located under conditions of intense influence of the electromagnetic field of the contact network of railways electrified on alternating current]. Patent RF, no. 2701601, 2019. (In Russian)

9. Zil'berman S. M., Krasil'nikova T. G., Manusov V. Z. Transpozitsiya liniy elektroperedachi i ee neozhidannyi effekt [Transposition of power lines and its unexpected effect]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2006, Iss. 5, pp. 11–16. (In Russian)

10. SP 226.1326000.2014. *Elektrosnabzhenie netyagovykh potrebiteley. Pravila proektirovaniya, stroitel'stva i rekonstruktsii* [SP 226.1326000.2014. Power supply to non-traction consumers. Rules for design, construction and reconstruction]. Moscow, 2014. (In Russian)

11. Bader M. P., Kulikov A. A. Avtomatizatsiya montazha provodov vysokovol'tnoy linii tyagovogo elektrosnabzheniya na peremennom toke [Automation of installation of wires of a high-voltage line of traction power supply on alternating current]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2022, Iss. 9, pp. 2–7. DOI: 10.53891/00135860_2022_9_2. (In Russian)

12. Semenova E. Yu., Iodko Yu. V., Karpenko V. I. et al. Pat. Rossiyskaya Federatsiya. *Ustroystvo transpozitsionnoy geometrii provodov vozduшной высоковольтной линии электроснабжения с повышенной симметрией погонных электрических параметров линии, nakhodyashchiesya v usloviyakh intensivnogo vozdeystviya elektromagnitnogo polya kontaktной сети железных дорог, elektrifitsirovannykh na peremennom toke* [Design of transposition geometry of wires of an overhead high-voltage power supply line with

increased symmetry of linear electrical parameters of the line, located under conditions of intense influence of the electromagnetic field of the contact network of railways electrified with alternating current]. Patent RF, no. 2460654, 2012. (In Russian)

13. Bader M. P., Semenova E. Yu., Kulikov A. A. Mery zashchity vozduшных линий от vozdeystviya kontaktной сети переменного тока [Measures to protect overhead lines from the influence of the AC contact network]. *Energeticheskie sistemy* [Energy systems]. 2022, Iss. 1, pp. 38–45. DOI 10.34031/ES.2022.1.004. (In Russian)

14. Bader M. P., Semenova E. Yu., Kulikov A. A. Perspektivnye resheniya Dlya vozduшных высоковольтных линий zhelezнодорожного транспорта, elektrifitsirovannykh na peremennom toke [Promising solutions for overhead high-voltage lines of railway transport, electrified with alternating current]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2021: materialy Mezhdunarodnoy-nauchno prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 09–10 noyabrya 2021 goda. Tom I* [Transport of Russia: problems and prospects — 2021: materials International scientific and practical conference, St. Petersburg, November 09–10, 2021, vol. 1]. St. Petersburg: Institut problem transporta im. N. S. Solomenko RAN Publ., 2021, pp. 275–279. (In Russian)

15. *Elektronnoe periodicheskoe izdanie RusCable.Ru* [Electronic periodical RusCable.Ru]. Available at: https://www.ruscable.ru/news/2023/05/24/_V_Bashkirii_raskryli_seri_u_xischenij_provodov_LEP/ (accessed: October 20, 2023).

16. *Elektronnoe periodicheskoe izdanie RusCable.Ru* [Electronic periodical RusCable.Ru]. Available at: https://www.ruscable.ru/news/2023/05/18/Kabely_ukrali_zhiteli_saxalinskogo_sela_10_dnej_zh/ (accessed: October 20, 2023). (In Russian)

17. *Elektronnoe periodicheskoe izdanie RusCable.Ru* [Electronic periodical RusCable.Ru]. Available at: https://www.ruscable.ru/news/2023/04/06/_Ukravshego_kabelya_na_55 mln_rublej_zhitelya_Nori/ (accessed: October 20, 2023).

18. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii. Utverzhdeny Priказом Mintransa*

Rossii ot 21 dekabrya 2010 g. № 286 [Rules for technical operation of railways of the Russian Federation. Approved by Order of the Ministry of Transport of Russia dated December 21, 2010 № 286]. Moscow, 2011. (In Russian)

19. Markvardt K. G., Vlasov I. I. *Kontaktnaya set'* [Contact network]. Moscow: Transport Publ., 1977, 3rd edition, 272 p. (In Russian)

20. Belyaev I. A. *Ustroystvo i obsluzhivanie kontaktnoy seti pri vysokoskorostnom dvizhenii* [Construction and maintenance of contact networks for high-speed traffic]. Moscow: Transport, 1989, 143 p. (In Russian)

21. Semenova D. V., Karpenko V. I., Iodko Yu. V. et al. *Ustroystvo izoliruyushchego sopryazheniya kontaktnoy seti i neytral'noy vstavki dlya vysokoskorostnykh magistralei zheleznykh dorog, elektrifitsirovannykh na peremennom toke* [Device for an insulating interface between a contact network and a neutral insert for high-speed railway lines electrified with alternating current]. Patent RF, no. 2533768, 2006. (In Russian)

22. Shevlyugin M. V., Semenova D. V. *Povyshenie effektivnosti vysokoskorostnoy kontaktnoy podveski na peremennom toke* [Increasing the efficiency of high-speed contact suspension on alternating current]. *Elektrichestvo*

[Electricity]. 2021, Iss. 5, pp. 39–43. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-5-39-43. (In Russian)

23. Shevlyugin M. V., Semenova D. V., Kulikov A. A. *Raschet stupenchatykh soprotivleniy dlya vysokoskorostnoy magistrali* [Calculation of step resistances for a high-speed line]. *Kabeli i provoda* [Cables and wires]. 2023, Iss. 3(401), pp. 15–21. DOI: 10.52350/2072215X_2023_3_15. (In Russian)

24. Li V. N., Kondrat'ev A. I., Muromtseva E. V. et al. *Mekhanizmy razuprochneniya i razrusheniya kontaktnogo provoda* [Mechanisms of softening and destruction of contact wire]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy]. 2003, Iss. 12, pp. 32–38. (In Russian)

Received: October 18, 2023

Accepted: November 21, 2023

Author's information:

Maxim V. SHEVLYUGIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; mx_sh@mail.ru

Andrey A. KULIKOV — Postgraduate Student; andrey.kulikov.1997@mail.ru

Darya V. SEMENOVA — Postgraduate Student; semenovadar.ya@mail.ru

УДК 629.423.1: 621.333

Показатели качества потребления энергии в коллекторном и асинхронном тяговых приводах электровозов переменного тока

А. А. Зарифьян¹, А. М. Евстафьев²

¹ООО «ТМХ Инжиниринг», Российская Федерация, 141009, Мытищи, ул. Колонцова, 4

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

Для цитирования: Зарифьян А. А., Евстафьев А. М. Показатели качества потребления энергии в коллекторном и асинхронном тяговых приводах электровозов переменного тока // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 987–998. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-987-998

Аннотация

Цель: Провести экспериментальное исследование показателей качества потребления электрической энергии для серийно выпускаемых грузовых электровозов переменного тока 2(3)ЭС5К с коллекторным тяговым приводом и электровозов 2(3)ЭС5С с асинхронным тяговым приводом, дать их сопоставление и сравнительный анализ. **Методы:** Приведены основные технические характеристики коллекторного ТЭД НБ-514Е и асинхронного ТЭД ДТА-1100. Предложена схема измерений напряжения и тока на сетевой обмотке трансформатора. Мониторинг параметров выполнен непосредственно на электровозах с помощью специального метрологического оборудования. Обработка экспериментальных данных основана на разложении исходного сигнала на гармонические составляющие при помощи быстрого преобразования Фурье (FFT). **Результаты:** Получены параметры гармоник напряжения и тока, сдвиг фаз, а также значения активной и реактивной мощностей соответствующих гармоник. Выполнен анализ спектрального состава напряжения и тока. Сравнительный анализ результатов, полученных для электровозов с коллекторным и асинхронным тяговыми приводами в режиме тяги, показал, что коэффициент мощности составляет 0,65 и 0,99 соответственно; а коэффициент нелинейных искажений тока — 0,53 и 0,15. Сделан вывод о гораздо более высоком качестве потребления электрической энергии в асинхронном тяговом приводе. **Практическая значимость:** Основываясь на полученных конкретных значениях показателей качества потребления электрической энергии в коллекторном и асинхронном тяговых приводах в режиме тяги, можно перейти к получению экономических оценок перевода локомотивного парка ОАО «РЖД» на электровозы нового поколения серии 2(3)ЭС5С.

Ключевые слова: грузовой электровоз переменного тока, коллекторный тяговый привод, асинхронный тяговый привод, экспериментальное исследование качества потребления электрической энергии.

Введение

Проблема повышения энергетической эффективности и качества потребления электрической энергии тягового подвижного состава постоянно находится в центре внимания [1, 2]. Причиной этого является чрезвычайно высокий уровень расходов на приобретение топливно-энерге-

тических ресурсов (ТЭР). Годовые суммарные затраты ОАО «РЖД» на закупку ТЭР превышают 300 млрд рублей [3]. Добавим к сказанному, что закупки ТЭР осуществляются по рыночным ценам, в результате чего, например, в 2019 году затраты на их приобретение в денежном исчислении увеличились на 3,9 %, тогда как объем потре-

*а**б*Рис. 1. Коллекторный ТЭД НБ-514Е (*а*) и асинхронный ТЭД ДТА-1100 (*б*)

бления ТЭР в натуральном выражении (в пересчете на условное топливо) снизился на 0,9 %.

Грузовые электровозы переменного тока первого поколения ВЛ60 и ВЛ80 [4, 5] имели силовую электрическую схему, состоящую из тягового трансформатора, выпрямителя на диодах, сглаживающих реакторов и коллекторных тяговых электродвигателей (ТЭД) пульсирующего тока с последовательным возбуждением. Напряжение на ТЭД изменялось ступенчато.

Следующее поколение, а именно выпускаемые серийно с 2005 года электровозы 2(3)ЭС5К семейства «Ермак» [6], отличается наличием управляемого выпрямительно-инверторного преобразователя. Благодаря этому удалось реализовать плавное регулирование напряжения на ТЭД, что благоприятно сказалось на тяговых свойствах. Электровозы переменного тока с коллекторными ТЭД пульсирующего тока с последовательным возбуждением остаются наиболее распространенными локомотивами на путях РЖД. Основными недостатками тягового электропривода электровозов этих серий являются значительное потребление реактивной мощности, искажение формы напряжения и тока в первичной обмотке тягового

трансформатора, появление значительных гармонических составляющих тока в контактной сети. Изучению процессов в коллекторном тяговом приводе, в том числе методами математического моделирования, посвящены работы [7–10].

В настоящее время на смену локомотивам с коллекторными ТЭД приходит техника нового поколения, оснащенная асинхронным тяговым приводом [11], достоинства которого в целом общепризнаны, однако дискуссии по этому поводу продолжаются [12]. Коллекторный ТЭД НБ-514Е показан на рисунке 1, *а*, асинхронный ТЭД ДТА-1100 — на рис. 1, *б*.

Основные технические характеристики этих ТЭД приведены в табл. 1 и 2.

Следует отметить, что в отраслевой технической литературе отсутствуют результаты прямых сравнительных экспериментальных исследований тяговых приводов с коллекторными и асинхронными ТЭД отечественного производства. В настоящей работе рассматривается задача экспериментального получения показателей качества потребления электрической энергии в коллекторном и асинхронном тяговом приводе, их сопоставление и сравнительный анализ.

Таблица 1. Основные технические характеристики ТЭД НБ-514Е

Параметры	Режим работы	
	продолжительный	часовой
Мощность на валу, кВт	765	820
Частота вращения, об/мин	940	920
Масса, кг	4350	
Удельная мощность, кВт/кг	0,176	0,189
Передаточное число тягового редуктора	88/21 = 4,19	

Таблица 2. Основные технические характеристики ТЭД ДТА-1100

Параметры	Режим работы		
	Продолжительный	Часовой	30-минутный
Мощность на валу, кВт	1050	1100	1300
Частота вращения, об/мин	1634	1337	1782
Масса, кг	2200		
Удельная мощность, кВт/кг	0,477	0,5	0,59
Передаточное число тягового редуктора	121/18 = 6,72		

Схема измерения напряжения и тока

Ниже приведены результаты исследований процессов в 1) тяговом приводе электровоза 2(3) ЭС5К с коллекторным ТЭД пульсирующего тока НБ-514Е и 2) тяговом приводе электровоза 2(3) ЭС5С с асинхронным ТЭД ДТА-1100.

Мониторинг параметров систем тягового подвижного состава выполнен непосредственно на электровозах с помощью специального метрологического оборудования. Измерение тока и напря-

жения в ходе испытаний производилось по схеме, показанной на рис. 2: измерительный трансформатор напряжения расположен на сетевой обмотке тягового трансформатора, бесконтактный датчик тока основан на эффекте Холла, сигналы поступают на вход АЦП измерительного комплекса. Частота дискретизации составляет 0,5 мс.

Мгновенные и действующие значения тока и напряжения во входной цепи электровоза регистрируются при помощи измерительного ком-

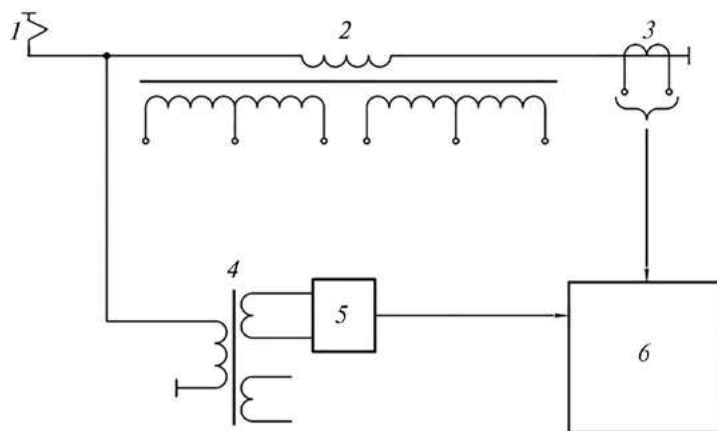


Рис. 2. Схема измерений:

1 — контактная сеть; 2 — тяговый трансформатор; 3 — датчик тока; 4 — измерительный трансформатор напряжения; 5 — датчик напряжения; 6 — измерительный комплекс

плекса и для выполнения последующих расчетов сохраняются в форме текстовых таблиц в функции времени.

Обработка экспериментальных данных

Предметом дальнейшего рассмотрения являются записи периодических несинусоидальных токов и напряжений. Несинусоидальные периодические напряжения и токи могут быть представлены как сумма членов ряда Фурье, полученных методом FFT [13, 14]:

$$\begin{cases} u(t) = U_0 + U_{1m} \cos(\omega_1 t + \alpha_1) + \\ + U_{2m} \cos(\omega_2 t + \alpha_2) + \dots, \\ i(t) = I_0 + I_{1m} \cos(\omega_1 t + \beta_1) + \\ + I_{2m} \cos(\omega_2 t + \beta_2) + \dots \end{cases} \quad (1)$$

где U_{im} , I_{im} — амплитудные значения.

Действующие значения гармоник напряжения и тока находим как

$$U_{im} = \frac{U_{im}}{\sqrt{2}}, \quad I_{im} = \frac{I_{im}}{\sqrt{2}}.$$

Сдвиг фаз равен $\varphi_i = \alpha_i - \beta_i$, если ток отстает от напряжения, то сдвиг фаз считается положительным, если опережает — отрицательным.

Действующее значение несинусоидального напряжения и тока находим как корень квадратный из суммы квадратов действующих значений гармонических составляющих:

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots}, \\ I &= \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}. \end{aligned} \quad (2)$$

Активная мощность P — это количество энергии, потребляемое (генерируемое) объектом в единицу времени. Математически активную мощность определяют как среднее значение мгновенной мощности за полный период, ее часто называют просто электрической мощностью:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt. \quad (3)$$

Активная мощность периодического несинусоидального тока, Вт, равна сумме активных мощностей отдельных гармоник:

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots \quad (4)$$

Активная мощность характеризует скорость необратимого превращения электрической энергии в другие виды энергии (тепловую и электромагнитную). Активная мощность гармоники в составе несинусоидального тока может быть как положительна, так и отрицательна.

Реактивная мощность — величина, характеризующая нагрузки, создаваемые в электротехнических устройствах колебаниями энергии электромагнитного поля в цепи, равна:

$$Q = U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_2 I_2 \sin \varphi_2 + U_3 I_3 \sin \varphi_3 + \dots \quad (5)$$

Физический смысл реактивной мощности — это энергия, перекачиваемая от источника на реактивные элементы приемника (индуктивности, конденсаторы, обмотки двигателей), а затем возвращаемая этими элементами обратно в источник в течение одного периода колебаний, отнесенная к этому периоду. Единица измерения реактивной мощности является ВАр (вольт-ампер реактивный).

Отметим, что $\sin \varphi$ для значений φ от 0 до $+90^\circ$ является положительной величиной, тогда как $\sin \varphi$ для значений φ от 0 до -90° является отрицательной величиной. Мощность гармоник в составе несинусоидального тока может быть как положительна (если нагрузка имеет активно-индуктивный характер), так и отрицательна (если нагрузка имеет активно-емкостный характер). Когда устройство имеет положительную реактивную мощность, то принято говорить, что оно ее

потребляет, а когда отрицательную — то производит (генерирует).

Полная мощность S равна произведению действующего значения несинусоидального напряжения и действующего значения несинусоидального тока. Единица измерения — *вольт-ампер* (В·А).

$$S = U \cdot I, \quad (6)$$

где $U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots}$,

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}.$$

Для цепей *несинусоидального тока* соотношение $S^2 = P^2 + Q^2$ между мощностями выполняется только для резистивных элементов, у которых в соответствии с законом Ома формы кривых функций $u(t)$ и $i(t)$ идентичны.

Если же в цепи содержатся реактивные элементы L и C , то это соотношение не выполняется: $S^2 \geq P^2 + Q^2$.

Для баланса этого уравнения в его правую часть вносят добавление T :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + T^2, \quad (7)$$

где T — мощность искажения, которая характеризует степень различия в формах кривых напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$.

Полная мощность имеет практическое значение, как величина, описывающая нагрузки, фактически налагаемые потребителем на элементы подводящей электросети (провода, кабели, распределительные щиты, трансформаторы, линии электропередачи), так как эти нагрузки зависят от потребляемого тока, а не от фактически использованной потребителем энергии. Именно поэтому полная мощность трансформаторов и распределительных щитов измеряется в вольт-амперах, а не в ваттах.

В случае несинусоидального характера тока потребитель электрического тока характеризу-

ется не значением $\cos \varphi$, а *коэффициентом мощности* χ :

$$\chi = \frac{P}{S}. \quad (8)$$

Коэффициент нелинейных искажений тока (THD — *Total Harmonic Distorsions*) равен отношению действующего значения суммы гармоник искажений к действующему значению основной гармоники:

$$THD = \frac{\sqrt{I_0^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}}{I_1}. \quad (9)$$

Энергия

Расчет электрической энергии, кВт · ч, потребляемой электровозом, производится с учетом полной мощности электрического тока, проходящего через измеряемую цепь (рис. 2). Активная энергия вычисляется как интеграл от активной мощности (4) по времени, реактивная энергия — как интеграл от реактивной мощности (5) по времени, полная энергия — как интеграл от полной мощности (6) по времени.

Таким образом, при обработке экспериментальных данных исходный сигнал прежде всего представляется как разложение на гармонические составляющие при помощи быстрого преобразования Фурье (FFT). Затем, в соответствии с представленными выше формулами, определяется активная, реактивная и полная мощности, коэффициент мощности, коэффициент нелинейных искажений.

Анализ процессов в коллекторном приводе в режиме тяги

Тяговая система электровоза семейства «Ермак» включает трансформатор, тиристорный выпрямительно-инверторный преобразователь (ВИП), сглаживающий реактор и коллекторный тяговый двигатель пульсирующего тока [6].

Таблица 3. Параметры гармоник (коллекторный привод)

i	$f = 0,2i$	$U(i)$	$I(i)$	$U_{\text{phase}}(i)$	$I_{\text{phase}}(i)$	$\varphi(i)$	$P(i)$	$Q(i)$
0	0,00	62,78	0,03	0,00	3,14	-3,14	2,06	0,00
250	50,00	28 327,46	50,95	0,32	-0,41	0,73	1 071 649	966 977
750	150,00	462,57	23,18	1,60	2,82	-1,22	3714,20	-10 059,4
1250	250,00	555,46	12,07	-2,00	0,02	-2,02	-2918,10	-6033,93
1750	350,00	579,99	3,96	1,42	-3,13	4,55	-363,96	-2267,75
2250	450,00	227,02	3,84	-2,47	-0,92	-1,55	18,06	-872,47
2750	550,00	448,06	4,39	0,14	2,52	-2,39	-1434,27	-1345,58
3250	650,00	496,60	2,54	-2,15	-0,08	-2,07	-604,54	-1109,75
3750	750,00	138,51	0,30	-2,77	-2,93	0,16	41,30	6,69
4250	850,00	355,09	1,13	1,95	-1,54	3,49	-376,18	-135,76
4750	950,00	32,22	1,53	-1,95	2,62	1,71	-7,05	48,91

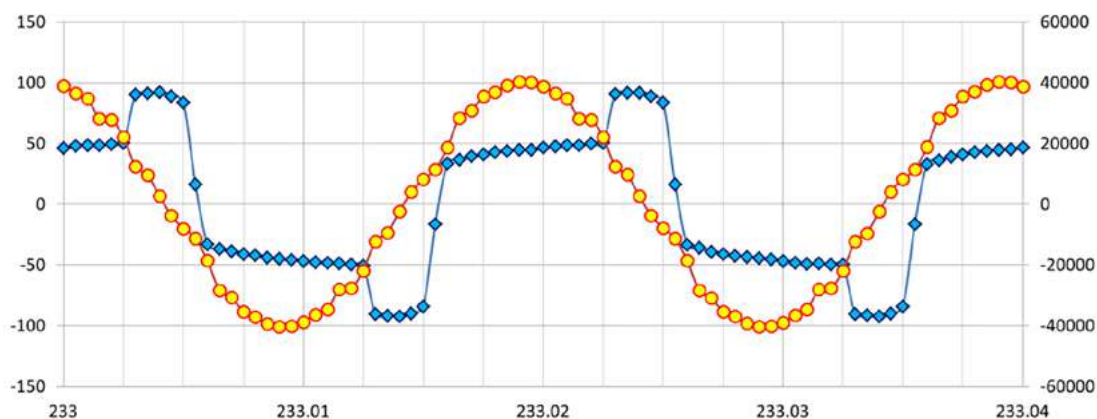


Рис. 3. Мгновенные значения напряжения, В (красная линия, правая шкала) и тока, А (синяя линия, левая шкала) в сетевой обмотке трансформатора в зависимости от времени, с

В табл. 3 приведены параметры гармоник напряжения и тока, сдвиг фаз, а также значения активной и реактивной мощностей соответствующих гармоник, полученные путем обработки экспериментальных данных.

В табл. 3 и 5 приняты следующие обозначения:

i — номер гармоники;

$f = 0,2i$ — частота гармоники, Гц;

$U(i)$ — напряжение, В;

$I(i)$ — ток, А;

$U_{\text{phase}}(i)$ — фаза гармоники напряжения, рад;

$I_{\text{phase}}(i)$ — фаза гармоники тока, рад;

$\varphi(i)$ — сдвиг фаз гармоник напряжения и тока, рад;

$P(i)$ — активная мощность, Вт;

$Q(i)$ — реактивная мощность, ВАр.

Основные гармоники напряжения и тока (выделены в табл. 3 жирным шрифтом) имеют частоту 50 Гц. Из табл. 3 получаем, что сдвиг фаз основных гармоник напряжения и тока составляет:

$$\varphi_1 = \alpha_1 - \beta_1 = 0,323 - (-0,411) = 0,734 \text{ рад},$$

откуда $\cos \varphi_1 = 0,742$.

Диаграммы напряжения и тока в сетевой обмотке трансформатора показаны на рис. 3. Как видно, кривая напряжения близка к синусоидальной. Кривая тока является периодической, но несинусоидальной, что обусловлено процессами, вызванными коммутацией тиристорного тягового выпрямительно-инверторного преобразователя.

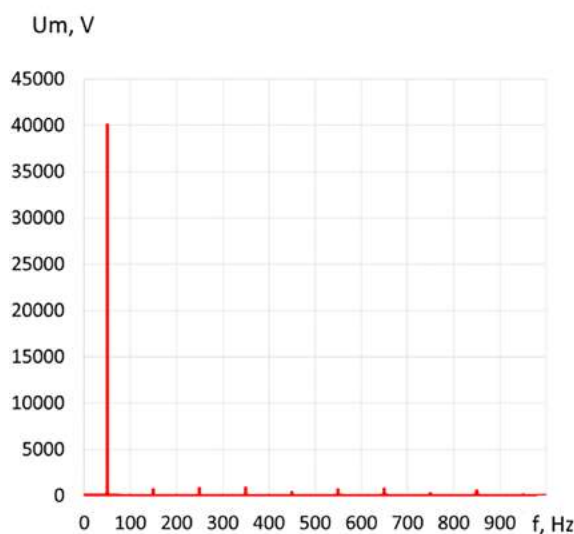


Рис. 4. Спектральный состав напряжения

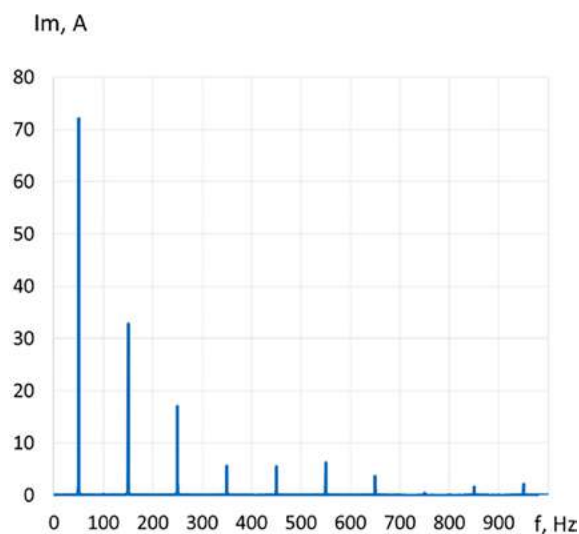


Рис. 5. Спектральный состав тока

Таблица 4. Параметры работы коллекторного привода

Активная мощность, P	кВт	1069,72
Реактивная мощность, Q	кВАр	945,208
Полная мощность, S	кВА	1638,49
Коэффициент мощности, χ	—	0,65287
Коэффициент нелинейных искажений тока, THD	—	0,53491

Спектральный состав напряжения показан на рис. 4, он близок к синусоидальному. Спектральный состав тока (рис. 5) является гораздо более сложным. Параметры работы коллекторного привода в режиме тяги представлены в табл. 4.

Как видно из вышеизложенного, в режиме тяги электровозов с ВИП основная гармоника сетевого тока значительно отстает от основной гармоники сетевого напряжения. Такие электровозы в тяговом режиме являются генераторами реактивной энергии, что снижает коэффициент мощности и приводит к искажению формы напряжения, а следовательно, и формы тока сети. Снижение коэффициента мощности вызывает увеличение тока, потребляемого электровозом, приводя к дополнительным потерям в тяговой сети и уменьшению КПД системы в целом [15, 16].

Анализ процессов в асинхронном приводе в режиме тяги

Электровозы 2(3)ЭС5С имеют асинхронный тяговый привод в составе: трансформатор, тяговый преобразователь (входной $4qs$ -преобразователь, звено постоянного тока и автономный инвертор напряжения), асинхронный ТЭД [17].

В табл. 5 приведены параметры гармоник напряжения и тока, сдвиг фаз, а также значения активной и реактивной мощностей соответствующих гармоник. Параметры основной гармоники частотой 50 Гц выделены жирным шрифтом.

Из табл. 5 получаем, что сдвиг фаз основных гармоник напряжения и тока составляет:

$$\varphi_1 = \alpha_1 - \beta_1 = -0,73 - (-0,74) = 0,01 \text{ рад},$$

откуда $\cos \varphi_1 = 0,99995$.

Таблица 5. Параметры гармоник (асинхронный привод)

i	$f = 0,2i$	$U(i)$	$I(i)$	$U_{\text{phase}}(i)$	$I_{\text{phase}}(i)$	$\varphi(i)$	$P(i)$	$Q(i)$
0	0,00	66,70	0,29	0,00	0,00	0,00	19,47	0,00
250	50,00	26969,17	49,78	-0,73	-0,74	0,00	1342524	4117,8
750	150,00	445,67	3,17	-1,85	-2,43	0,58	1181,63	778,29
1250	250,00	495,03	3,37	-0,74	-1,16	0,43	1518,07	690,00
1750	350,00	364,93	2,09	0,36	-0,85	1,21	265,51	713,07
2250	450,00	150,45	0,85	1,57	0,28	1,29	35,80	123,06
2750	550,00	207,74	0,68	2,13	0,83	1,30	37,93	136,63
3250	650,00	221,47	0,60	2,94	1,44	1,50	9,17	131,90
3750	750,00	85,78	0,25	-2,48	2,78	-5,26	11,39	18,62
4250	850,00	193,56	0,30	-3,14	1,75	-4,89	10,34	56,60
4750	950,00	99,15	0,23	-2,77	2,00	1,52	1,11	22,64

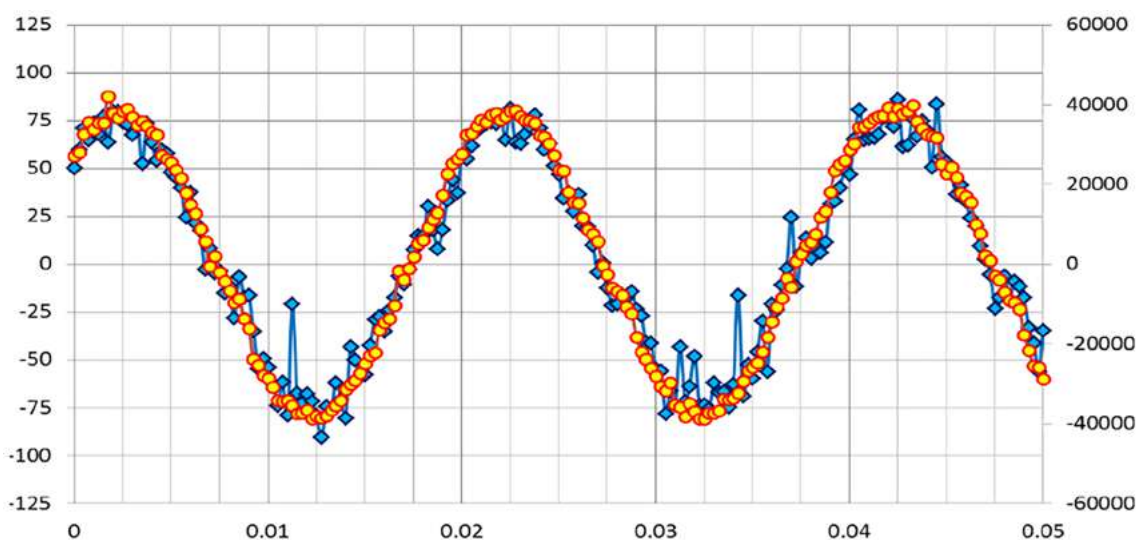


Рис. 6. Мгновенные значения напряжения, В (красная линия, правая шкала) и тока, А (синяя линия, левая шкала) в сетевой обмотке трансформатора в зависимости от времени, с

Таблица 6. Параметры работы асинхронного привода

Активная мощность, P	кВт	1347,35
Реактивная мощность, Q	кВАр	7,56
Полная мощность, S	кВА	1359,63
Коэффициент мощности, χ	—	0,99
Коэффициент нелинейных искажений тока, THD	—	0,153

Диаграммы напряжения и тока в сетевой обмотке трансформатора показаны на рис. 6. Как видно, кривые напряжения и тока близки и являются практически синусоидальными, за исключением отдельных выбросов.

Спектральный состав напряжения показан на рис. 7, спектральный состав тока — на рис. 8 (ср. с рис. 4 и 5). Параметры работы асинхронного привода в режиме тяги представлены в табл. 6.

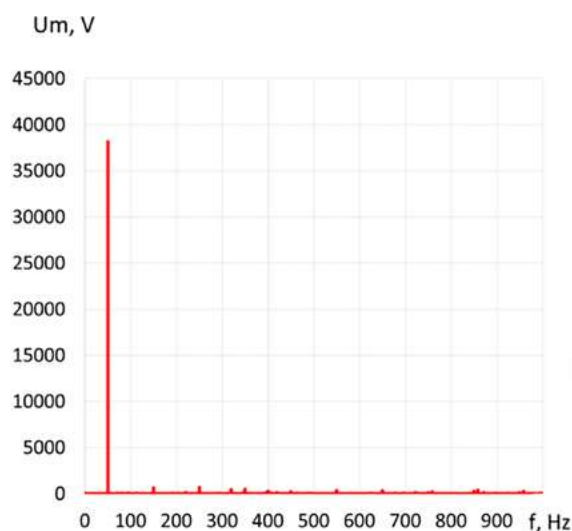


Рис. 7. Спектральный состав напряжения

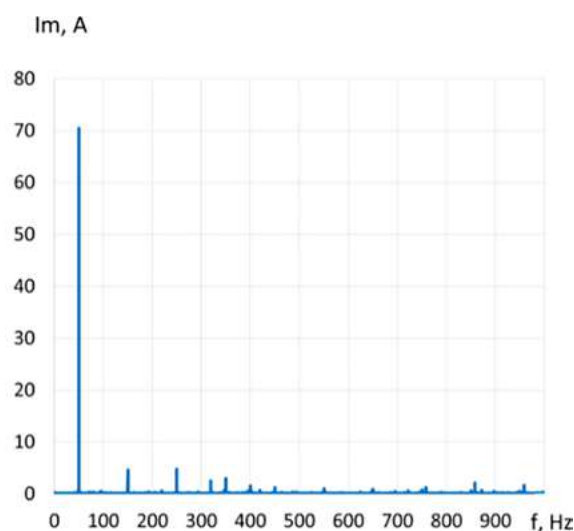


Рис. 8. Спектральный состав тока

Заключение. Анализ результатов

Выполнено экспериментальное исследование качества потребления электрической энергии в коллекторном и асинхронном тяговых приводах серийно выпускаемых электровазов переменного тока. Проведены измерения напряжения и тока на первичной обмотке трансформатора в режиме тяги. Обработка экспериментальных данных основана на разложении исходного сигнала на гармонические составляющие при помощи быстрого преобразования Фурье. Получены параметры гармоник напряжения и тока, сдвиг фаз, а также значения активной и реактивной мощностей соответствующих гармоник. Изучен спектральный состав напряжения и тока.

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что коэффициент мощности асинхронного привода составляет $\chi = 0,99$, что значительно выше по сравнению с $\chi = 0,65$ у коллекторного привода. Коэффициент нелинейных искажений тока асинхронного привода равен $THD = 0,15$, по сравнению с $THD = 0,53$ у коллекторного.

Поскольку коэффициент мощности является важнейшей энергетической характеристикой электровазова и характеризует увеличение нагрузки

контактной сети и устройств энергоснабжения, количественно подтвержден вывод о гораздо более высокой эффективности процесса преобразования электрической энергии в асинхронном тяговом приводе серийно выпускаемых электровазов, при работе в режиме тяги. Аналогичное заключение можно сделать и по коэффициенту нелинейных искажений тока, который является количественной мерой искажений тока, вызванных работой тягового преобразователя.

Библиографический список

1. Гапанович В. А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, Б. А. Аржанников и др.; под ред. В. А. Гапановича. — М.: МИСиС, 2012. — 620 с.
2. Brecher A. Best Practices and Strategies for Improving Rail Energy Efficiency: Technical reports / A. Brecher, J. Sposato, B. Kennedy // Office of Research and Development. Washington, DC 20590. — Report number: DOT/FRA/ORD-14/02. — 28 Jan. 2014.
3. URL: <https://ar2019.rzd.ru/ru/appendices>.
4. Дубровский З. М. Электровазы ВЛ60к и ВЛ60пк / З. М. Дубровский, Л. М. Лорман. — М.: Транспорт, 1993. — 400 с.

5. Николаев А. О. Устройство и работа электровоза ВЛ80с / А. О. Николаев, Н. В. Сесявин. — М.: Маршрут, 2006. — 512 с.
6. Осинцев И. А. Устройство, эксплуатация и ремонт электровозов серии 2ЭС5К / И. А. Осинцев, А. А. Логинов. — М.: ОАО «Российские железные дороги», 2014. — 465 с.
7. Никитенко А. Г. Математическое моделирование динамики электровозов / А. Г. Никитенко, Е. М. Плохов, А. А. Зарифьян и др. — М.: Высшая школа, 1998. — 274 с.
8. Литовченко В. В. Математическая модель коллекторного тягового электродвигателя / В. В. Литовченко, Д. В. Кокорин, Д. В. Назаров // *Электротехника*. — 2014. — № 8. — С. 22–29.
9. Литовченко В. В. Имитационная модель электровоза постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями / В. В. Литовченко, Д. В. Назаров, В. А. Шаров // *Электротехника*. — 2019. — № 9. — С. 60–66.
10. Ягуп В. Г. Математическое моделирование электропривода электровоза 2ЭЛ5 в режиме тяги / В. Г. Ягуп, А. А. Краснов // *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. — 2017. — Вип. 170. — С. 20–31.
11. Kolpakhchyan P. Systems Approach to the Analysis of Electromechanical Processes in the Asynchronous Traction Drive of an Electric Locomotive / P. Kolpakhchyan, A. Zarifian, A. Andruschenko // *Rail Transport — Systems Approach. Studies in Systems, Decision and Control*. — 2017. — Vol 87. Springer, Cham. — DOI: 10.1007/978-3-319-51502-1_3.
12. Власьевский С. В. Сравнение энергетической эффективности тягового электропривода электровозов переменного тока на основе коллекторных и асинхронных двигателей / С. В. Власьевский, В. А. Кучумов, В. Г. Щербаков // *Электротехника*. — 2017. — № 9. — С. 72–78.
13. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. — М.: Гардарики, 2007. — 701 с.
14. Chen W. K. The Electrical Engineering Handbook / W. K. Chen. — Academic Press, 2004. — 1018 p.
15. Евстафьев А. М. Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока / А. М. Евстафьев, А. Н. Сычугов // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2013. — № 1. — С. 22–30.
16. Зак В. В. Перспективные способы повышения энергетической эффективности электровозов переменного тока / В. В. Зак, С. А. Старовойтов, И. Ю. Мартынюк // *Железнодорожный транспорт*. — 2022. — № 9. — С. 40–44.
17. Электровозы 2ЭС5С и 3ЭС5С: асинхронная тяга под флагом России // *Техника железных дорог*. — 2020. — № 1(49). — С. 10–13.
- Дата поступления: 15.10.2023
Решение о публикации: 13.11.2023
- Контактная информация:**
ЗАРИФЬЯН Александр Александрович — канд. техн. наук, эксперт; zarifyan.alexander@gmail.com
ЕВСТАФЬЕВ Андрей Михайлович — д-р техн. наук, проф.; зав. кафедрой «Электрическая тяга»; evstam@mail.ru

Energy Consumption Quality Indicators in Collector and Asynchronous Traction Drives of AC Electric Locomotives

A. A. Zarifyan¹, A. M. Evstafev²

¹ “TMH Engineering” LLC, 4, Kolontsova str., Mytishchi, Moscow Region, 141009, Russian Federation

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

For citation: Zarifyan A. A., Evstafev A. M. Energy Consumption Quality Indicators in Collector and Asynchronous Traction Drives of AC Electric Locomotives // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 987–998. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-987-998

Summary

Purpose: To conduct an experimental study of the indicators of electrical energy consumption quality for serially produced freight electric locomotives of alternating current 2(3)ES5K with a collector traction drive and electric locomotives 2(3)ES5S with an asynchronous traction drive, to provide their comparison and comparative analysis. **Methods:** The main technical characteristics of the collector traction electric drive (TED) NB-514E and asynchronous TED DTA-1100 are presented. A measurement scheme for voltage and current on the power winding of the transformer is proposed. The monitoring of parameters has been carried out directly on electric locomotives using specialized metrological equipment. The processing of experimental data is based on decomposing the original signal into harmonic components using Fast Fourier Transform (FFT). **Results:** Parameters of voltage and current harmonics, phase shifts, as well as the values of active and reactive power of the corresponding harmonics have been obtained. An analysis of the spectral composition of voltage and current has been performed. Comparative analysis of the results obtained for electric locomotives with collector and asynchronous traction drives in traction mode has shown that the power factor is 0.65 and 0.99, respectively; and the coefficient of non-linear current distortions is 0.53 and 0.15. A conclusion has been drawn regarding significantly higher quality of electrical energy consumption in the asynchronous traction drive. **Practical significance:** Based on the specific values of the indicators of electrical energy consumption quality in collector and asynchronous traction drives in traction mode, it is possible to proceed to obtaining economic assessments for the transition of the locomotive fleet of Russian Railways (JSCo “RZD”) to next-generation electric locomotives of the 2(3)ES5S series.

Keywords: Freight alternating current electric locomotive, collector traction drive, asynchronous traction drive, experimental study of the quality of electrical energy consumption.

References

1. Gapanovich V. A., Avilov V. D., Arzhannikov B. A. et al. *Energoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte* [Energy saving in railway transport]. Moscow: MISiS Publ., 2012, 620 p. (In Russian)
2. Brecher A., Sposato J., Kennedy B. Best Practices and Strategies for Improving Rail Energy Efficiency: Technical reports. Office of Research and Development. Washington, DC 20590. Report number: DOT/FRA/ORD-14/02, 28 Jan. 2014.
3. Available at: <https://ar2019.rzd.ru/ru/appendices>.
4. Dubrovskiy Z. M., Lorman L. M. *Elektrovozy VL60k i VL60pk* [Electric locomotives VL60k and VL60pk]. Moscow: Transport Publ., 1993, 400 p. (In Russian)
5. Nikolaev A. O., Sesyavin N. V. *Ustroystvo i rabota elektrovoza BL80s* [Design and operation of the electric locomotive VL80s]. Moscow: Marshrut Publ., 2006, 512 p. (In Russian)
6. Osintsev I. A., Loginov A. A. *Ustroystvo, ekspluatatsiya i remont elektrovozov serii 2ES5K* [Design, operation

and repair of electric locomotives of the 2ES5K series]. Moscow: OAO "Rossiyskie zheleznye dorogi", 2014, 465 p. (In Russian)

7. Nikitenko A. G., Plokhov E. M., Zarif'yan A. A. et al. *Matematicheskoe modelirovanie dinamiki elektrovozov* [Mathematical modeling of the dynamics of electric locomotives]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1998, 274 p. (In Russian)

8. Litovchenko V. V., Kokorin D. V., Nazarov D. V. *Matematicheskaya model' kollektornogo tyagovogo elektrodvigatelya* [Mathematical model of a commutator traction electric motor]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2014, Iss. 8, pp. 22–29. (In Russian)

9. Litovchenko V. V., Nazarov D. V., Sharov V. A. *Imitatsionnaya model' elektrovoza postoyannogo toka s kollektornymi tyagovymi dvigatelyami* [Simulation model of a direct current electric locomotive with commutator traction motors]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2019, Iss. 9, pp. 60–66. (In Russian)

10. Yagup V. G., Krasnov A. A. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivoda elektrovoza 2EL5 v rezhime tyagi* [Mathematical modeling of the electric drive of the electric locomotive 2EL5 in traction mode]. *Zbirnik naukovikh prats' Ukrain's'kogo derzhavnogo universitetu zalizничного transportu* [Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Health Transport]. 2017, Vip. 170, pp. 20–31.

11. Kolpakhchyan P., Zarifian A., Andruschenko A. *Systems Approach to the Analysis of Electromechanical Processes in the Asynchronous Traction Drive of an Electric Locomotive. Rail Transport — Systems Approach. Studies in Systems, Decision and Control*, 2017, vol 87. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-51502-1_3.

12. Vlas'evskiy S. V., Kuchumov B. A., Shcherbakov V. G. *Sravnenie energeticheskoy effektivnosti tyagovogo elektroprivoda elektrovozov peremennogo toka na osnove kollektornykh i asinkhronnykh dvigateley* [Comparison of the

energy efficiency of the traction electric drive of AC electric locomotives based on commutator and asynchronous motors]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2017, Iss. 9, pp. 72–78. (In Russian)

13. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie tsepi* [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits]. Moscow: Gardariki Publ., 2007, 701 p. (In Russian)

14. Chen W. K. *The Electrical Engineering Handbook*. Academic Press, 2004, 1018 p.

15. Evstaf'ev A. M., Sychugov A. N. *Povyshenie energeticheskoy effektivnosti elektrovozov peremennogo toka* [Increasing the energy efficiency of AC electric locomotives]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [News of the St. Petersburg University of Railway Transport]. 2013, Iss. 1, pp. 22–30. (In Russian)

16. Zak V. V., Starovoytov S. A., Martynyuk I. Yu. *Perspektivnye sposoby povysheniya energeticheskoy effektivnosti elektrovozov peremennogo toka* [Promising ways to increase the energy efficiency of AC electric locomotives]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2022, Iss. 9, pp. 40–44. (In Russian)

17. *Elektrovozy 2ES5S i 3ES5S: asinkhronnaya tyaga pod flagom Rossii* [Electric locomotives 2ES5S and 3ES5S: asynchronous traction under the Russian flag]. *Tekhnika zheleznykh dorog* [Railway technology]. 2020, Iss. 1(49), pp. 10–13. (In Russian)

Received: October 15, 2023

Accepted: November 13, 2023

Author's information:

Alexander A. ZARIFYAN — PhD in Engineering, Expert; zarifyan.alexander@gmail.com

Andrey M. EVSTAFEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; evstam@mail.ru

УДК 62-799

Анализ устройств автономного непрерывного мониторинга, оповещения и устранения опасного уровня газов в аккумуляторных помещениях

А. В. Агунов, И. А. Терехин, Д. И. Фесак, Е. Г. Абишов, И. А. Баранов

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

Для цитирования: Агунов А. В., Терехин И. А., Фесак Д. И., Абишов Е. Г., Баранов И. А. Анализ устройств автономного непрерывного мониторинга, оповещения и устранения опасного уровня газов в аккумуляторных помещениях // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 999–1003. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-999-1003

Аннотация

Цель: Выполнить анализ существующих устройств автономного непрерывного мониторинга, оповещения и устранения опасного уровня газов в помещении. Проанализировать и сформировать предложение для устройства автономного мониторинга концентрации уровня газов в помещении аккумуляторной. **Методы:** Поиск и изучение патентов устройств автономного непрерывного мониторинга, оповещения и устранения опасного уровня газов в помещении, сравнение характеристик и принципов работы этих устройств. Ознакомление с соответствующими статьями и разработками. **Результаты:** В работе представлен анализ существующих устройств автономного непрерывного мониторинга, оповещения и устранения опасного уровня газов в помещении, даны комментарии относительно недостатков существующих устройств. Разработано и обосновано предложение нового устройства для мониторинга собственной разработки. **Практическая значимость:** Проведенный анализ показал необходимость создания нового устройства автономного непрерывного мониторинга, оповещения и устранения опасного уровня газов в аккумуляторных помещениях ввиду несовершенства и непригодности для аккумуляторных помещений существующих устройств.

Ключевые слова: Газоанализаторы, водородные аккумуляторы, аккумуляторные помещения, тяговые подстанции, непрерывный мониторинг, цифровая железная дорога, автоматизация, безопасность.

Введение

В настоящее время на действующей инфраструктуре ОАО «РЖД» насчитывается значительное количество тяговых подстанций, каждый из объектов использует в качестве резервного источника питания аккумуляторные батареи [1] (в зависимости от типа и новизны объекта тяговой инфраструктуры могут использоваться как

открытые свинцово-кислотные, так и закрытые типы аккумуляторных ячеек [2]). При цикле заряда-разряда батареи выделяют токсичные для человека газы, способные при больших концентрациях привести к летальному исходу или несчастному случаю (в особых случаях — к взрыву). В данный момент времени устройства подобного типа не используются.

Анализ

Сердцем любой подстанции является помещение аккумуляторной, где, как понятно из названия, хранятся, заряжаются и разряжаются аккумуляторные батареи. При любом из вышеперечисленных действий аккумуляторная батарея выделяет газы, такие как: сернистый, мышьяковистый водород (арсин), сурмилистый водород (стибин), хлористый водород и другие [2]. Высокая концентрация этих токсичных газов в воздухе очень вредна для человека и при больших концентрациях может привести к взрыву.

Известны газоанализаторы, содержащие датчик концентрации измеряемого компонента, выполненный в виде электрохимического сенсора, сообщающегося с контролируемым газом (воздухом), и устройство для обработки сигнала датчика и управления его работой [3]. Недостатками известных газоанализаторов являются отсутствие контроля доступа в анализируемое помещение, невозможность передачи информации по беспроводным телекоммуникационным сетям, в частности сетей GSM [4], что исключает автоматические оперативные оповещения об опасной концентрации газов, а также отсутствие возможности контроля температурно-влажностных показателей, что исключает возможность автономной ликвидации опасной концентрации газов [5].

Следовательно, необходим газоанализатор, содержащий: датчик концентрации измеряемого вещества, выполненный в виде полупроводникового прибора с нагревателем в керамической трубке (оксидом олова на этом нагревателе), который в нагретом состоянии при попадании на прибор измеряемого газа изменяет свое сопротивление, датчик температуры и влажности, состоящий из термистора и емкостного датчика влажности, микропроцессорное устройство, предназначенное для обработки, анализа и передачи данных с датчика, состоящее из: централь-

ного процессорного устройства, элемента памяти программ, аналого-цифрового преобразователя, соединенного с выходом датчика, элемент питания в виде литий-ионной батареи, внешний блок питания для зарядки устройства, GSM модем [6].

Падение напряжения на нагретом до рабочей температуры оксиде олова в составе датчика газоанализатора поступает в аналого-цифровой преобразователь (АЦП), далее, в виде цифрового сигнала, через линию связи поступает на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), выход ЦАП подключен ко входу микроконтроллера. Микроконтроллер, с постоянно запущенным внутри микрокодом, сравнивает полученный через линию связи сигнал с заданной константой. При превышении заданного константой уровня:

1. Микроконтроллер подает управляющий сигнал на управляющую обмотку реле (УОР). Замыкаясь, контакты реле (КР) создают путь для протекания тока привода вытяжной вентиляции, что приводит к активному спаду концентрации газов. С целью сохранения КР в пригодном для работы состоянии в микрокоде используется программная реализация петли гистерезиса.

2. Микроконтроллер подает кодированный сигнал в блок GSM/GPRS (УСС). УСС отправляет на заданный в настройках телефонный номер SMS о превышении уровня концентрации, заданного условиями газа в контролируемом помещении.

Таким образом, при решении поставленной задачи обеспечивается постоянный мониторинг концентрации газа, температуры и влажности воздуха в помещении, при этом в случае превышения установленной допустимой величины концентрации устройство с помощью УСС отправляет в GSM сеть на заданный телефонный номер SMS-оповещение о превышении заданного параметра, а также числовую информацию контролируемых параметров. Устройство позволит управлять средствами регулирования климата в



3D-модель аккумуляторного помещения

помещении, а также имеет световую индикацию предупреждения опасности, вынесенную за пределы контролируемого помещения.

Устройство будет включать в себя следующие функции:

1. Анализ содержания опасных для человека газов в помещении аккумуляторной.
2. Индикация степени концентрации газов.
3. Оповещение обслуживающего персонала о превышении уровня концентрации газов.
4. Поддержание заданного температурно-влажностного режима в помещении аккумуляторной.

Применение данного устройства не ограничивается только инфраструктурой ОАО «РЖД». Такие компании, как ФСК, «Россети», также имеют на балансе инфраструктуру, в которой нужно осуществлять мониторинг и учет параметров.

С целью математического моделирования разного рода штатных и нештатных ситуаций была произведена работа по 3D-сканированию действующего объекта НТЭ (тяговой подстанции) (рисунок).

В данный момент ведется работа по оцифровке, доводке и корректировке полученной 3D-модели для внесения ее в среду моделирования.

Благодарности

Настоящая статья (работа) опубликована (выполнена) при поддержке Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» инициативных научных работ, выполняемых студенческими научными коллективами.

Заключение

Таким образом, исходя из существующих устройств газоанализа, можно говорить о необходимости создания принципиально нового устройства автономного непрерывного мониторинга, оповещения и устранения опасного уровня газов в аккумуляторных помещениях ввиду вышеописанных недостатков существующих приборов.

Библиографический список

1. Жматов Д. В. Автономные источники питания постоянного тока для цифровых подстанций и транспорта / Д. В. Жматов, Т. И. Кузнецова, В. П. Горкин // Энергобезопасность и энергосбережение. — 2015. — № 2.
2. Багаутдинов И. З. Тяговая трансформаторная подстанция / И. З. Багаутдинов // Форум молодых ученых. — 2017. — № 6(10).
3. Патент РФ на полезную модель № 67733. Автоматический пост для контроля качества воздуха / М. Ю. Аршинов, Б. Д. Белан, Д. К. Давыдов и др. — Оpubл. 27.10.2007. Бюл. № 30.
4. Храмцов И. А. Основные уязвимости сетей поколения GSM / И. А. Храмцов // Форум молодых ученых. — 2019. — № 2(30).
5. Шнепс-Шнеппе М. А. Мобильная сеть GSM-R — основа цифровой железной дороги / М. А. Шнепс-Шнеппе, В. П. Куприяновский // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2016. — № 1.
6. Чуйков А. М. Анализ газовоздушной среды с применением интеллектуального газоанализатора для анали-

за пожаровзрывоопасности / А. М. Чуйков, А. В. Мещеряков, А. А. Гапеев // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. — 2014. — № 1.

Дата поступления: 12.09.2023

Решение о публикации: 30.10.2023

Контактная информация:

АГУНОВ Александр Викторович — д-р техн. наук, проф.; alexagunov@mail.ru

ТЕРЕХИН Илья Александрович — канд. техн. наук, доц.; terekhin@pgups.ru

ФЕСАК Данил Ильич — студент; danilfesak@gmail.com

АБИШОВ Ербол Гайдарович — аспирант; abishov@pgups.ru

БАРАНОВ Иван Александрович — аспирант; baranov@pgups.ru

Analysis of Devices for Autonomous Continuous Monitoring, Alerting and Elimination of Dangerous Gas Levels in Battery Rooms

A. V. Agunov, I. A. Terekhin, D. I. Fesak, E. G. Abishov, I. A. Baranov

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

For citation: Agunov A. V., Terekhin I. A., Fesak D. I., Abishov E. G., Baranov I. A. Analysis of Devices for Autonomous Continuous Monitoring, Alerting and Elimination of Dangerous Gas Levels in Battery Rooms // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 999–1003. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-999-1003

Summary

Purpose: To analyze the existing devices for autonomous continuous monitoring, alerting and elimination of dangerous gas level in the room. To analyze and form a proposal of a device for autonomous monitoring of gas level concentration in a battery room. **Methods:** Search and study of the patents for devices of autonomous continuous monitoring, alerting and elimination of dangerous gas level in the room, comparing the characteristics and working principles of these devices. Review of relevant articles and developments. **Results:** The paper presents an analysis of existing devices for autonomous continuous monitoring, alerting and elimination of hazardous indoor gas levels, along with comments on the shortcomings of existing devices. A proposal for

a new monitoring device, developed and substantiated, is provided in the paper. **Practical significance:** The analysis conducted has revealed the necessity of creating a new device for autonomous continuous monitoring, alerting, and elimination of hazardous gas levels in battery rooms due to the imperfections and unsuitability of existing devices for battery rooms.

Keywords: Gas analyzers, hydrogen batteries, battery rooms, traction substations, continuous monitoring, digital railroad, automation, safety.

References

1. Zhmatov D. V., Kuznecova T. I., Gorkin V. P. Avtonomnye istochniki pitaniya postoyannogo toka dlya cifrovyyh podstancij i transporta [Standalone DC power supplies for digital substations and transportation]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie* [Energy safety and energy saving]. 2015, Iss. 2. (In Russian)

2. Bagautdinov I. Z. Tyagovaya transformatornaya podstanciya [Traction transformer substation]. *Forum molodyh uchenykh* [Forum of Young Scientists]. 2017, Iss. 6(10). (In Russian)

3. Arshinov M. Y., Belan B. D., Davydov D. K. et al. *Avtomaticheskiy post dlya kontrolya kachestva vozdukha* [Automatic post for air quality control]. Patent RF, no. 67733, 2007. (In Russian)

4. Hramcov I. A. Osnovnye uyazvimosti setej pokoleniya GSM [The main vulnerabilities of GSM generation networks]. *Forum molodyh uchenykh* [Forum of Young Scientists]. 2019, Iss. 2(30). (In Russian)

5. Shneps-SHneppe M. A., Kupriyanovskij V. P. Mobil'naya set' GSM-R — osnova cifrovoj zheleznoj dorogi [Mobile network GSM-R — the basis of digital railroad]. *Sovremennye informacionnye tekhnologii i*

IT-obrazovanie [Modern Information Technologies and IT Education]. 2016, Iss. 1. (In Russian)

6. Chujkov A. M., Meshcheryakov A. V., Gapeev A. A. Analiz gazovozdushnoj sredy s primeneniem intellektual'nogo gazoanalizatora dlya analiza pozharovzryvoopasnosti [Analysis of gas-air environment using an intelligent gas analyzer for analyzing fire and explosion hazard]. *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidacii posledstvij chrezvychajnykh situacij* [Problems of ensuring safety in emergency situations liquidation]. 2014, Iss. 1. (In Russian)

Received: September 12, 2023

Accepted: October 30, 2023

Author's information:

Alexander V. AGUNOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; alexagunov@mail.ru

Ilya A. TEREKHIN — PhD in Engineering, Associate Professor; terekhin@pgups.ru

Danil I. FESAK — Student; danilfesak@gmail.com

Erbol G. ABISHOV — Postgraduate Student; abishov@pgups.ru

Ivan A. BARANOV — Postgraduate Student; baranov@pgups.ru

УДК 629.423.31

Перспективы применения вентильно-индукторного двигателя в системе тяги высокоскоростного электропоезда

Е. Е. Мирошниченко

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

Для цитирования: *Мирошниченко Е. Е.* Перспективы применения вентильно-индукторного двигателя в системе тяги высокоскоростного электропоезда // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 1004–1015. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-1004-1015

Аннотация

Цель: Применение вентильно-индукторного двигателя (ВИД) в системе тяги высокоскоростного электропоезда за счет повышения работоспособности его подшипников. Используя ВИД в качестве тягового электродвигателя, машиностроительный комплекс может решать задачи, связанные с импортозамещением комплектующих для подвижного состава. **Методы:** Основными причинами износа подшипникового узла являются силы одностороннего магнитного притяжения (ОМП). Эти силы возникают при асимметрии воздушного зазора вследствие погрешностей при изготовлении деталей и отклонений при сборке электрической машины. Силы ОМП при определенном смещении найдены по тензору натяжения Максвелла. Для этого был использован метод конечных элементов, воплощенный в программе FEMM. Зависимости токов в соответствующих фазах от момента времени, требуемые для нахождения сил, были получены в программе MATLAB (SIMULINK). **Результаты:** Проведен расчет и анализ сил ОМП при различных вариантах смещения ротора относительно оси симметрии статора, в том числе при вертикальном сдвиге в направлении действия силы тяжести. Расчеты показали, что силы ОМП могут достигать значительных величин. Выдвинуто предложение об ограничении величины силы ОМП величиной силы при предельно допустимом остаточном дисбалансе. Предложены методы, позволяющие исключить неравномерность зазора на этапе производства. **Практическая значимость:** Результаты исследований могут быть использованы разработчиками при проектировании тягового ВИД, выборе конструкционной величины зазора и назначении допусков в его размерной цепи. Использование ВИД с длительным сроком службы подшипников в системе тягового привода создаст предпосылки для получения нового конкурентоспособного подвижного состава.

Ключевые слова: высокоскоростной электропоезд, тяговый электродвигатель, вентильно-индукторный двигатель, магнитная система, неравномерность, силы одностороннего магнитного притяжения, сила дисбаланса, надежность, подшипники.

Введение

В настоящее время уровень и темп жизни требуют быстрой доставки грузов и пассажиров. Россия, как никакая другая страна, нуждается в транспорте, дающем существенный выигрыш во времени.

Первостепенным фактором развития транспорта страны являются высокоскоростные железнодорожные магистрали (ВСМ).

Сложности при создании ВСМ в основном связаны с производством локомотивов и подвижного состава. Для эксплуатации в качестве высо-

коскоростных поездов на таких магистралях планируется использовать «Ласточки», «Сапсаны», а также высокоскоростные поезда нового поколения.

Однако в связи со сложившейся в стране ситуацией (жесткими западными санкциями), многие иностранные компании, в том числе Siemens, занимающаяся производством и обслуживанием «Сапсанов», покинули российские рынки. Поэтому перед отечественным железнодорожным машиностроением стоит первостепенная задача, заключающаяся в импортозамещении и переходе на самостоятельный выпуск комплектующих для тягового подвижного состава (ТПС) [1–4].

Одним из важнейших элементов ТПС, в том числе и высокоскоростного, является ТЭД. К данным электрическим машинам предъявляются повышенные требования по электрической и механической прочности узлов, что объясняется тяжелыми условиями их эксплуатации [5]. Так, выход из строя ТЭД может привести к аварийной ситуации и срыву в графике движения поездов. Поэтому в качестве ТЭД должны применяться высоконадежные, энергоэффективные и относительно недорогие в изготовлении и обслуживании электрические машины [6], к которым, в частности, относятся ВИД. По многим показателям ВИД не уступают, а где-то и превосходят асинхронные электрические машины.

ВИД может работать в тяжелых условиях, а также при нагрузках, изменяющихся в диапазоне от холостого хода до короткого замыкания.

По КПД данный тип электрических машин превышает асинхронные на 2–7 %. ВИД имеет пологую характеристику КПД с высоким его уровнем на достаточно протяженном интервале мощности — от режимов пуска до скоростей, превышающих номинальные значения. Это обстоятельство имеет особую значимость для ТПС, в том числе высокоскоростных электропоездов, с частыми пусками.

Следующим преимуществом ВИД является достаточно простая конструкция магнитной системы — исключение обмотки на роторе и сосредоточенный тип статорной обмотки. Данное преимущество упрощает процесс изготовления ТЭД, делая его более технологичным и менее затратным с точки зрения производства. Так, в сравнении с асинхронными машинами у ВИД: операция «заливка ротора» отсутствует; катушки обмотки пропитываются без статора. Поэтому затраты на производство ВИД на 25–30 % ниже.

К одному из основных достоинств ВИД можно отнести устойчивость к отказам некоторых элементов. Так, в данных электрических машинах, в отличие от традиционных, отсутствуют магнитные связи между фазами, что дает им возможность независимой работы друг от друга. Поэтому в случае потери фазой работоспособности ВИД продолжает функционировать. При этом выходная мощность снижается на величину вышедшей из строя фазы, однако может быть компенсирована за счет возрастания нагрузки на другие работоспособные фазы.

В настоящее время имеется множество примеров практического применения ВИД в транспортных системах, накоплен большой опыт научных исследований в данной области [7–11], не исключением является и железнодорожный ТПС. Так, исследование ВИД тепловоза описано в [12], а примером практического использования служит электромеханическая трансмиссия модернизированного маневрового тепловоза ТГМ6 (присвоенное наименование ТЭМП 1т), состоящая из дизель-генераторной установки и двух тяговых ВИД, мощность каждого из которых составляет 320 кВт. Испытания опытного образца электромеханической трансмиссии в 2022 г. показали соответствие КПД уровню 85,4 % [13].

Благодаря своим функциональным особенностям, динамическим характеристикам, а также регулировочным свойствам (большим момен-

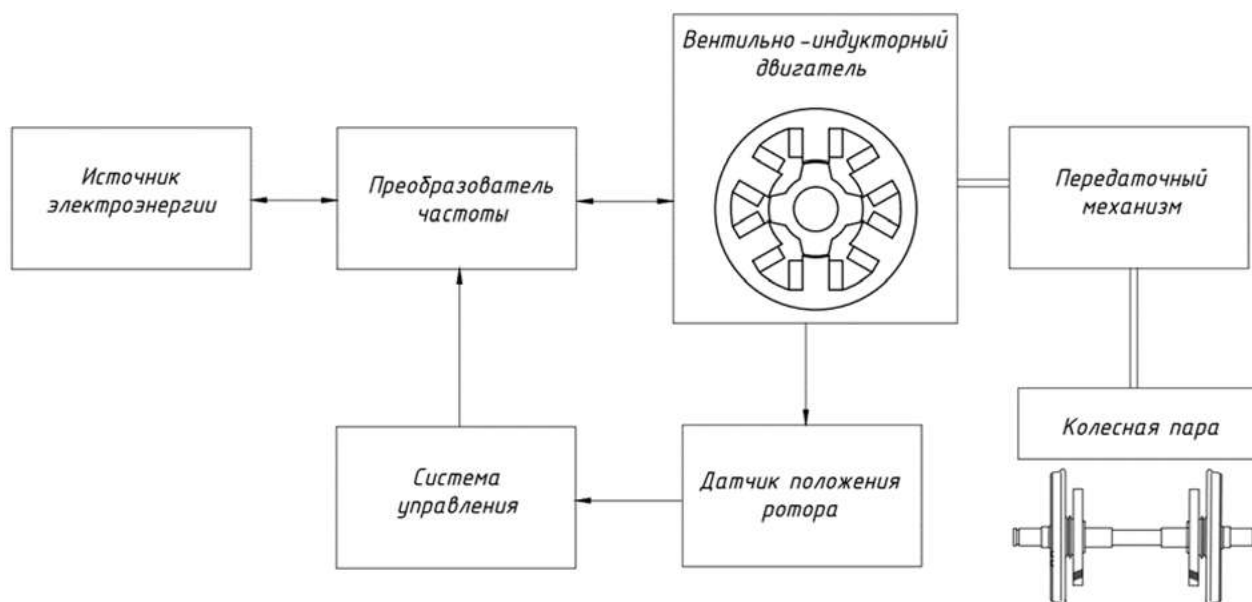


Рис. 1. Схема тягового вентильно-индукторного электропривода

там при низких скоростях, гибкому управлению скоростью, реализацией тормозных режимов), привод на базе ВИД (рис. 1) достаточно перспективен для использования в системе тяги высокоскоростных электропоездов.

Постановка цели и задачи исследования

Обычно воздушный зазор между ротором и статором проектируют минимальным, чтобы получить высокие энергетические показатели. Вследствие этого достаточно сложно выдержать симметрию магнитной системы, так как имеются погрешности при изготовлении деталей и отклонения при сборке машины. Тогда присутствует неравномерность воздушного зазора, вследствие которой появляются так называемые силы одностороннего магнитного притяжения (ОМП). Эти силы, приложенные к подшипникам, в процессе эксплуатации приводят к ускоренному износу и ухудшению виброакустических показателей ВИД.

Исследованию сил ОМП в ВИМ и поиску способов и средств по уменьшению их влияния посвящены научные труды российских и зарубежных ученых. Все они либо направлены на

совершенствование и оптимизацию конструкции ВИМ [14, 15], либо системы управления [16–18].

Основными задачами данной работы являются исследование сил ОМП, присутствующих в тяговом ВИД с неравномерным воздушным зазором, спроектированном для высокоскоростного электропоезда, а также выработка предложений и рекомендаций по ограничению данных сил до допустимых значений.

В качестве объекта исследования был выбран ВИД, магнитная система которого проектировалась в корпусе асинхронного тягового электродвигателя типа 1ТВ2019-1GC02 электропоезда «Сапсан».

Основная часть

Первый этап при проектировании тягового ВИД — выбор наилучшего соотношения зубцов статора и ротора. Для этого произведен сравнительный анализ статических характеристик различных вариантов конфигураций магнитной системы ВИД в режиме насыщения, а также в ненасыщенном режиме работы (рис. 2, 3).

При исследовании использовались электрические машины, имеющие идентичные размеры

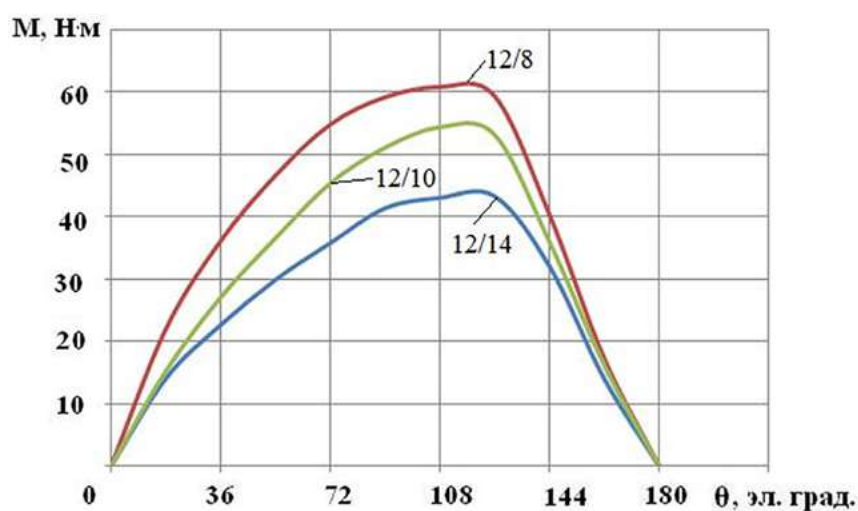


Рис. 2. Характеристики электромагнитного момента $M_{\text{э}} = f(\theta)$ для магнитных систем ВВД различной конфигурации в насыщенном режиме работы

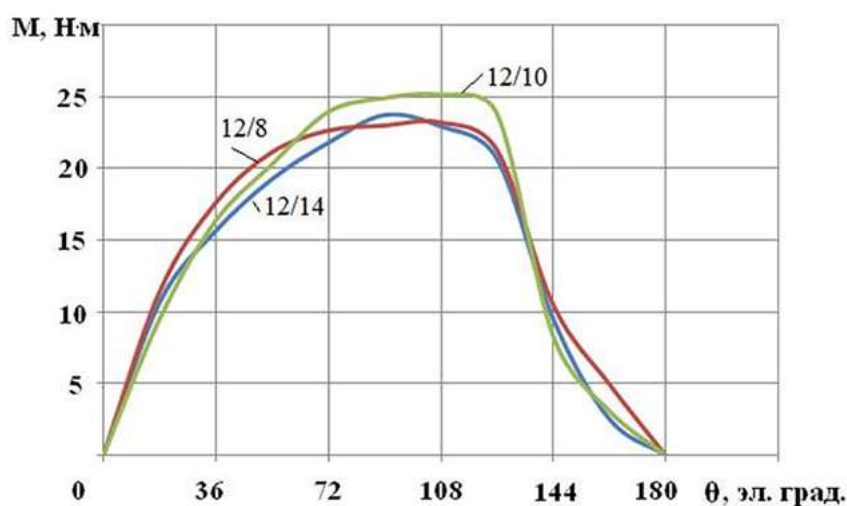


Рис. 3. Характеристики электромагнитного момента $M_{\text{э}} = f(\theta)$ для магнитных систем ВВД различной конфигурации в ненасыщенном режиме работы

диаметра статора, воздушного зазора, отношение ширины коронки зубца ротора к его зубцовому шагу. Выбран двигательный режим работы. Принято, что ток статорной обмотки не изменяется в пределах полюсного деления ($i = \text{const}$). Из графиков рис. 2 и 3 следует, что наиболее предпочтительным вариантом является конфигурация магнитной системы 12/8, так как в режиме насыщения ее кривая электромагнитного момента $M_{\text{э}} = f(\theta)$ располагается выше.

Затем, согласно методике сохранения габаритных размеров [19], спроектирована и построена магнитная система ВВД. В качестве дополнительных исходных данных были приняты известные размеры асинхронного ТЭД 1ТВ2019-1GC02 электропоезда «Сапсан» (внешний диаметр статора, длина магнитной системы двигателя). Магнитная система спроектированного тягового ВВД для электропоезда «Сапсан», приведенная на рис. 4, имеет следующие основные размеры:

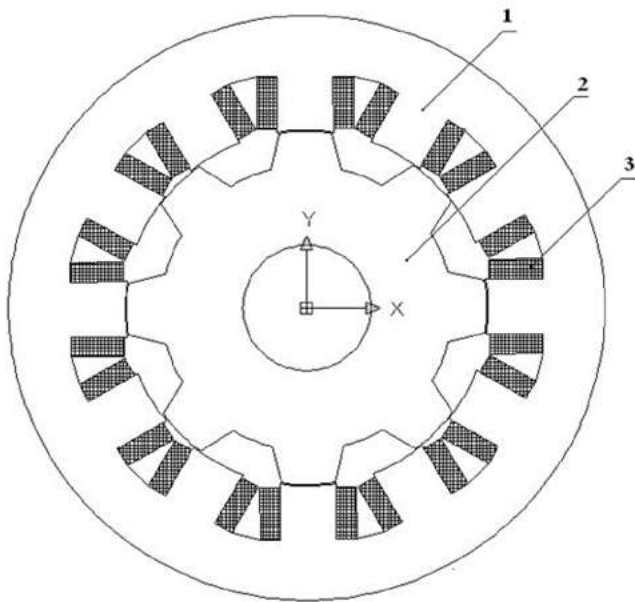


Рис. 4. Магнитная система исследуемого тягового ВИД:
1 — статор; 2 — ротор; 3 — обмотка

- диаметр ротора $D_p = 312,4$ мм;
- наружный диаметр статора $D_c = 515$ мм;
- внутренний диаметр расточки статора $D_a = 313,4$ мм;
- диаметр вала $D_b = 110,5$ мм;

- воздушный зазор $\delta = 1$ мм (на одну сторону);
- число витков — 20 шт.;
- длина пакета статора (ротора) $l = 295$ мм.

Перед проведением расчетов и исследований магнитной системы тягового ВИД (рис. 4) необходимо принять ряд ограничений и допущений. Так, магнитное поле в электрической машине плоскопараллельно и отсутствует за его пределами; не ведется учет взаимного влияния фаз; распределение магнитной индукции не находится в существенной зависимости от гистерезиса и вихревых токов; постоянными в воздушном зазоре являются значения величины неравномерности, а также температуры.

В качестве исходных данных приняты: режим работы ВИМ — номинальный, ограничение по току, частота вращения $n = n_{\text{ном}} = 4100$ об/мин, мощность составила $P_{\text{ном}} = 510$ кВт, ток в токовом коридоре 182,6 А, действующее значение тока 121 А, напряжение $U_d = 2807$ В, конструктивная величина воздушного зазора $d_k = 1,0$ мм (на одну сторону), количество витков катушки — 20, число фаз равно трем.

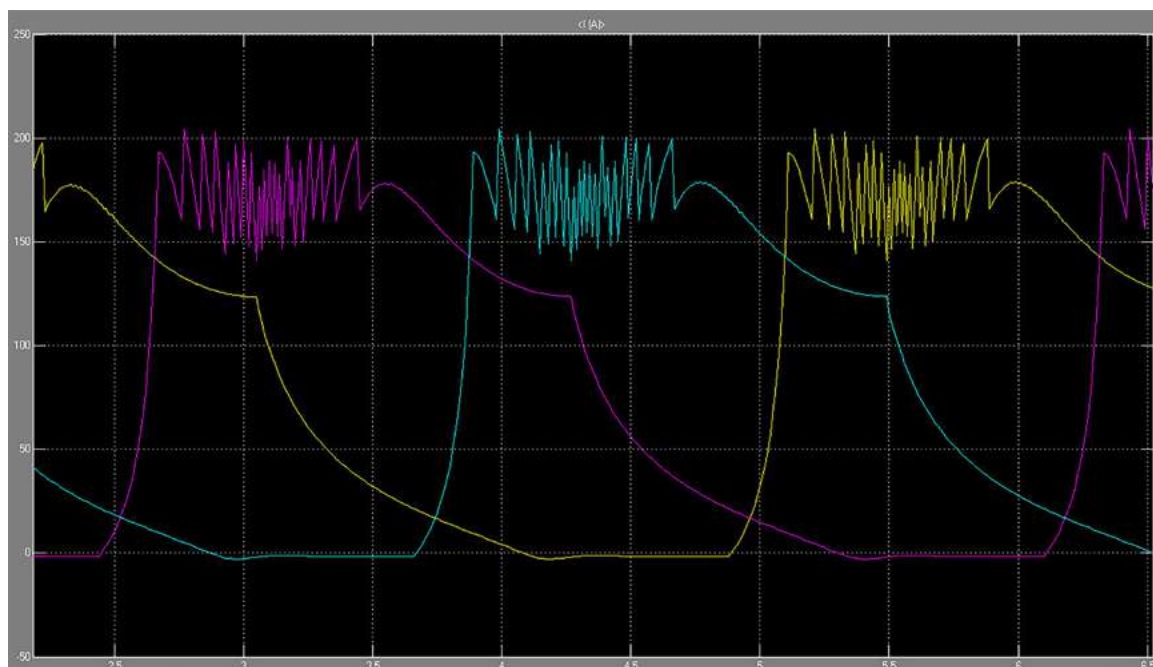


Рис. 5. Фазные токи обмотки проектируемого тягового ВИД

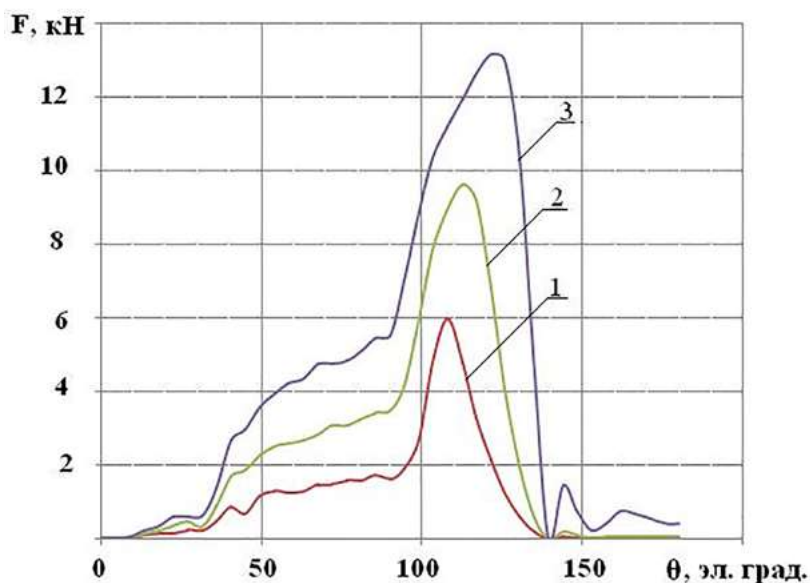


Рис. 6. Силы ОМП при вертикальном смещении ротора по оси Y на:
 l — 0,3 мм; 2 — 0,6 мм; 3 — 0,9 мм

Неравномерность зазора тягового ВИД может иметь различный характер и проявляться в связи с погрешностями в изготовлении элементов его конструкции, а также в процессе эксплуатации [20]. В работе рассмотрены идеализированные варианты смещения ротора относительно оси симметрии статора:

- смещение ротора по оси Y ;
- одновременное смещение ротора по осям X и Y .

Нахождение сил ОМП при заданном смещении проводится в определенной последовательности. В начале для расчетов используется метод конечных элементов, реализованный в программе FEMM. Он дает возможность определить матрицу потокоцепления $\psi = f(i, \theta)$ для каждой катушечной группы тягового ВИД при заданном смещении и выше принятых допущениях. Затем с использованием матрицы потокоцепления *получены* зависимости токов в соответствующих фазах от момента времени $i(t)$ в программе MATLAB (SIMULINK) (рис. 5). После этого при определенном смещении с использованием токов в формате $i(\theta)$ (от угло-

вого положения) в программе FEMM происходит нахождение сил ОМП [20].

Силы ОМП определяются с помощью тензора натяжения Максвелла в магнитном поле:

$$F = \int T_i dS,$$

где T_i — тензор натяжения;

S — поверхность, охватывающая объем.

Получены результаты расчетов сил ОМП при неравномерном воздушном зазоре на всем интервале коммутации фазы А, когда ротор смещен относительно оси симметрии статора по оси Y с шагом 0,3 мм (направление выбрано вертикально вниз — в сторону действия силы тяжести) (рис. 6). График показывает, что сила ОМП имеет довольно резкий возрастающий характер в завершении периода коммутации фазы и, достигая максимума, затем также резко спадает. При вращении ротора относительно статора и переходе из рассогласованного положения зубцов в согласованное, в магнитном отношении зубцы все больше взаимодействуют друг с другом.

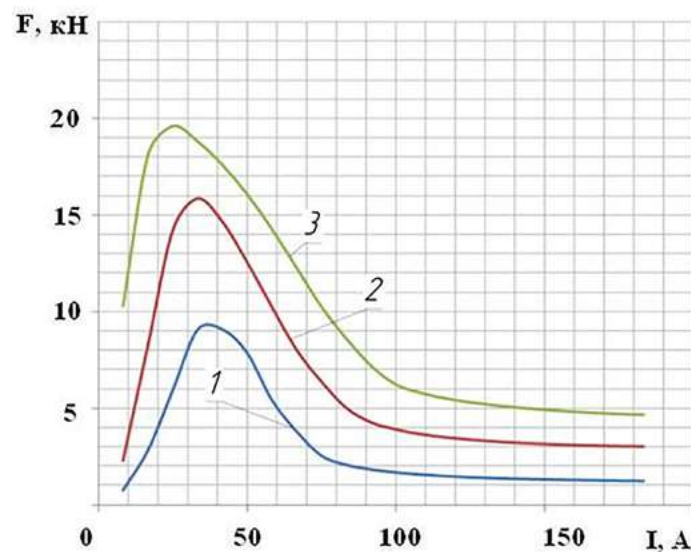


Рис. 7. Результаты расчета сил ОМП при совпадении зубцов и вертикальном смещении ротора по оси Y на:
1 — 0,3 мм; 2 — 0,6 мм; 3 — 0,9 мм

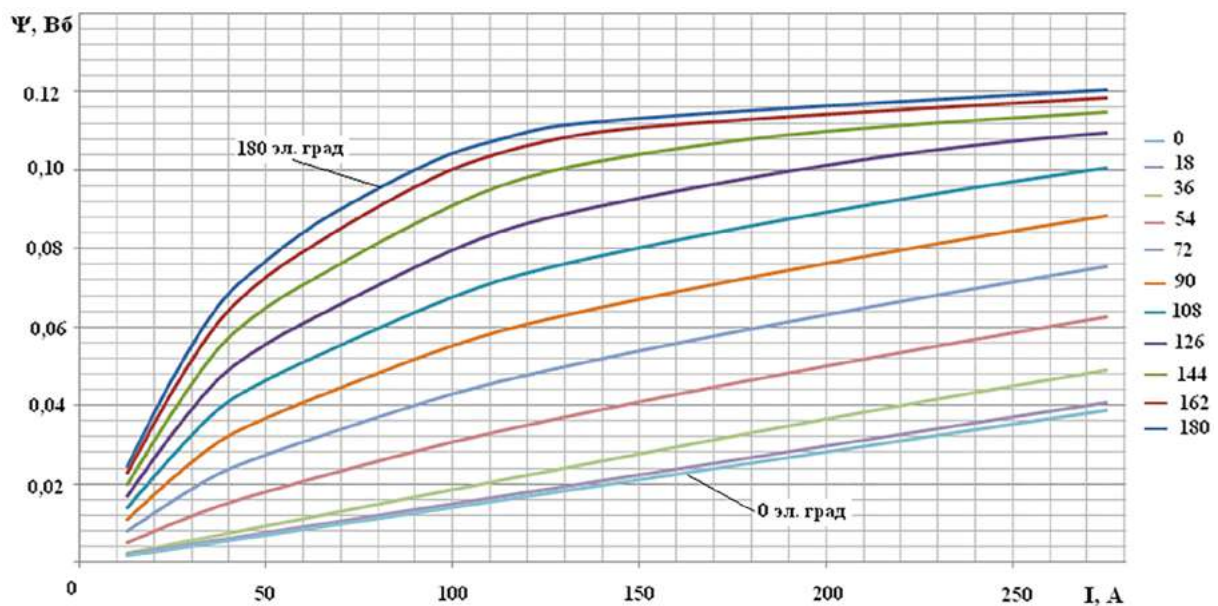


Рис. 8 Кривые намагничивания $\Psi(i, \theta)$

Получены зависимости сил ОМП от тока для магнитной системы тягового ВИД при аналогичных условиях смещения в соосном положении зубцов ротора и статора по отношению друг к другу (рис. 7).

Рис. 7 показывает, что силы ОМП принимают максимальные показатели при определенном

значении тока. Это значение соответствует току конца линейного участка кривой намагничивания (рис. 8).

Рассмотрен другой вариант, когда ротор смещается относительно оси симметрии статора одновременно по двум осям X и Y . Расчеты проводятся в режиме ограничения тока (рис. 9).

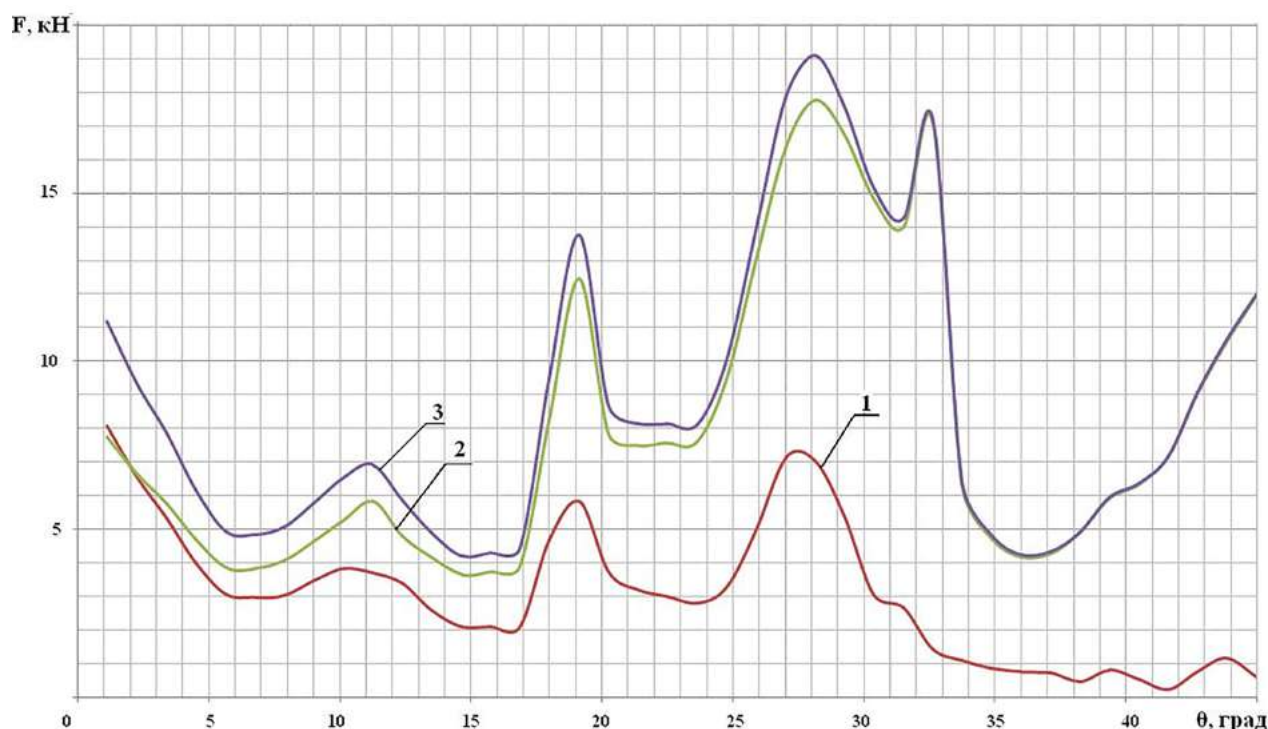


Рис. 9. Расчетные значения сил ОМП при смещении по осям X и Y на 0,5 мм:
1 — по оси X; 2 — по оси Y; 3 — результирующее по модулю

На графике рис. 9 имеется три четко различимых «всплеска» силы ОМП, каждый из которых соответствует определенной фазе А, В, С. Максимальные значения этих «всплесков», приходящиеся на спадающие токи фаз, возрастают при переходе от фазы А к фазе С. Данная закономерность присуща как составляющей силе ОМП по оси X, так и составляющей по оси Y. Кривая сил по оси X при переходе к соосному расположению зубцов ротора и статора снижается вплоть до нулевых значений.

Результаты

Под воздействием сил ОМП растет неравномерность воздушного зазора, а также создаются динамические усилия, влияющие на подшипники тягового ВИД. Аналогичное воздействие на подшипники оказывают силы дисбаланса. Хотя силы дисбаланса и силы ОМП имеют разное происхождение, характер их действия на подшипники один. Предположим, что возможно ограничить амплитудное значение сил ОМП допустимой

силой дисбаланса. Известен ГОСТ ИСО 1940-1—2007, позволяющий регламентировать силу дисбаланса, в котором описывается методика определения силы, приложенной к подшипнику при остаточном дисбалансе.

Обозначим силу при предельно допустимом остаточном дисбалансе F . Тогда, согласно предположению, сделанному выше, допустимая сила ОМП ($F_{\text{ОМП}}$) соответствует равенству $F_{\text{ОМП}} = F$. Далее подбираем класс точности балансировки. Для тягового ВИД (рис. 4) класс точности балансировки по ГОСТ ИСО 1940-1—2007 соответствует G2,5.

$$e_{\text{пер}} \omega = 2,5 \frac{\text{мм}}{\text{с}}.$$

Тогда значение допустимого остаточного дисбаланса определяется:

$$U_{\text{пер}} = 1000 \frac{(e_{\text{пер}} \omega) m}{\omega},$$

где ω — угловая частота вращения, $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$;
 m — масса ротора тягового ВИД, $m = 141$ кг.

$$\omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{3,14 \cdot 4100}{30} = 429,13 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}.$$

$$U_{\text{рег}} = 1000 \frac{2,5 \cdot 141}{429,13} = 0,822 \cdot 10^{-3} \text{ Г} \cdot \text{мм} = \\ = 0,822 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}.$$

Следовательно, сила при предельно допустимом остаточном дисбалансе:

$$F = U_{\text{рег}} \omega^2,$$

$$F = 0,822 \cdot 10^{-3} \cdot 429,13^2 = 151 \text{ Н}.$$

Значит, допустимая величина силы ОМП:

$$F_{\text{ОМП}} = F = 151 \text{ Н}.$$

Проведенные в статье расчеты сил ОМП при асимметрии магнитной системы в тяговом ВИД показали, что силы намного превышают допустимое значение. Тогда необходимо проработать особенности производственного процесса тягового ВИД для получения на выходе электрических машин с равномерным воздушным зазором.

Важно при расчетах выбирать самый неблагоприятный вариант смещения (ротор смещается вертикально вниз, в сторону воздействия силы тяжести).

Необходимо исключить (еще на начальном этапе) причины, которые могут привести к асимметрии воздушного зазора. Так, следует назначать допуски на элементы ВИД, в сумме не превышающие допустимой неравномерности зазора. На этапе сборки машины необходимо использовать более точные методы, такие как пуклевка листов; сборка электрической машины с одной установки; особый контроль элементов конструкции ВИД — фиксация имеющихся отклонений в размерах деталей, их сортировка и последующая сборка с учетом отклонений «плюс» и «минус» от фактических размеров.

В случае наличия неравномерности воздушного зазора возможно компенсировать силы ОМП за счет введения искусственно создаваемой асимметрии намагничивающих сил.

Выводы

Обеспечение равномерности воздушного зазора в ВИД за счет контроля точности изготовления элементов конструкции электрической машины, путем внесения изменений в технологический цикл на производстве, даст возможность снизить влияние сил ОМП на подшипники, повысив их надежность. Результаты проведенных исследований могут быть использованы разработчиками при проектировании тягового ВИД, выборе конструкционной величины зазора и назначении допусков в его размерной цепи.

Использование ВИД, имеющего длительный срок службы подшипников, в системе тягового привода создаст предпосылки для появления конкурентоспособного высокоскоростного подвижного состава нового поколения.

Библиографический список

1. Лаврикова Ю. Г. Стратегические основы реализации потенциала импортозамещения на примере железнодорожного машиностроения / Ю. Г. Лаврикова, Л. М. Аверина // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. — 2015. — № 3(39). — С. 85–99.
2. Косой В. В. России нужны высокоскоростные магистрали / В. В. Косой // Транспорт Российской Федерации. — 2016. — № 5(66). — С. 16–20.
3. Постановление Совета Федерации Федерального собрания РФ «О перспективах развития железнодорожного транспорта» от 12 апреля 2023 г. № 156-СФ.
4. Мишарин А. С. Высокоскоростной железнодорожный транспорт как ключевой фактор развития транспортной системы России / А. С. Мишарин // Транспорт Российской Федерации. — 2015. — № 7(57). — С. 7–10.
5. Дорохина Е. С. Анализ методов контроля теплового состояния асинхронного тягового электродвигателя

при испытаниях и эксплуатации / Е. С. Дорохина. — URL: <http://www.rcit.su/article079.html> (дата обращения: 25.08.2023).

6 Шевкунова А. В. Повышение эффективности заводского ремонта тяговых электродвигателей / А. В. Шевкунова, Е. Е. Мирошниченко // Известия ТулГУ. — 2023. — Вып. 4. — С. 564–569.

7. Vrenken R. H. S. Switched reluctance motor drive for full electric vehicles. Part II: Practical implementation / R. H. S. Vrenken et al. // Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, Monaco. — 2013. — Pp. 1–7. — DOI: 10.1109/EVER.2013.6521606.

8. Voron O. A. Improving the Energy Efficiency of Electric Machines For Specialized Railway Rolling Stock / O. A. Voron, A. D. Petrushin // XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED), Ekaterinburg, Russia. — 2021. — Pp. 1–4. — DOI: 10.1109/ACED50605.2021.9462273.

9. Gaber M. Novel Two-phase 4/6 Switched Reluctance Motor Configuration used in All Electric Ships / M. Gaber, R. Yousef, M. S. Hamad // 23rd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt. — 2022. — Pp. 1–6. — DOI: 10.1109/MEPCON55441.2022.10021713.

10. Thakre M. Performance Analysis of SRM Based on Asymmetrical Bridge Converter For Plug-in Hybrid Electric Vehicle / M. Thakre, J. Mane, V. Hadke // International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), Chennai, India. — 2020. — Pp. 1–6. — DOI: 10.1109/ICPECTS49113.2020.9337059.

11. Скрежендевский В. В. Вентильно-индукторный тяговый электродвигатель для тепловоза / В. В. Скрежендевский, А. А. Гулевич // Проблемы безопасности на транспорте: материалы международной научно-практической конференции. — Белорусский государственный университет транспорта, 2015. — С. 80–81.

12. Модернизация тепловоза ТГМ6 (ТЭМП 1т). — URL: <http://promelcom.com/modernizaciya-teplovoza-temp-1tt/> (дата обращения: 25.08.2023).

13. Анучин А. С. Разработка цифровых систем эффективного управления комплектов тягового электрооборудования гибридных электрических транспортных средств: дисс. ... д-ра. техн. наук / А. С. Анучин. — М., 2018. — 445 с.

14. Chun G. Investigation of Skewing Effects on the Vibration Reduction of Three-Phase Switched Reluctance Motors / G. Chun, W. Jianhua, S. Mengjie et al. // IEEE Transactions on Magnetic. — 2015. — Vol. 51. — Iss. 9. — Pp. 1–9.

15. Isfahani A. H. Comparison of Mechanical Vibration Between a Double-Stator Switched Reluctance Machine and a Conventional Switched Reluctance Machine / A. H. Isfahani, B. Fahimi // IEEE Transactions on Magnetic. — 2014. — Vol. 50. — Iss. 2. — Pp. 293–296.

16. Zhu Z. Q. Analytical model for predicting maximum reduction levels of vibration and noise in switched reluctance machine by active vibration cancellation / Z. Q. Zhu, X. Liu., Z. Pan // IEEE Trans. Energy Convers. — 2011. — Vol. 26. — Iss. 1. — Pp. 36–45.

17. Makino H. Digital PWM-control-based active vibration cancellation for switched reluctance motors / H. Makino, T. Kosaka, N. Matsui // IEEE Trans. Ind. — 2015. — Vol. 51. — Iss. 6. — Pp. 4521–4530.

18. Cao X. Independent control of average torque and radial force in bearingless switched-reluctance motors with hybrid excitations / X. Cao, Z. Deng, G. Yang et al. // IEEE Trans. Power Electron. — 2009. — Vol. 24. — Iss. 5. — Pp. 1376–1385.

19. Могила В. С. Особенности расчета тяговых вентильно-индукторных двигателей / В. С. Могила, Т. С. Королек // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. — 2011. — № 2(23). — С. 21–25.

20. Мирошниченко Е. Е. Оценка влияния сил одностороннего магнитного притяжения на надежность подшипникового узла вентильно-индукторной электрической машины / Е. Е. Мирошниченко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2022. — Т. 22. — № 3. — С. 39–51.

Дата поступления: 28.08.2023

Решение о публикации: 30.10.2023

Контактная информация:

МИРОШНИЧЕНКО Екатерина Евгеньевна — канд. техн. наук, доц.; ekaterinailjasova@rambler.ru

Prospective Applying of a Switched Reluctance Motor in the Traction System of a High-Speed Electric Train

E. E. Miroshnichenko

Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 344038, Rostov-on-Don

For citation: Miroshnichenko E. E. Prospective Applying of a Switched Reluctance Motor in the Traction System of a High-Speed Electric Train // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 1004–1015. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-1004-1015

Summary

Purpose: The use of switched reluctance motor (SRM) in the traction system of a high-speed electric train by increasing the performance of its bearings. Using SRM as a traction electric motor, the machine-building complex can solve problems related to the import substitution of components for rolling stock. **Methods:** The main reasons for the wear of the bearing assembly are the forces of one-way magnetic attraction (OMA). These forces occur when the air gap is asymmetric due to errors in the manufacture of parts and deviations in the assembly of the electrical machine. The OMA forces at a certain displacement are determined using the Maxwell stress tensor. To achieve this, the finite element method embodied in the FEMM program has been used. The dependences of the currents in the corresponding phases on the moment of time required to find the forces have been obtained using the MATLAB program (SIMULINK). **Results:** Calculation and analysis of OMA forces is carried out at various variants of rotor displacement relative to the axis of symmetry of the stator, including at vertical shift in the direction of gravity action. Calculations have shown that OMA forces can reach significant values. A proposal has been put forward to limit the magnitude of the OMA force to the magnitude of the force at the maximum permissible residual unbalance. Methods are proposed to eliminate irregularity of the air gap at the stage of production. **Practical significance:** The results of the studies can be used by the developers in the design of the traction SRM, the selection of the structural value of the gap and the assignment of tolerances in its dimensional chain. The use of SRM with a long life of bearings in the traction drive system will create the prerequisites for obtaining a new competitive rolling stock.

Keywords: High-speed electric train, traction motor, switched reluctance motor, magnetic system, irregularity, forces of one-way magnetic attraction, unbalance force, reliability, bearings.

References

1. Lavrikova Yu. G. Strategicheskiye osnovy realizatsii potentsiala importozameshcheniya na primere zhelezнодорожного машиностроения [Strategic foundations for the implementation of the potential of import substitution on the example of railway engineering]. *Ekonomicheskiye i sotsial'nyye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz* [Economic and social changes: facts, trends, forecast]. 2015, Iss. 3(39), pp. 85–99. (In Russian)
2. Oblique V. V. Rossii nuzhny vysokoskorostnyye magistrali [Russia needs high-speed lines]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2016, Iss. 5(66), pp. 16–20. (In Russian)
3. *Postanovlenie Soveta Federatsii Federal'nogo sobraniya RF "O perspektivakh razvitiya zhelezнодорожного транспорта"* ot 12 aprelya 2023 g. № 156-SF [Resolution of the Federation Council of the Federal Assembly of the Russian Federation "On the prospects for the development of railway transport" dated April 12, 2023 № 156-SF]. (In Russian)
4. Misharin A. S. Vysokoskorostnoy zhelezнодорожный transport kak klyuchevoy faktor razvitiya transportnoy sistemy Rossii [High-speed railway transport as a key factor in the development of the Russian transport system]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2015, Iss. 7(57), pp. 7–10. (In Russian)
5. Dorohina E. S. *Analiz metodov kontrolya teplovogo sostoyaniya asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya pri ispytaniyakh i ekspluatatsii* [Analysis of methods for monitoring the thermal state of an asynchronous traction motor

during testing and operation]. Available at: <http://www.rcit.su/article079.html> (accessed: August 25, 2023). (In Russian)

6. Shevkunova A. V., Miroshnichenko E. E. Povysheniye effektivnosti zavodskogo remonta tyagovykh elektrodvigately [Improving the efficiency of factory repair of traction motors]. *Izvestiya TulGU* [News of TulGU]. 2023, Iss. 4, pp. 564–569. (In Russian)

7. Vrenken R. H. S. et al Switched reluctance motor drive for full electric vehicles. Part II: Practical implementation. Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, Monaco, 2013. pp. 1–7. DOI: 10.1109/EVER.2013.6521606.

8. Voron O. A., Petrushin A. D. Improving the Energy Efficiency of Electric Machines For Specialized Railway Rolling Stock. XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED), Ekaterinburg, Russia, 2021, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ACED50605.2021.9462273.

9. Gaber M., Yousef R., Hamad M. S. Novel Two-phase 4/6 Switched Reluctance Motor Configuration used in All Electric Ships. 23rd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, 2022, pp. 1–6. DOI: 10.1109/MEPCON55441.2022.10021713.

10. Thakre M., Mane J., Hadke V. Performance Analysis of SRM Based on Asymmetrical Bridge Converter For Plug-in Hybrid Electric Vehicle. International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), Chennai, India, 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICPECTS49113.2020.9337059.

11. Skrezhendevsky V. V., Gulevich A. A. Ventil'no-indukturnyy tyagovyy elektrodvigatel' dlya teplovoza [Switched reluctance traction electric motor for diesel locomotive]. *Problemy bezopasnosti na transporte. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems of safety in transport. Materials of the international scientific-practical conference. Belarusian State University of Transport]. 2015, pp. 80–81.

12. *Modernizatsiya teplovoza TGM6 (TEMP 1tt)* [Modernization of diesel locomotive TGM6 (TEMP 1tt)]. Available at: <http://promelcom.com/modernizatsiya-teplovoza-temp-1tt/> (accessed: August 25, 2023). (In Russian).

13. Anuchin A. S. *Razrabotka tsifrovyykh sistem effektivnogo upravleniya komplektov tyagovogo elektrooborudovaniya gibridnykh elektricheskikh transportnykh sredstv: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Development of digital systems for effective control of traction electrical equipment for hybrid electric

vehicles: diss. ... dr. tech. sciences]. Moscow, 2018, 445 p. (In Russian)

14. Chun G., Jianhua W., Mengjie S. et al. Investigation of Skewing Effects on the Vibration Reduction of Three-Phase Switched Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Magnetic*, 2015, vol. 51, Iss. 9, pp. 1–9.

15. Isfahani A. H., Fahimi B. Comparison of Mechanical Vibration Between a Double-Stator Switched Reluctance Machine and a Conventional Switched Reluctance Machine. *IEEE Transactions on Magnetic*, 2014, vol. 50, Iss. 2, pp. 293–296.

16. Zhu Z. Q., Liu X. Pan Analytical model for predicting maximum reduction levels of vibration and noise in switched reluctance machine by active vibration cancellation. *IEEE Trans. Energy Convers*, 2011, vol. 26, Iss. 1, pp. 36–45.

17. Makino H., Kosaka T., Matsui N. Digital PWM-control-based active vibration cancellation for switched reluctance motors. *IEEE Trans. Ind*, 2015, vol. 51, Iss. 6, pp. 4521–4530.

18. Cao X., Deng Z., Yang G. et al. Independent control of average torque and radial force in bearingless switched-reluctance motors with hybrid excitations. *IEEE Trans. Power Electron*, 2009, vol. 24, Iss. 5, pp. 1376–1385.

19. Mogila V. S., Korolek T. S. Osobennosti rascheta ventil'no-indukturnykh dvigateley [Features of calculation traction switched reluctance motors]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: Nauka i transport* [Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport]. 2011, Iss. 2(23), pp. 21–25.

20. Miroshnichenko E. E. Otsenka vliyaniya sil odnostoronnnego magnitnogo prityazheniya na nadezhnost' podshipnikovogo uzla ventil'no-indukturnoy elektricheskoy mashiny [Evaluation of the influence of the forces of one-sided magnetic attraction on the reliability of the bearing assembly of a switched reluctance electric machine]. *Vestnik YUUrGU. Seriya "Energetika"* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering]. 2022, vol. 22, Iss. 3, pp. 39–51. (In Russian)

Received: August 28, 2023

Accepted: October 30, 2023

Author's information:

Ekaterina E. MIROSHNICHENKO —
PhD in Engineering, Associate Professor;
ekaterinailjasova@rambler.ru

УДК 620.179.119

Оценка работоспособности магнитных индикаторов при магнитопорошковом контроле деталей подвижного состава железных дорог

А. Г. Отока¹, О. В. Холодилов²

¹Гомельское вагонное депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги», Беларусь, 246014, Гомель, ул. Телегина, 1а

²Белорусский государственный университет транспорта, Беларусь 246653, Гомель, ул. Кирова, 34

Для цитирования: Отока А. Г., Холодилов О. В. Оценка работоспособности магнитных индикаторов при магнитопорошковом контроле деталей подвижного состава железных дорог // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 1016–1026. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-1016-1026

Аннотация

Цель: Оценить работоспособность различных люминесцентных магнитных суспензий на примере отдельных малогабаритных деталей железнодорожного транспорта, отличающихся геометрической формой, цветом, шероховатостью поверхности и наличием лакокрасочного покрытия. Показать необходимость проверки магнитных суспензий, в том числе готовых, в аэрозольных баллонах на настроечных (контрольных) образцах с учетом цвета, наличия немагнитного покрытия и других характеристик. **Методы:** Сравнение полученных магнитопорошковых индикаций при проведении магнитопорошкового контроля мокрым способом в условиях намагничивания деталей подвижного состава способом приложенного поля с использованием дефектоскопа МД-12ППШ. На практике соблюдались одинаковые условия по намагничиванию деталей в центре соленоида, равномерному нанесению магнитной суспензии путем распыления из аэрозольного баллончика и распылителя на поверхность, а также осмотру на наличие скопления валиков магнитного порошка как при дневном освещении, так и при ультрафиолетовом облучении. **Результаты:** Эксперимент показал, что полностью опираться и доверять техническим характеристикам на магнитный индикатор, которые указаны в паспорте производителем, не стоит. При этом использование одного или нескольких стандартных или настроечных (контрольных) образцов при огромной номенклатуре объектов контроля недостаточно. Практика показывает, что с учетом различной поверхности деталей необходимо проведение сравнительного анализа магнитных суспензий на предмет яркости свечения порошка, контрастности, измеренной длины магнитной индикации на деталях с искусственными или естественными дефектами с точно такой же поверхностью. **Практическая значимость:** В статье показана необходимость использования для каждого объекта контроля свой настроечный или контрольный образец. Под исключение попадают только те объекты контроля, которые по своим размерам, форме, цвету, шероховатости и другим характеристикам идентичны или сопоставимы между собой. Поэтому для них может применяться только один образец.

Ключевые слова: Магнитопорошковый контроль, выявляющая способность, магнитная суспензия, работоспособность, качество магнитного индикатора, контрольный образец, настроечный образец.

Введение

Сегодня рынок дефектоскопических материалов, используемых при проведении магнитопорошкового контроля ферромагнитных деталей в различных отраслях промышленности, достаточно обширный. Выбрать подходящий магнитный индикатор для конкретного материала исходя из состояния его поверхности: шероховатость, цвет, наличие лакокрасочных покрытий и других факторов достаточно сложно. Основываясь только на паспортных характеристиках дефектоскопических материалов: цвет, размер частиц, коэффициент и стабильность флуоресценции и др., на практике не всегда удается достичь высокой чувствительности метода.

На выявляемость дефектов магнитопорошковым методом контроля влияют множество факторов: магнитные характеристики материала объекта контроля, способ и схема контроля, форма и размер контролируемого объекта, вид намагничивания и намагничивающего тока и т. д. [1, 2].

К основным свойствам магнитного порошка, оказывающим влияние на выявляемость дефектов, относятся дисперсность, магнитные и оптические характеристики. Если рассматривать свойства магнитной суспензии, которые влияют на чувствительность контроля, то они определяются ее составом, концентрацией и свойствами отдельных компонентов [3].

Выявляющая способность магнитных индикаторов должна оцениваться количественно с помощью специализированных электрических измерительных приборов, а работоспособность индикаторов — с применением контрольных образцов с дефектами. Порядок проведения входного или периодического контроля магнитных индикаторов устанавливают в НТД отрасли или предприятия.

Качественное проведение магнитопорошкового контроля деталей во многом зависит от контрольных и стандартных образцов. В отличие от стандартных образцов, контрольные образцы не

являются средствами измерений и периодической метрологической поверке не подлежат. Они подвергаются периодической проверке на работоспособность магнитопорошковых дефектоскопов и магнитных индикаторов [4].

В железнодорожной отрасли проверку качества магнитного индикатора проводят с помощью намагничивающего устройства МОН 721 и мер в комплекте с ним в целях реализации требуемой чувствительности метода.

В соответствии с нормативными документами [5, 6] допускается проверка выявляющей способности магнитного индикатора с использованием мер (настроечных образцов, стандартных образцов) с искусственными дефектами по методике, которая утверждена в технологической документации на предприятии.

Для проверки работоспособности магнитных суспензий преимущественно выбирают образцы с трещинами, а также другие образцы различного типа с искусственными или естественными дефектами, в том числе со встроенными постоянными магнитами. Работоспособность суспензии оценивают путем выявления дефектов на образцах при тех способах намагничивания, на которые рассчитан каждый образец. При этом на образцах размеры дефектов должны быть соизмеримы с размерами минимальных дефектов, которые требуется обнаруживать [7].

На практике проблематично найти или приобрести конкретный образец с дефектом для каждого объекта контроля, который будет изготовлен из того же материала и с такой же геометрической формой. Поэтому зачастую в целях сокращения финансовых затрат, отсутствия подходящего конкретного контрольного образца с естественной трещиной и другим причинам на предприятиях с большой номенклатурой проверяемых деталей применяется один образец, который может в принципе отличаться по цвету, геометрии, или, например, шероховатости.

Хочется отметить, что проводить магнитопорошковый контроль деталей допускается после оксидирования, окраски или нанесения немагнитного покрытия, если суммарная толщина покрытия не превышает 40 мкм [2]. И уже с учетом этих требований напрашивается вопрос: а будет ли выявлен 100 % дефект при использовании одной и той же суспензии и намагничивающего устройства на различных деталях, отличающихся как геометрической формой и цветом, так и с нанесением допустимого немагнитного покрытия?

Сегодня пользуется популярностью мокрый способ нанесения магнитного индикатора, когда на намагниченную деталь или участок наносится суспензия со взвешенными частицами магнитного порошка (способ суспензии).

В соответствии с [8] для магнитопорошковых суспензий размеры магнитных частиц должны быть в диапазоне для частиц малого диаметра $d_1 \geq 1,5$ мкм и для частиц большого диаметра $d_u \leq 40$ мкм.

В качестве дисперсионной среды для магнитного порошка применяют воду или масляную жидкость с низкой вязкостью. Водные суспензии используют в первую очередь из-за низкой себестоимости, дешевой утилизации, пожаробезопасности. Масляные суспензии принято использовать на поверхностях с низким коэффициентом поверхностного натяжения (замасленные поверхности), при проверке особо чувствительных к коррозии объектов, а также в случае применения метода при отрицательных температурах [9].

Для минимизации возможных ошибок при самостоятельном изготовлении суспензии различными производителями предлагается применять готовую к употреблению суспензию в аэрозольных баллонах.

Учитывая тот факт, что от формы объекта контроля (ОК) зависит конфигурация силовых магнитных линий в изделии, сравним работоспособность различных магнитопорошковых суспензий

на примере проведения магнитопорошкового контроля деталей подвижного состава с естественными и искусственными дефектами. При этом подбор деталей (табл. 1, рис. 1) осуществлялся по различным критериям: шероховатость и цвет поверхности объекта контроля, материал, наличие лакокрасочного покрытия, наличие на поверхности дефектов, невидимых глазу, не только естественных, но и искусственных с измеренными точными размерами, ориентация дефекта(ов).

В качестве магнитного индикатора применялся сухой концентрат магнитных суспензий (КМС) различных производителей. Он использовался для приготовления флуоресцентной магнитопорошковой суспензии на водной и масляной основе (табл. 2). Нанесение магнитопорошковой суспензии осуществлялось аэрозольным способом из пульверизатора и стандартного в заводском исполнении баллона.

Количество сухого концентрата для приготовления суспензии на водной основе принималось в соответствии с ТУ на магнитный индикатор. Взвешивание сухого КМС проводилось на электронных весах МК-6.2-A21 с дискретностью 0,5 г (предел взвешивания 6 кг).

Намагничивание объектов контроля проводилось с использованием магнитного дефектоскопа МД-12ППШ способом приложенного поля. Осмотр выполнялся в затемненном помещении с помощью источника УФ-излучения в диапазоне длин волн 315–400 нм с номинальной максимальной интенсивностью излучения на длине волны (365 ± 5) нм.

Эксперимент проводился несколько раз, и рассчитывалось среднее значение длины дефектов по скоплению валика магнитного порошка, полученных в процессе магнитопорошкового контроля деталей и составных частей подвижного состава. Длину индикации измеряли с помощью штангенциркуля ШЦ-I-125-0,02 с ценой деления 0,02 мм и допускаемой погрешностью до $\pm 0,03$ мм.

Таблица 1. Основные параметры объектов контроля

Объекта контроля	Материал	Цвет поверхности	Шероховатость поверхности R_z , мкм	Габаритные размеры	Размеры дефекта
Гайка шестигранная с фланцем поводка тележки	Сталь 3	Темный с нанесением лакокрасочного покрытия (черная краска)	80	М 64 × 6, диаметр фланца — 100 мм, шестигранник — 85 мм	Длина естественной трещины 50 мм
Маятниковая подвеска автосцепного устройства	Сталь 38ХС	Темный	320	Длина 220, ширина 64 мм, высота 25 мм	Длина естественной трещины № 1 — 20 мм, трещины № 2 — 8 мм
Стопорная планка буксового узла колесной пары	Сталь 5	Светлый	2,5	Длина 118 мм, ширина 31 мм, высота 9 мм	Длина искусственного дефекта 10,1 мм, ширина 24,2 мкм

*a**б**в*

Рис. 1. ОК с искусственными и естественными дефектами:

a — гайка шестигранная с фланцем поводка тележки (темная поверхность с нанесением лакокрасочного покрытия толщиной до 20 мкм в виде черной краски из распылительного баллона); *б* — маятниковая подвеска автосцепного устройства (темная поверхность); *в* — стопорная планка буксового узла колесной пары НО МП 32.05 (светлая поверхность)

Таблица 2. Характеристики КМС, используемых в эксперименте

КМС, производитель	Основа суспензии	Цвет	Размер частиц, мкм	Метод нанесения
MR76F (готовая люминесцентная суспензия) Chemie GmbH, Германия	Масло	Желто-зеленая под УФ, темно-зеленая при дневном свете	(3–4)*	Аэрозольный из баллона
КСФ-12 ООО «ИнвоТекс», РФ	Вода (10 г/л)	Светло-зеленый	12	Аэрозольный из пульверизатора
Mi-GLOW850 Circle Systems, США	Вода (3–24 г/л)	Оранжево-красный при УФ, красный при дневном свете	5–30 (10)*	Аэрозольный из пульверизатора
Magnaglo 14HF (готовая люминесцентная суспензия) Magnaflux, Великобритания	Масло (1,00–1,25 г/л)	Зеленая под УФ, коричневая жидкость при дневном свете	(6–7)*	Аэрозольный из баллона
Диагма-1613 «Орион-М», РФ	Вода (15–20 г/л)	Зеленый	3–20	Аэрозольный из пульверизатора

* Средний размер.

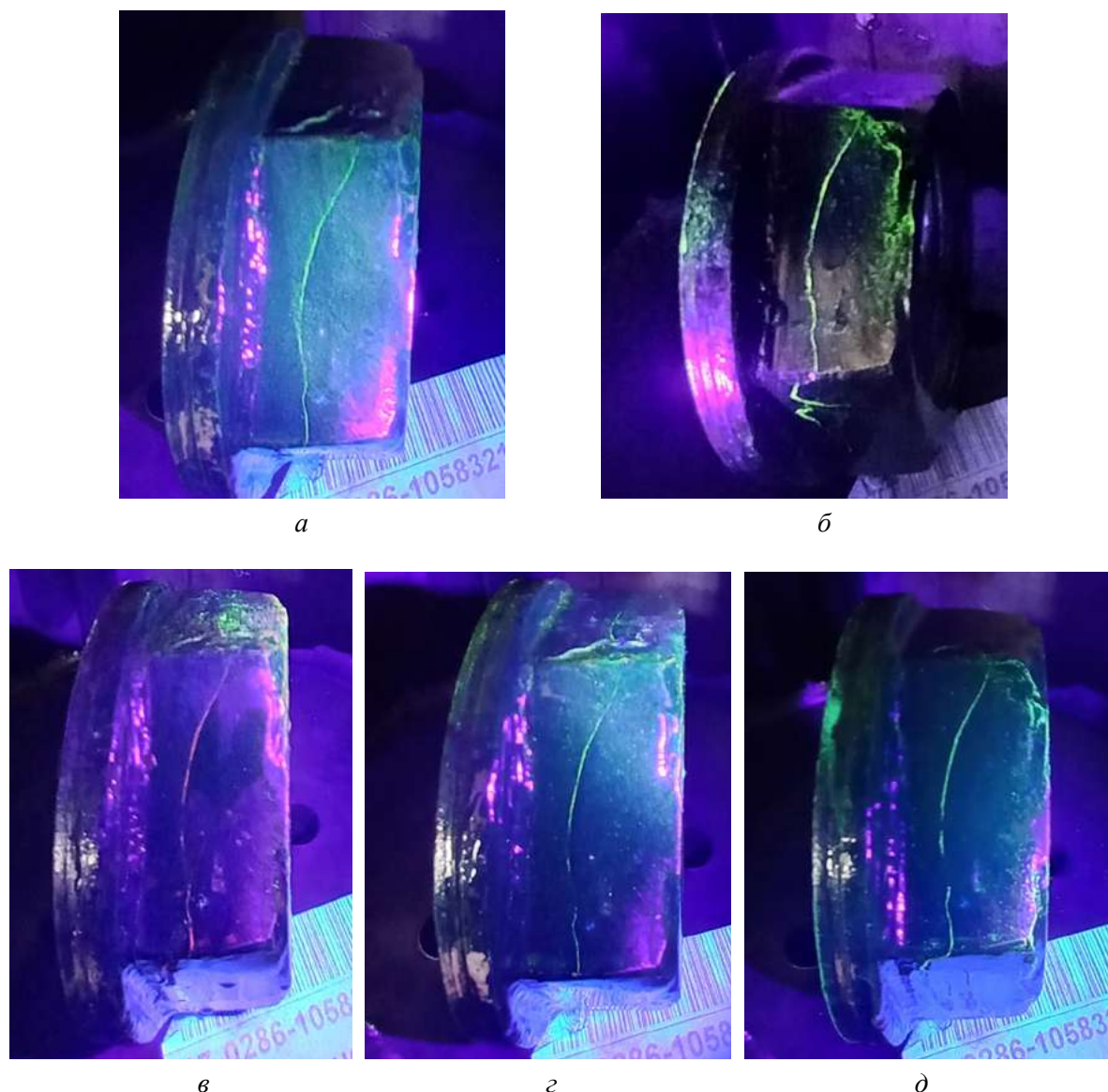


Рис. 2. Дефектограмма гайки шестигранной с фланцем поводка тележки (темная поверхность с нанесением лакокрасочного покрытия толщиной до 20 мкм в виде черной краски из распылительного баллона):
а — MR76F; *б* — КСФ12; *в* — Mi-GLOW850; *г* — Magnaglo 14HF; *д* — Диагма-1613

На рис. 2 продемонстрирована работоспособность исследуемых магнитных суспензий на примере объекта контроля, окрашенного в черный цвет.

Магнитная суспензия MR76F на масляной основе и КСФ-12 на водной отлично зарекомендовали себя при выявлении естественной трещины в гайке поводка тележки (рис. 2).

В отличие от вышеописанных, суспензии Mi-GLOW850, Magnaglo 14HF, Диагма-1613

позволили выявить трещину в виде отдельных трех индикаций. При этом суспензия Mi-GLOW850 справилась наименее эффективно, о чем можно судить по яркости свечения трещины на поверхности, окрашенной в черный цвет.

Магнитные суспензии КСФ-12, Mi-GLOW850, Диагма-1613 на водной основе показали наилучший результат при выявлении естественной трещины № 1 (20 мм) и трещины № 2 (8 мм) маятни-

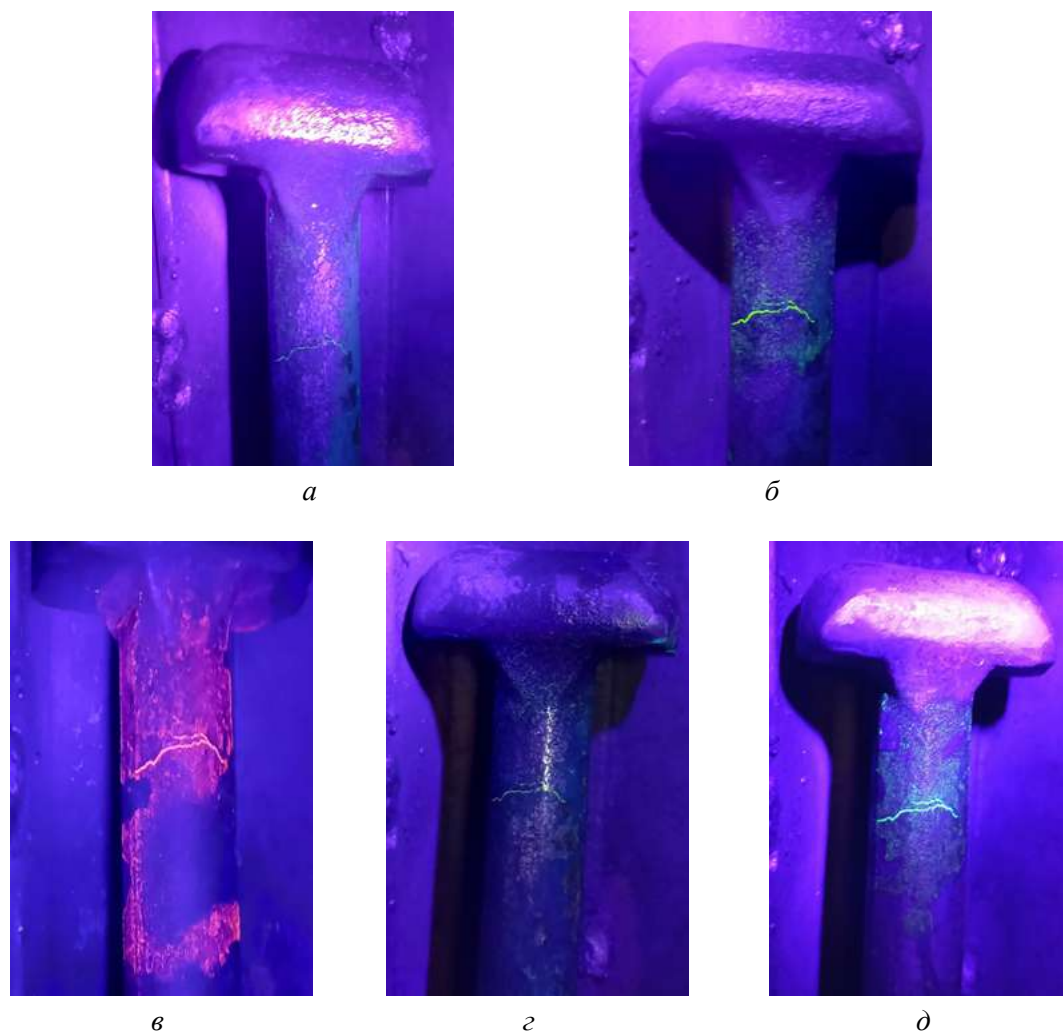


Рис. 3. Дефектограмма маятниковой подвески автосцепного устройства (темная поверхность):
а — MR76F; б — КСФ-12; в — Mi-GLOW850; г — Magnaglo 14HF; д — Диагма-1613

ковой подвески автосцепного устройства (рис. 3). При этом по яркости свечения трещин при наименьшем фоновом свечении выделяется КСФ-12.

Суспензии MR76F, Magnaglo 14HF на масляной основе показали трещину № 1 (20 мм) плохо заметной, а трещину № 2 (8 мм) при отсутствии фонового свечения практически невозможной к проведению оценки дефекта по длине. При этом ширина валика магнитного порошка заметно уступает суспензиям КСФ-12, Mi-GLOW850, Диагма-1613.

При осмотре в дневном свете на наличие магнитных индикаций вставки с искусственным

дефектом (длина 10,1 мм, ширина 24,2 мкм) хорошо зарекомендовали себя суспензии MR76F, Диагма-1613 (рис. 4). Чуть хуже по скоплению магнитного порошка контура круглой вставки можно выделить КСФ-12 и Mi-GLOW850. При этом суспензия Magnaglo 14HF показала плохой результат — индикаторный след нечеткий и размытый.

В отличие от осмотра стопорных планок при дневном свете, в УФ-освещении магнитные суспензии все показали отличный результат по выявлению дефекта (рис. 5).

Суспензии КСФ-12 и Mi-GLOW850 выделяются чуть бóльшим негативным фоновым

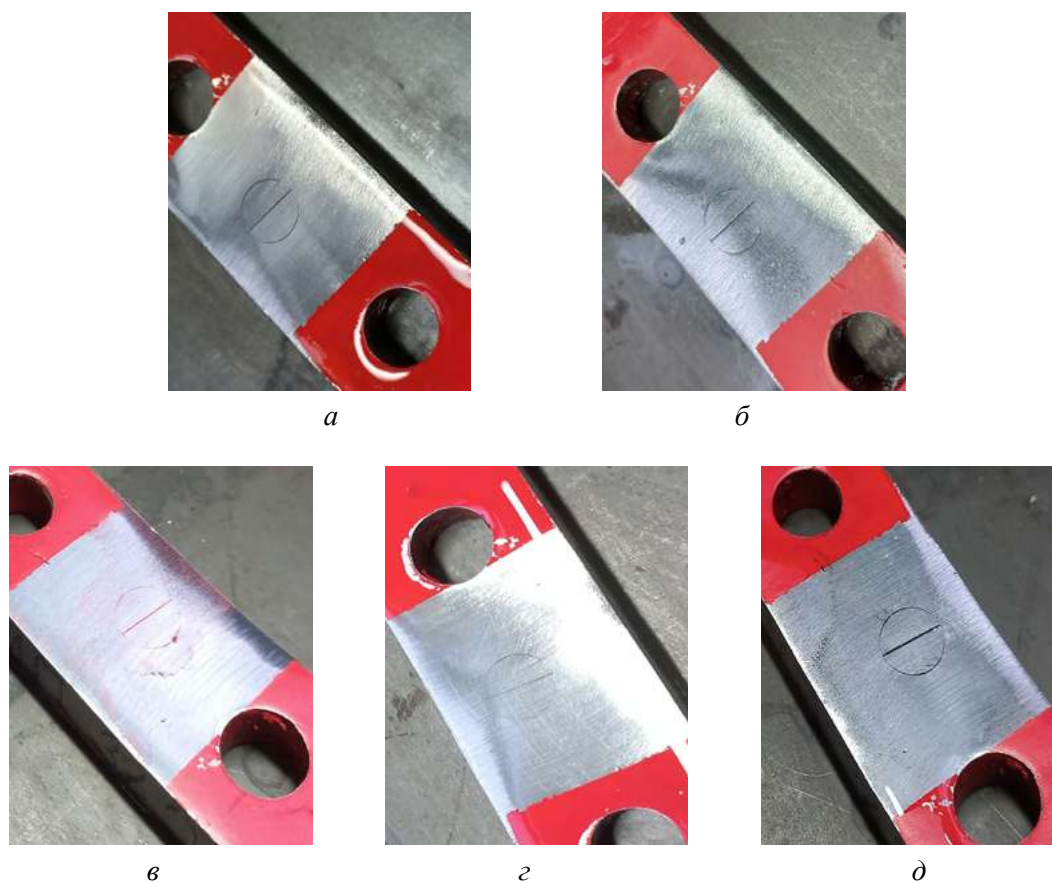


Рис. 4. Дефектограмма стопорной планки при дневном освещении (светлая поверхность):
a — MR76F; *б* — КСФ12; *в* — Mi-GLOW850; *г* — Magnaglo 14HF; *д* — Диагма-1613

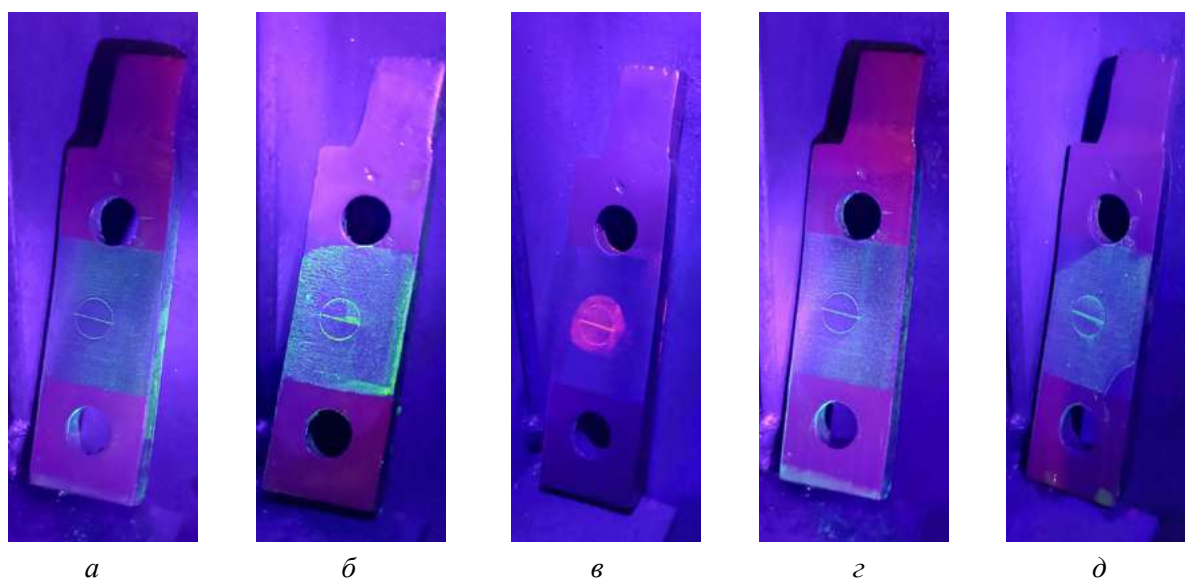


Рис. 5. Дефектограмма стопорной планки при УФ-освещении (светлая поверхность):
a — MR76F; *б* — КСФ12; *в* — Mi-GLOW850; *г* — Magnaglo 14HF; *д* — Диагма-1613

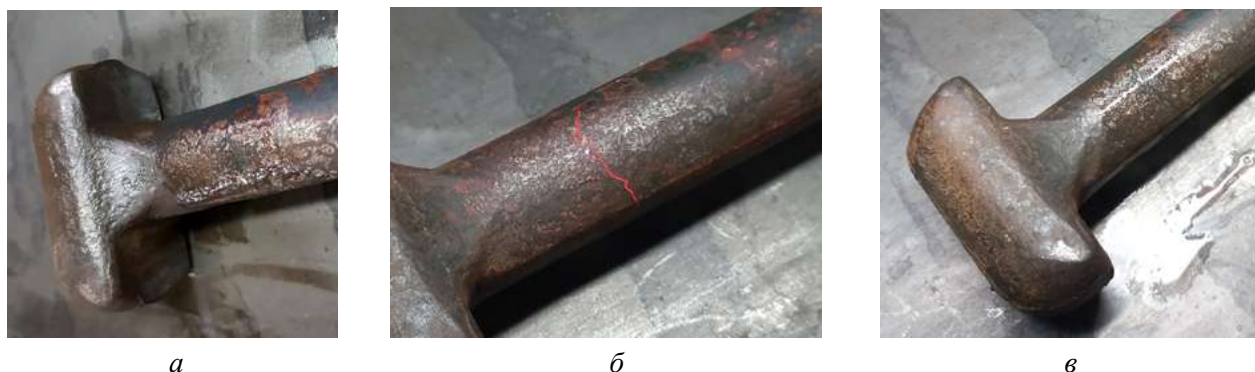


Рис. 6. Дефектограмма маятниковой подвески при дневном освещении (темная поверхность):

а — КСФ12; б — Mi-GLOW850; в — Magnaglo 14HF

Таблица 3. Результаты измерения длины магнитопорошковых индикаций

КМС	Напряженность магнитного поля в центре соленоида, А/см	Измеренная фактическая длина индикаторного следа (при УФ-освещении), мм		
		гайка шестигранная с фланцем	маятниковая подвеска	стопорная планка
MR76F	180	$L_{\text{сум}} = L_1 = 50$	$L_1 = 20, L_2 = 2$	$L_1 = 10$
КСФ-12		$L_{\text{сум}} = L_1 = 50$	$L_1 = 20, L_2 = 8$	$L_1 = 10$
Mi-GLOW850		$L_{\text{сум}} = L_1 + L_2 + L_3$ $L_{\text{сум}} = 25 + 1 + 12 = 37$	$L_1 = 20, L_2 = 8$	$L_1 = 10$
Magnaglo 14HF		$L_{\text{сум}} = L_1 + L_2 + L_3$ $L_{\text{сум}} = 25 + 2 + 12 = 38$	$L_1 = 20, L_2 = 3$	$L_1 = 10$
Диагма-1613		$L_{\text{сум}} = L_1 + L_2 + L_3$ $L_{\text{сум}} = 25 + 4 + 12 = 41$	$L_1 = 20, L_2 = 7$	$L_1 = 10$

свечением наряду с MR76F, Magnaglo 14HF, Диагма-1613. Хочется отметить, что ширина валика магнитного порошка искусственного дефекта длиной 10,1 мм для суспензий Диагма-1613, Mi-GLOW850 превосходит ширину валика других суспензий.

На рис. 6 хорошо видно, что использование суспензии Mi-GLOW850 на темной поверхности при дневном свете допустимо благодаря контрастности магнитного порошка красного цвета. При этом остальные суспензии с частицами магнитного порошка зеленоватого оттенка трудно или практически невозможно распознать.

Из-за того, что объекты контроля отличаются по конфигурации, цвету, состоянию поверхности и другим характеристикам, работоспособность магнитных суспензий различается (табл. 3).

К примеру, если на темной поверхности маятниковой подвески суспензии КСФ-12, Mi-GLOW850 показали наилучший результат (чуть хуже Диагма-1613, плохо — MR76F, Magnaglo 14HF), то на окрашенной черной поверхности гайки поводка с поставленной задачей отлично справились суспензии MR76F и КСФ-12 (плохо — Диагма-1613, Magnaglo 14HF, Mi-GLOW850). При этом на светлой поверхности стопорной планки при дневном освещении хорошо работают суспензии MR76F, Диагма-1613 (хуже КСФ-12 и Mi-GLOW850, плохо — Magnaglo 14HF), в то время как под УФ — все суспензии показали близкие результаты. На темной поверхности маятниковой подвески при дневном свете за счет цветового контраста магнитного индикатора суспензия Mi-GLOW850 оказалась лучше всех

остальных суспензий, для которых применение без УФ-освещения не предусмотрено.

Если сравнивать в целом все суспензии на фоне темных поверхностей, в том числе окрашенных в черный цвет, суспензия КСФ-12 показала отличный результат выявления дефектов как при визуальном осмотре индикации, так и по измеренным значениям ее длины. При этом суспензия Magnaglo 14HF показала плохой результат из-за размытости индикаторного следа и отображения одной индикации в виде нескольких цепочек скоплений.

Очевидно, что опираясь только на рекламу производителя, размер частиц порошка и другие свойства из паспорта на магнитный индикатор, нельзя с уверенностью говорить о высокой чувствительности метода.

Применение предлагаемых специализированных образцов в виде магнитных индикаторных полосок с искусственными дефектами, количественно-качественных индикаторов различными зарубежными фирмами не гарантирует качество и высокую работоспособность суспензии, так как не учитываются форма, материал изделия и другие факторы [10].

Заключение

Несмотря на некоторые субъективные факторы проведенного эксперимента, на практике в целях получения высокой эффективности и достоверности выявления дефектов необходима все же апробация магнитного индикатора для конкретного объекта контроля на настроечных (контрольных) образцах с дефектами, характеристика (материал, конфигурация, цвет и т.д.) которых должна быть схожая или идентичная с ним. При этом тип и размер дефектов должны соответствовать значениям, указанным в ТНПА на метод и объект контроля (если таковое имеется).

Сегодня выбор магнитных индикаторов различных производителей настолько обширный, что нет особых преград к приобретению их в виде

небольшой партии (к слову, некоторые производители или официальные представители изготовителей безвозмездно предлагают апробацию продукта) и сравнению полученных магнитопорошковых индикаций для выбранных объектов контроля на практике. Таким образом, оценивая контрастную наглядную картину, воспринимаемую глазом человека, а также измеренную длину индикации, яркость свечения и т.д., можно с уверенностью говорить о качестве той или иной магнитной суспензии.

Авторы выражают благодарность организации ООО «Теханалитикал» за безвозмездное предоставление некоторых КМС в целях проведения сравнительного анализа с имеющимися магнитными индикаторами на предмет обнаружения дефектов в малогабаритных деталях подвижного состава.

Библиографический список

1. Леднев И. С. Исследование свойств дефектоскопических материалов для проведения магнитопорошкового контроля / И. С. Леднев // Труды ВИАМ. — 2022. — № 2(108). — URL: <http://www.viam-works.ru>. — DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-122-132 (дата обращения: 20.07.2023).
2. Павлова Т. Д. Влияние характеристик магнитных индикаторных материалов на чувствительность магнитопорошкового контроля / Т. Д. Павлова, А. Д. Кадосов, А. В. Степанов и др. // Все материалы. Энциклопедический справочник. — 2016. — № 6. — С. 12–15.
3. Антипов С. М. Особенности магнитопорошкового метода магнитной дефектоскопии / С. М. Антипов, С. А. Смышляев, С. С. Вылцан // Евразийский Союз ученых (ЕСУ). — 2015. — № 4(13). — С. 116–117.
4. Толмачев И. И., Осадчих Ю. В. Повышение качества проведения магнитопорошковой дефектоскопии объектов с подповерхностными дефектами / И. И. Толмачев, Ю. В. Осадчих // Вестник науки Сибири. — 2014. — № 2(12). — С. 81–83.

5. ПР НК В.2. Правила неразрушающего контроля деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте. Специальные требования (утверждены Советом по железнодорожному транспорту государств — участников Содружества, протокол от 19–20 ноября 2013 года № 59). — 2013. — 86 с.

6. ТИ НК В.21-2.2019. Технологическая инструкция по неразрушающему контролю деталей и составных частей колесных пар вагонов при ремонте. Магнитопорошковый метод (утверждена президентом НП «ОПЖТ»), 2019. — 51 с.

7. ГОСТ Р 56512—2015. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Типовые технологические процессы (утвержден и введен в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулир. и метрологии от 6 июля 2015 г. № 875-ст), 2015. — 60 с.

8. ГОСТ Р ИСО 9934-2—2011. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Часть 2. Дефектоскопические материалы (утвержден и введен в действие

Приказом Федер. агентства по техн. регулир. и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 1113-ст). — 2011. — 20 с.

9. Рисс Н. Основные свойства магнитных индикаторов / Н. Рисс, А. Ф. Иванков // В мире неразрушающего контроля. — 2008. — № 1(39). — С. 4–6.

10. Кадосов А. Д. Контрольные образцы для определения работоспособности магнитопорошковых дефектоскопов и магнитных индикаторов (обзор) / А. Д. Кадосов, И. С. Леднев, Т. Д. Павлова и др. // Труды ВИАМ. — 2019. — № 5(77). — DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-76-84.

Дата поступления: 31.08.2023

Решение о публикации: 25.10.2023

Контактная информация:

ОТКА Александр Генрикович — аспирант;
otokaaleksandr@gmail.com

ХОЛОДИЛОВ Олег Викторович — д-р техн. наук,
проф.; olhol@tut.by

Evaluation of the Performance of Magnetic Indicators for Magnetic Powder Control of Railway Rolling Stock Parts

A. G. Otoka¹, O. V. Kholodilov²

¹Gomel Wagon Depot of RUE «Gomel Branch of the Belarusian Railway», 1a Telegina str., 246014, Gomel, Republic of Belarus

²Belarusian State University of Transport (BelsUT), 34, Kirova str., 246653, Gomel, Republic of Belarus

For citation: Otoka A. G., Kholodilov O. V. Evaluation of the Performance of Magnetic Indicators for Magnetic Powder Control of Railway Rolling Stock Parts // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 1016–1026. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-1016-1026

Summary

Purpose: To evaluate the performance of various luminescent magnetic suspensions on the example of individual small-sized parts of railway transport, differing in geometric shape, color, surface roughness and the presence of paint coating. To show the need to test magnetic suspensions, including ready-made ones, in aerosol cans on tuning (control) samples, taking into account the color, the presence of a non-magnetic coating, and other characteristics. **Methods:** Comparison of the obtained magnetic powder indications during wet magnetic powder control under conditions of magnetization of rolling stock parts by the applied field method using the MD-12PSH flaw detector. In practice, identical conditions have been maintained for magnetizing components at the center of the solenoid, uniformly applying magnetic suspension through aerosol can and sprayer to the surface, as well as inspecting for the presence of accumulations of magnetic powder particles under both daylight and ultraviolet irradiation. **Results:** The experiment has shown that the technical characteristics of the magnetic indicator stated in the passport by the manufacturer shouldn't be fully trusted and relied on. At the same time, the use of one or more standard or tuning (control) samples with a huge range of control objects is not enough. Practice shows that, taking into account the fact that surfaces of parts differ, it is necessary to conduct a comparative analysis of magnetic suspensions for the brightness of powder glow, contrast, measured length of the magnetic indication on parts with artificial or natural defects with exactly the same surface.

Practical significance: The article shows that it is necessary to use for each control object its own tuning or control sample. Only those objects of control that are identical or comparable in size, shape, color, roughness, and other characteristics fall under the exception. Therefore, only one sample can be used for them.

Keywords: Magnetic powder control, detecting ability, magnetic suspension, working capacity, quality of the magnetic indicator, control sample, tuning sample.

References

1. Lednev I. S. Issledovanie svoystv defektoskopicheskikh materialov dlya prove-deniya magnitoporoshkovogo kontrolya [Investigation of the properties of flaw detection materials for magnetic powder control]. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM]. 2022, Iss. 2(108). Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-122-132 (accessed: July 20, 2023). (In Russian)
2. Pavlova T. D., Kadosov A. D., Stepanov A. V. et al. Vliyanie kharakteristik magnitnykh indikatornykh materialov na chuvstvitel'nost' magnitoporoshkovogo kontrolya [Influence of the characteristics of magnetic indicator materials on the sensitivity of magnetic powder control]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All materials. Encyclopedic reference]. 2016, Iss. 6, pp. 12–15. (In Russian)
3. Antipov S. M., Smyshlyaev S. A., Vyltsan S. S. Osobennosti magnitoporoshkovogo metoda magnitnoy defektoskopii [Features of the magnetic powder method of magnetic flaw detection]. *Evraziyskiy Soyuz uchenykh (ESU)* [Eurasian Union of Scientists (ESU)]. 2015, Iss. 4(13), pp. 116–117. (In Russian)
4. Tolmachev I. I., Osadchikh Yu. V. Povyshenie kachestva provedeniya magnitoporoshkovoy defektoskopii ob'ektov s podpoverkhnostnymi defektami [Improving the quality of magnetic powder flaw detection of objects with subsurface defects]. *Vestnik nauki Sibiri* [Bulletin of Science of Siberia]. 2014, Iss. 2(12), pp. 81–83. (In Russian)
5. PR NK V.2. Pravila nerazrushayushchego kontrolya detaley i sostavnykh chastey ko-lesnykh par vagonov pri remonte. Spetsial'nye trebovaniya (utverzhdeny Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv — uchastnikov Sodruzhestva, protokol ot 19–20 noyabrya 2013 goda № 59) [PR NK V.2. Rules for non-destructive testing of parts and components of car wheel pairs during repairs. Special requirements (approved by the Council on Railway Transport of the Commonwealth member states, protocol dated November 19–20, 2013 № 59)]. 2013, 86 p. (In Russian)
6. TI NK V.21-2.2019. Tekhnologicheskaya instruksiya po nerazrushayushchemu kontrolyu detaley i sostavnykh chastey kolesnykh par vagonov pri remonte. Magnitoporoshkovyy metod (utverzhdena prezidentom NP “OPZhT”) [TI NK V.21-2.2019. Technological instructions for non-destructive testing of parts and components of car wheel pairs during repairs. Magnetic particle method (approved by the president of NP “OPZhT”). 2019, 51 p. (In Russian)
7. GOST R 56512—2015. Kontrol' nerazrushayushchiy. Magnitoporoshkovyy metod. Tipovye tekhnologicheskie protsessy (utverzhden i vveden v deystvie Prikazom Feder. agentstva po tekhn. regulir. i metrologii ot 6 iyulya 2015 g. № 875-st), 2015 [GOST R 56512—2015. Non-destructive testing. Magnetic particle method. Standard technological processes (approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated July 6, 2015 № 875-st), 2015]. 60 p. (In Russian)
8. GOST R ISO 9934-2—2011. Kontrol' nerazrushayushchiy. Magnitoporoshkovyy metod. Chast' 2. Defektoskopicheskie materialy (utverzhden i vveden v deystvie Prikazom Feder. agentstva po tekhn. regulir. i metrologii ot 13 dekabrya 2011 g. № 1113-st) [GOST R ISO 9934-2—2011. Non-destructive testing. Magnetic particle method. Part 2. Flaw detection materials (approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 13, 2011 № 1113-st)]. 2011, 20 p. (In Russian)
9. Riess N., Ivankov A. F. Osnovnye svoystva magnitnykh indikatorov [Main properties of magnetic-particle inspection medium]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya* [NDT World Review]. 2008, Iss. 1(39), pp. 4–8. (In Russian)
10. Kadosov A. D., Lednev I. S., Pavlova T. D. et al. Kontrol' nye obrazcy dlja opredeleniya rabotosposobnosti magnitoporoshkovykh defektoskopov i magnitnykh indikatorov (obzor) [Control samples for determining the performance of magnetic powder flaw detectors and magnetic indicators (review)]. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM]. 2019, Iss. 5(77). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-76-84. (In Russian)

Received: August 31, 2023

Accepted: October 25, 2023

Author's information:

Alexander G. OTOKA — Postgraduate Student;
otokaaleksandr@gmail.com

Oleg V. KHOLODILOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor;
olhol@tut.by



УДК 629.33:621.43

О влиянии топливного биоэтанола на эксплуатационные свойства транспортных двигателей

А. Л. Пенкин¹, Е. А. Руппель¹, А. А. Воробьев², А. А. Соболев², И. Ю. Новосельский²

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

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

Для цитирования: Пенкин А. Л., Руппель Е. А., Воробьев А. А., Соболев А. А., Новосельский И. Ю. О влиянии топливного биоэтанола на эксплуатационные свойства транспортных двигателей // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 1027–1033. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-1027-1033

Аннотация

Цель: Комплексно рассмотреть влияние биоэтанола как добавки к бензину на эксплуатационные свойства транспортных двигателей с точки зрения различий в физико-химических свойствах и технологии получения, учитывая не только преимущества, но и недостатки. Более подробно оценить испаряемость бензино-этанольных смесей при различном содержании в них этанола и воды и ее влияние на пусковые свойства. **Методы:** Сопоставление имеющихся данных в нормативной и справочной литературе, а также в научных публикациях. Проведение эксперимента по предусмотренной стандартом для бензина методике по измерению давления насыщенных паров бензино-этанольных смесей различного состава. **Результаты:** Из собранных данных выделены имеющие существенное значение для эксплуатации транспортных двигателей параметры бензино-этанольных смесей. Выявлена необходимость детальной оценки влияния состава таких смесей на конструкционные материалы транспортных двигателей. Получены данные по испаряемости смесей в широком температурном диапазоне, имитирующем реальные условия эксплуатации. Они не выявили существенного ухудшения пусковых свойств. Отмечено видимое нарушение фазовой стабильности смесей, содержащих более 7,5 % воды. **Практическая значимость:** Проведенная оценка испаряемости и пусковых свойств бензино-этанольных смесей различного состава позволяет судить об их удовлетворительном уровне по сравнению с бензином для смесей с 5%-м содержанием этанола и относительно удовлетворительном для смесей с 85%-м содержанием этанола. Параметры предусмотренной стандартом методики впервые расширены относительно обычно контролируемой при измерении давления насыщенных паров температуры до возможно широких пределов, позволяющих получить более полную картину.

Ключевые слова: Топливный биоэтанол, бензин, испаряемость, давление насыщенных паров, пусковые свойства, транспортные двигатели.

Денатурированный топливный биоэтанол, или этиловый спирт, используется в качестве добавки к бензину. Бензино-этанольные смеси с содержанием этанола более 5 % рассматриваются уже как альтер-

нативное топливо. Основным преимуществом биоэтанола является повышенная по сравнению с бензином детонационная стойкость. Ввиду наличия в его составе кислорода его относят в ряд оксигенатов,

Таблица. 1. Некоторые физико-химические свойства бензина и этанола

Свойство	Ед. изм.	Бензин	Биоэтанол
Плотность при 20 °С	кг/м ³	720–780	790–820
Низшая теплота сгорания	МДж/кг	44,0	26,7
Температура кипения	°С	33–205	78
Температура вспышки	°С	–27	13
Пределы воспламенения	% об.	1–6	4–17
Октановое число по исследоват. методу	Ед.	92–98	108–120
Давление насыщенных паров при 37,8 °С	кПа	45–100	17
Стехиометрический состав	—	1:14,7	1:9

присадок, повышающих октановое число бензина и улучшающих полноту сгорания топливовоздушной смеси. Тем самым повышаются очищающие свойства топлива по отношению к деталям цилиндропоршневой группы, а также улучшается экологичность за счет снижения на 10–20 % содержания контролируемых вредных веществ в отработавших газах двигателя [1]. Сравнение характеристик бензина и биоэтанола представлено в табл. 1.

Поскольку этанол производится из возобновляемых ресурсов пищевого и непищевого происхождения, то он способствует экономии ископаемых нефтепродуктов, а по энергоэффективности превосходит их, так как выделяемый при его производстве и сжигании в двигателе углекислый газ в равной, а возможно, и в большей мере поглощается на этапе произрастания сырья, из которого он изготавливается [2, 3]. Также его достоинством является меньшая удельная стоимость производства по сравнению с топливом из невозобновляемых ресурсов, если не считать распространяющихся на него акцизов на алкогольную продукцию, что делает его конкурентоспособным энергоносителем [4].

По ГОСТ 33872—2016 топливный биоэтанол может быть абсолютным, содержащим не более 1,0 % масс. воды, или обводненным, содержащим не более 7,5 % масс. воды. По ГОСТ Р 51105—2020 допускается содержание в бензине этанола не более 5 % об. Существует также ГОСТ Р 54290—2010, предусматривающий топливную

смесь, содержащую от 75 % об. до 85 % об. топливного этанола и от 15 % об. до 25 % об. бензина.

Технология производства топливного биоэтанола практически идентична технологии производства собственно этанола, за исключением добавления денатурирующих добавок, или денатурантов, делающих его непригодным для использования в качестве напитка, и абсолютирования, или обезвоживания. Она включает приготовление бражки из сырья и брагоректификацию в спирт. Технологическая блок-схема производства биоэтанола представлена на рис. 1.

Для производства биоэтанола используется два вида сырья: крахмалистое и целлюлозное. Первое содержит достаточно крахмала, чтобы избежать затратного процесса предобработки и ферментативного гидролиза целлюлозы и практически сразу перейти к брожению глюкозы. Это, как правило, сахарный тростник, используемый в Бразилии, и кукуруза, используемая в США. В России таким сырьем могут быть пшеница, свекловичный жом, а также отходы, излишки и низшие сорта прочих пищевых культур. Так как этот вид сырья логистически доступен и требует наименьших затрат на единицу готовой продукции, он наиболее распространен. Однако поскольку это сырье является пищевым или силосным, то производство из него топливного биоэтанола создает конкуренцию продуктам питания и корма и в результате ведет к повышению цен на продовольствие, что в текущих условиях нехватки еды

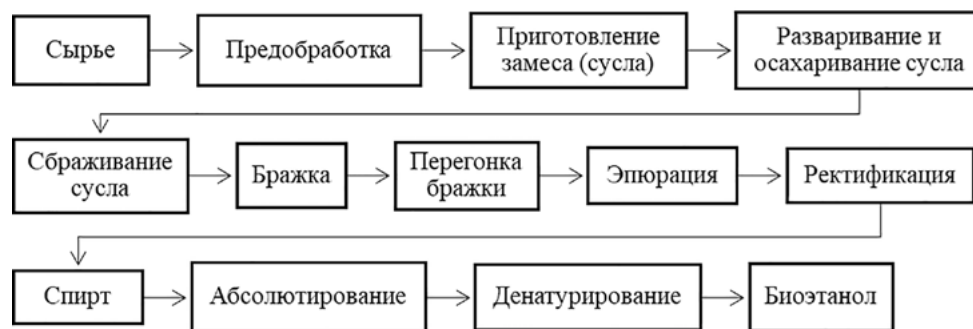


Рис. 1. Процессуальная блок-схема производства биоэтанола

Таблица. 2. Содержание воды в бензине и этаноле, % масс.

№ опыта	Чистый бензин	Этанол (1,0 % воды)	Этанол (6,8 % воды)	Этанол (14,8 % воды)
1	0,0152	0,9241	6,7312	14,9015
2	0,0164	0,9687	6,7773	14,8258
3	0,0190	0,9592	6,7397	14,7505
Среднее	0,0169	0,9507	6,7494	14,8259
СКО, %	11,28	2,47	0,36	0,51

в некоторых регионах мира вызывает морально-этическую критику.

С этой точки зрения наиболее перспективным сырьем для производства биоэтанола являются различные органические отходы не только агропромышленного, но и целлюлозно-бумажного комплекса, водоросли и прочая биомасса, на основе которой производится топливный этанол второго и третьего поколений. Это сырье обладает также лучшей энергоэффективностью [5].

Широкому производству и применению биоэтанола в России препятствует отсутствие достаточного рынка сбыта, необходимой государственной поддержки, а также технические сложности, связанные с неразвитой инфраструктурой и системой технической эксплуатации транспортных двигателей на топливных смесях с ним. Эти сложности обусловлены прежде всего наличием кислорода в составе биоэтанола, как имеющего собственную гидроксильную группу, так и содержащего растворенную воду. Этот фактор, наряду с повышенной гигроскопичностью и низкими смазывающими свойствами, вызывает коррозионный износ и приводит к сокращению ресурса элементов автозапра-

вочной инфраструктуры и конструкционных материалов транспортных двигателей [6].

Анализ научной литературы по данному вопросу показал, что имеются лабораторные исследования, которые демонстрируют изменение размеров и массы, а также предела прочности и твердости (по Шору) изделий в результате продолжительного воздействия бензино-этанольных смесей. Показано, что наиболее подверженными изменению размеров и массы являются детали из эластомеров, далее пластиков и менее всего — из металлов. Детали из металлов подвержены, помимо этого, различным видам коррозии, особенно в местах контакта друг с другом [7, 8]. Однако нет данных о совместимости бензино-этанольных смесей с конструкционными материалами транспортных двигателей в реальных условиях эксплуатации, для чего необходимы не только лабораторные, но и стендовые и дорожные ресурсные испытания.

Помимо влияния на материалы, наличие биоэтанола в смеси с бензином негативно влияет на испаряемость топливовоздушной смеси, ухудшая пусковые свойства, что обусловлено низкой собственной испаряемостью этанола, зависящей

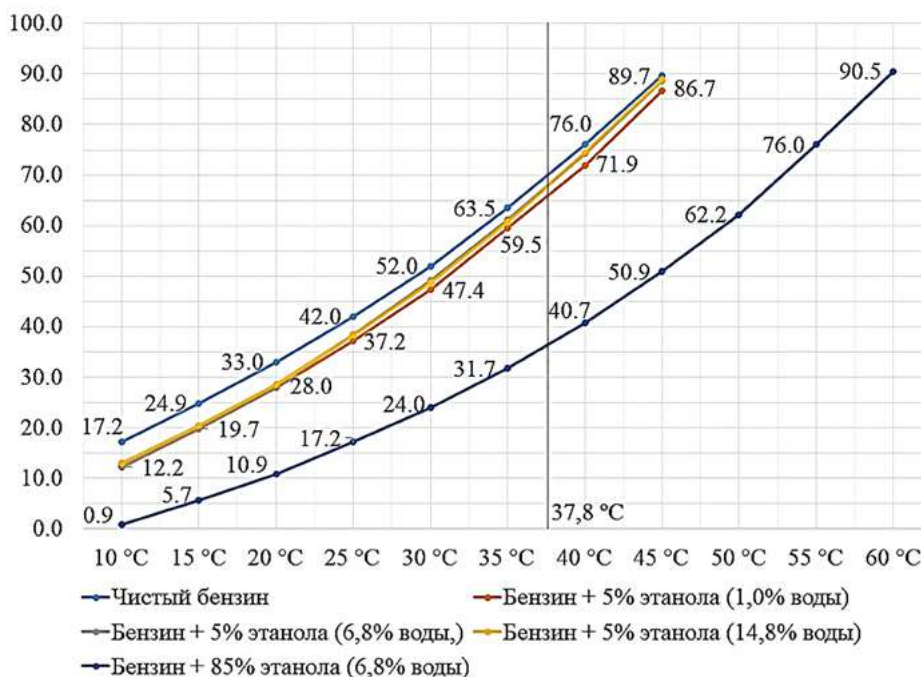


Рис. 2. Скорректированное на температуру окружающего воздуха и атмосферное давление ДНП смесей бензина с этанолом, кПа

также от содержания воды в нем [9]. Чтобы оценить это влияние, была проведена серия опытов с измерением давления насыщенных паров (ДНП) по методу Рейда для бензинов по ГОСТ 31874—2012. Были взяты смеси бензина АИ-95-К5 с фактическим паспортным значением ДНП 69,5 кПа (класс испаряемости А, В) и этанола технического. Вариация состава смесей составила три вида условного Е5 (бензин с содержанием 5 % об. этанола), различающихся по содержанию воды в этаноле: в среднем 1, 6,8 и 14,8 % соответственно. Этанол с содержанием воды 1 % был получен абсолютированием 96%-го спирта адсорбцией влаги на свежeproкаленных молекулярных ситах 3Å, с иным содержанием — разбавлением спирта дистиллированной водой в нужных пропорциях. Кроме того, была приготовлена условная смесь Е85 с содержанием воды в спирте 6,8 %. В каждом варианте смеси было проведено по три опыта в разных бомбах Рейда, и взято среднее значение. Среднее квадратичное отклонение (СКО) всей серии опытов составило 2,46 %. Приготовление условных смесей Е5 и Е85 производилось по ГОСТ 33132—

2014, по объему, с перемешиванием с помощью магнитной мешалки. Контроль содержания воды производился по методу Карла Фишера по ГОСТ Р 54281—2022 с использованием Титратора Эксперт-007М. Результаты измерения содержания воды в исходном бензине и подготовленных марках этанола представлены в табл. 2.

Ввиду повышенного внимания к фазовой стабильности (склонности к расслаиваемости) бензино-этанольных смесей, фактически являющихся эмульсиями условно нерастворимых фаз вода — спирт и спирт — бензин, стоит отметить, что этанол с содержанием воды 1 и 6,8 % растворялся в бензине полностью, без видимого разделения фаз, в смеси же содержанием воды 14,8 % наблюдалось выделение фазы этанол — вода на дне стакана [10].

Анализ результатов опытов, представленных на рис. 2, показывает, что при содержании этанола в смеси с бензином 85 % об. полученная ДНП при температуре 37,8 °C удовлетворяет требованиям ГОСТ 32513—2013, согласно которым минимальное ДНП для всех классов испаряемости бензина определяется равным 35 кПа. И не удовлетворяет

требованиям ГОСТ Р 51105—2020, согласно которым минимальное ДНП для классов А, В составляет 45 кПа. Испаряемость смеси Е85 в диапазоне температур от 10 до 45 °С снизилась в среднем на 60 % относительно чистого бензина. Условные смеси Е5 удовлетворяют требованиям обоих стандартов, отмечается относительное снижение испаряемости с среднем на 10,2 % в том же диапазоне температур.

Выводы

1. Влияние топливного биоэтанола на эксплуатационные свойства транспортных двигателей различно. С улучшением детонационной стойкости и сокращением удельных выбросов диоксида углерода и вредных примесей с отработавшими газами двигателя одновременно отмечается агрессивное действие на конструкционные материалы и ухудшение пусковых свойств.

2. Ухудшение пусковых свойств, определяемое по изменению давления насыщенных паров бензино-этанольных смесей Е5 с различным содержанием воды, составило в среднем 4,1 % при контролируемой температуре 37,8 °С. Это позволяет сделать вывод об их удовлетворительном уровне по сравнению с чистым бензином.

3. Негативное воздействие бензино-этанольных смесей на конструкционные материалы транспортных двигателей требует более тщательной оценки в условиях лабораторных и дорожных испытаний.

Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Библиографический список

1. Абрамов А. А. Улучшение энергетических и экологических характеристик поршневых ДВС при переходе на бензоэтанольное топливо / А. А. Абрамов, А. В. Апельинский, К. С. Руновский и др. // Известия МГТУ МАМИ. — 2013. — Т. 1. — № 2(16). — С. 101–106.
2. Коновалов Д. С. Спирт как перспективное топливо / Д. С. Коновалов, Д. В. Цыганков // Синтез науки и общества в решении глобальных проблем современности: сборник статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции 30 апреля 2019 г. — С. 116–119.
3. Руппель Е. А. Аспекты повышения энергоэффективности автомобильного транспорта за счет применения альтернативных видов топлива / Е. А. Руппель, А. Л. Пенкин // Магистратура — автотранспортной отрасли: материалы VI Всероссийской межвузовской конференции, Санкт-Петербург, 21–22 октября 2021 года. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. — С. 124–130.
4. Кожевникова Ю. В. Производство биоэтанола — ключ к получению экологически чистых высокооктановых бензинов / Ю. В. Кожевникова, Е. Ю. Сердюкова, В. Е. Моисеенко // Химия. Экология. Урбанистика. — 2020. — № 4. — С. 88–92.
5. Сусану И. А. Регулирование рынка жидкого биотоплива в России и мире / И. А. Сусану // Торговая политика. — 2019. — № 1(17). — С. 60–88.
6. Адизов Б. З. Использование этанола в качестве октаноповышающей добавки (присадки) к автомобильным бензинам / Б. З. Адизов, М. Ж. Махмудов, А. А. Салойдинов // Universum: технические науки. — 2023. — № 5-5(110). — С. 46–52.
7. Бганцев В. Н. Исследование коррозионной активности бензоэтанолов различного состава, полученных с использованием новых технологий / В. Н. Бганцев, В. Н. Киреева // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. — 2013. — № 60. — С. 118–122.
8. Durbin T. D. Material compatibility evaluation for elastomers, plastics, and metals exposed to ethanol and butanol blends / T. D. Durbin, G. Karavalakis, J. M. Norbeck et al. // Fuel. — 2016. — Iss.163. — Pp. 248–259.
9. Тимергазин А. Р. Улучшение пусковых свойств двигателей с искровым зажиганием, работающих на смесях бензина с этанолом / А. Р. Тимергазин, Н. П. Нешатаев, Д. В. Мальцев // Химия. Экология. Урбанистика. — 2021. — Т. 3. — С. 252–256.

10. Гареев Т. Р. Методы получения и исследования бензино-этанольной эмульсии / Т. Р. Гареев, А. Т. Гильмутдинов, И. Г. Лапшин // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. — 2019. — № 1. — С. 234–246.

Дата поступления: 12.10.2023

Решение о публикации: 19.11.2023

Контактная информация:

ПЕНКИН Алексей Леонидович — канд. техн. наук,

доц.; apenkin2008@rambler.ru

РУППЕЛЬ Евгений Александрович — аспирант;
italian@yandex.ru

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук,
доц.; 79219751198@yandex.ru

СОБОЛЕВ Александр Альбертович — канд. техн. наук;
a89213194387@yandex.ru

НОВОСЕЛЬСКИЙ Игорь Юрьевич — канд. техн. наук;
inovoselskiy@internet.ru

On the Influence of Fuel Bioethanol on the Operational Properties of Transport Engines

A. L. Penkin¹, Ye. A. Ruppel¹, A. A. Vorob'yov², A. A. Sobolev², I. Yu. Novoselsky²

¹Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation

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

For citation: Penkin A. L., Ruppel Ye. A., Vorob'yov A. A., Sobolev A. A., Novoselsky I. Yu. On the Influence of Fuel Bioethanol on the Operational Properties of Transport Engines // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 1027–1033. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-1027-1033

Summary

Purpose: To comprehensively consider the effect of bioethanol as an additive to gasoline on the operational properties of transport engines from the point of view of their differences in physical and chemical properties and technologies, taking into account not only advantages, but also disadvantages. To more profoundly evaluate the volatility of gasoline-ethanol mixtures at different ethanol and water contents, and its effect on startability. **Methods:** Comparison of available data in normative and reference literature, also in scientific publications. Conducting an experiment using the standard method for gasoline to measure the saturated vapor pressure of gasoline-ethanol mixture of various composition. **Results:** From the collected data, parameters of the gasoline-ethanol mixture that are important for operation of transport engines have been identified. The need for a detailed assessment of the influence of the composition of such mixtures on the structural materials of transport engines has been identified. Data have been obtained on the volatility of mixtures in a wide temperature range, simulating real operating conditions. No significant deterioration in startability has been revealed. A visible violation of the phase stability of mixtures containing more than 7.5% water has been noted. **Practical significance:** The measured degree of volatility and startability of gasoline-ethanol mixtures of the various composition allows us to conclude that their level in comparison with gasoline, for mixtures with a 5% ethanol content is satisfactory, and for mixtures with 85% ethanol, is relatively satisfactory. For the first time, the parameters of the provided standard procedure are expanded, relative to the usual temperature recommended when measuring the vapor pressure, to possibly wider limits, allowing a more complete picture to be obtained.

Keywords: Fuel bioethanol, gasoline, volatility, saturated vapor pressure, startability, transport engines.

References

1. Abramov A. A., Apelinskiy A. V., Runovskiy K. S. et al. Uluchshenie energeticheskikh i ekologicheskikh kharakteristik porshnevnykh DVS pri perekhode na benzoetanol'noe toplivo [Improving the energy and environmental characteristics of piston internal combustion engines when switching to benzo-ethanol fuel]. *Izvestiya MGTU MAMI* [Proceedings of MSTU MAMI]. 2013, vol. 1, Iss. 2(16), pp. 101–106. (In Russian)
2. Konovalov D. S., Tsygankov D. V. Spirt kak perspektivnoe toplivo [Alcohol as a promising fuel]. *Sintez nauki i obshchestva v reshenii global'nykh problem sovremennosti: sbornik statey po itogam Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 30 aprelya 2019 g.* [Synthesis of science and society in solving global problems of our time: a collection of articles based on the results of the All-Russian scientific and practical conference on April 30, 2019]. pp. 116–119. (In Russian)
3. Ruppel' E. A., Penkin A. L. Aspekty povysheniya energoeffektivnosti avtomobil'nogo transporta za schet primeneniya al'ternativnykh vidov topliva [Aspects of increasing the energy efficiency of road transport through the use of alternative fuels]. *Magistratura — avtotransportnoy otrasli: materialy VI Vserossiyskoy mezhvuzovskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 21–22 oktyabrya 2021 goda* [Master's degree in the motor transport industry: materials of the VI All-Russian Interuniversity Conference, St. Petersburg, 21–22 October 2021]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet Publ., 2022, pp. 124–130. (In Russian)
4. Kozhevnikova Yu. V., Serdyukova E. Yu., Moiseenko V. E. Proizvodstvo bioetanol — klyuch k polucheniyu ekologicheskikh vysokooktanovykh benzinov [Production of bioethanol is the key to obtaining environmentally friendly high-octane gasoline]. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika* [Chemistry. Ecology. Urbanism]. 2020, Iss. 4, pp. 88–92. (In Russian)
5. Susanu I. A. Regulirovaniye rynka zhidkogo biotopliva v Rossii i mire [Regulation of the liquid biofuel market in Russia and the world]. *Torgovaya politika* [Trade Policy]. 2019, Iss. 1(17), pp. 60–88. (In Russian)
6. Adizov B. Z., Makhmudov M. Zh., Saloydinov A. A. Ispol'zovanie etanola v kachestve oktanopovyshayushchey dobavki (prisadki) k avtomobil'nym benzinam [The use of ethanol as an octane-increasing additive (additive) to motor gasoline]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences]. 2023, Iss. 5-5(110), pp. 46–52. (In Russian)
7. Bgantsev V. N., Kireeva V. N. Issledovanie korrozionnoy aktivnosti benzoetanolov razlichnogo sostava, poluchennykh s ispol'zovaniem novykh tekhnologiy [Study of the corrosion activity of benzoethanols of various compositions obtained using new technologies]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of the Kharkov National Automobile and Road University]. 2013, Iss. 60, pp. 118–122. (In Russian)
8. Durbin T. D., Karavalakis G., Norbeck J. M. et al. Material compatibility evaluation for elastomers, plastics, and metals exposed to ethanol and butanol blends. *Fuel*, 2016, Iss. 163, pp. 248–259
9. Timergazin A. R., Neshataev N. P., Mal'tsev D. V. Uluchshenie puskovykh svoystv dvigateley s iskrovym zazhiganiem, rabotayushchikh na smesyakh benzina s etanolom [Improving the starting properties of spark-ignition engines operating on mixtures of gasoline with ethanol]. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika* [Chemistry. Ecology. Urbanism]. 2021, vol. 3, pp. 252–256. (In Russian)
10. Gareev T. R., Gil'mutdinov A. T., Lapshin I. G. Metody polucheniya i issledovaniya benzino-etanol'noy emul'sii [Methods for obtaining and studying gasoline-ethanol emulsion]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal Neftegazovoe delo* [Electronic scientific journal Oil and Gas Business]. 2019, Iss. 1, pp. 234–246. (In Russian)

Received: October 12, 2023

Accepted: November 19, 2023

Author's information:

Alexey L. PENKIN — PhD in Engineering, Associate Professor; apenkin2008@rambler.ru

Yevgeny A. RUPPEL — Postgraduate Student; italian@yandex.ru

Aleksandr A. VOROB'YOV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; 79219751198@yandex.ru

Aleksandr A. SOBOLEV — PhD in Engineering, Associate Professor; a89213194387@yandex.ru

после этого автора добавить соавтора:

Igor Yu. NOVOSELSKY — PhD in Engineering; inovoselskiy@internet.ru

УДК 629.4

Нейронная сеть и чат-бот «Валера» для подготовки специалистов высшей квалификации

И. К. Андрончев, А. И. Соляник

Академия стандартизации, метрологии и сертификации, Российская Федерация, 109443, Москва, Волгоградский пр., 90, корп. 1

Для цитирования: Андрончев И. К., Соляник А. И. Нейронная сеть и чат-бот «Валера» для подготовки специалистов высшей квалификации // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 1034–1039. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-1034-1039

Аннотация

Цель: Рассмотреть проблему связи образования и производства через модель качества инженерной деятельности в дополнительном профессиональном образовании инженеров при подготовке кадров высшей квалификации. Показать целесообразность применения нейронной сети для развития методических основ подготовки кадров высшей квалификации. **Методы:** Предложена модель процесса обучения с использованием нейросети и чат-бота «Валера» для подготовки кадров высшей квалификации. **Результаты:** Приведен пример положительного опыта применения электронного учебно-методического комплекса «Компетентный метролог» и его методических основ в системе дополнительного профессионального образования инженеров и подготовке кадров высшей квалификации. **Практическая значимость:** Показана необходимость применения нейросети в процессе подготовки кадров. Положительный опыт применения идей и подходов к созданию нейронной сети для чат-бота «Валера» и его методических основ в системе дополнительного профессионального образования инженеров реализован в электронном учебно-методическом комплексе «Компетентный метролог». Предложенные подходы к обучению могут быть рекомендованы к практическому использованию.

Ключевые слова: Нейронная сеть, чат-бот, модель, качество, инженерная деятельность, дополнительное профессиональное образование, подготовка кадров высшей квалификации.

Вступление

Образование сегодня становится приоритетным объектом финансирования во всех развитых странах мира, имеет место осознание перспективности инвестиций в человеческий капитал. В сфере управления образованием происходит поиск разумного компромисса между жесткой централизацией и стандартизацией образования, с одной стороны, и полной автономией учебных заведений, с другой. Происходит развитие многоуровневой системы образования, которая обеспечивает более широкую мобильность

в темпах обучения и в выборе обучающимися будущей специальности. Она формирует у обучающегося способность и стремление осваивать на базе полученного университетского образования новые специальности и профессии [1, 2].

В данной работе рассматривается проблема связи образования и производства через качество инженерной деятельности и дополнительное профессиональное образование инженеров высшей квалификации. Образовательный процесс неразрывно связан с моделированием качества инженерной деятельности [3, 4]. Придя на про-

изводство, выпускник инженерного вуза кроме профессиональных знаний, умений, полученных в вузе, должен получить навыки инженерной деятельности. Ему необходимы точность и аккуратность, так как технические знания, умения ассоциируют точность и внимательность [5, 6]. Далее, рассматривая креативность и инновационность, мы ассоциативно переходим к соблюдению стандартов и норм. Коммуникационные навыки, конечно же, необходимы инженеру при управлении проектами.

На современном этапе актуальность подготовки кадров высшей квалификации становится все более важной. Существует несколько причин, почему это так:

1. Быстро меняющаяся технологическая среда: современный мир быстро развивается, новые технологии, методы и подходы появляются каждый день. Чтобы оставаться конкурентоспособными, компании должны быть готовы адаптироваться к этим изменениям. Подготовка кадров высшей квалификации позволяет работникам освоить новые навыки и знания, необходимые для работы в современной технологической среде.

2. Увеличение требований к квалификации: с ростом конкуренции на рынке труда требования к квалификации работников становятся все более высокими. Работодатели ищут специалистов с глубокими знаниями и опытом работы в своей области. Подготовка кадров высшей квалификации позволяет работникам получить дополнительные знания и навыки, которые могут повысить их конкурентоспособность на рынке труда.

3. Развитие специализации: в современном мире все больше компаний и организаций становятся специализированными в своей области. Это требует наличия специалистов, обладающих глубокими знаниями и опытом работы в этой области. Подготовка кадров высшей квалификации позволяет работникам стать экспертами в своей области и получить преимущество перед конкурентами.

4. Необходимость повышения эффективности и производительности: в условиях увеличения конкуренции компании стремятся повысить эффективность и производительность своей деятельности. Подготовка кадров высшей квалификации может помочь работникам развить навыки и методы, которые позволят им выполнять свою работу более эффективно и продуктивно.

5. Поддержание конкурентоспособности на международном уровне: современный рынок труда становится все более глобализованным, и компании все чаще сталкиваются с конкуренцией на международном уровне. Подготовка кадров высшей квалификации позволяет работникам освоить международные стандарты и требования, что может помочь компаниям оставаться конкурентоспособными на глобальном рынке.

Все эти факторы подчеркивают необходимость подготовки кадров высшей квалификации на современном этапе. Работники, обладающие глубокими знаниями и навыками в своей области, могут стать ценными активами для компаний и организаций, помогая им достичь успеха в быстро меняющемся и конкурентном мире.

Для образовательного процесса в Академии стандартизации, метрологии и сертификации (учебная) (АСМС) характерно применение современных информационных технологий, широкое использование сети Internet с ее богатейшими ресурсами и интенсивное развитие дистанционных форм обучения слушателей. Примером такой технологии является образовательная технология с применением электронного учебно-методического комплекса (ЭУМК) «Компетентный метролог». Технология постоянно совершенствуется. Внедряются новые методические разработки. Примером таких разработок в данной работе представлена идея применения чат-бота «Валера» на основе нейронной сети в модели качества инженерной деятельности для подготовки кадров высшей квалификации.

Материалы и методы

Чат-бот «Валера» на основе нейронной сети — это программа, способная взаимодействовать с пользователем и отвечать на его вопросы или предоставлять информацию. Нейронная сеть, используемая в чат-боте, обучается на большом объеме данных, чтобы научиться понимать вопросы и генерировать соответствующие ответы.

В 2023 г. в рамках проекта по развитию потенциала информационных технологий образовательного процесса АСМС и для формирования активной позиции среди инженеров и молодежи при поддержке Минпромторга России планируется разработка смарт-чат-бота с охватом следующих тем: техническое регулирование и стандартизация в инженерной деятельности, изобретательство и рационализация, построение системы менеджмента инженерного администрирования.

База данных по диссертациям на соискание ученой степени в нейросети и чат-боте является важным инструментом для исследования и развития в области искусственного интеллекта. Эта база данных содержит информацию о диссертациях, написанных в данной области, и предоставляет доступ к результатам исследований, проведенных в нейросетях и чат-ботах.

База данных позволяет исследователям и специалистам получить доступ к актуальным исследованиям, проведенным другими учеными, и использовать эти знания для своих собственных исследований. Она также может быть использована для анализа тенденций и развития в данной области, что помогает определить направления будущих исследований.

Кроме того, база данных может быть полезна для обучения студентов и специалистов в области нейросетей и чат-ботов. Они могут изучать результаты исследований, анализировать методы и подходы, используемые в диссертациях, и применять их в своей работе.

В целом база данных по диссертациям на соискание ученой степени в нейросети и чат-боте играет важную роль в развитии искусственного интеллекта. Она предоставляет доступ к актуальным исследованиям, способствует обмену знаниями и опытом и помогает специалистам и исследователям достичь новых высот в данной области.

Алгоритм работы системы

Порядок взаимодействия аспирантов специальности 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» с нейросетью и чат-ботом может быть следующим:

1. Исследование и анализ предметной области: аспиранты могут использовать нейросеть и чат-бот для изучения основных концепций, технологий и методов, связанных с подвижным составом железных дорог, тягой поездов и электрификацией. Нейросеть может помочь в анализе большого объема научных статей, публикаций и диссертаций в этой области, а чат-бот может отвечать на вопросы аспирантов и помогать им в поиске нужной информации.

2. Проведение исследований: аспиранты могут использовать нейросеть для разработки моделей и алгоритмов, связанных с подвижным составом железных дорог, тягой поездов и электрификацией. Нейросеть может быть обучена на основе имеющихся данных и использоваться для прогнозирования, оптимизации и управления системами железнодорожного транспорта. Чат-бот может быть использован для взаимодействия с нейросетью, задавая вопросы и получая ответы о моделях и алгоритмах, а также о результатах исследований.

3. Обмен опытом и знаниями: аспиранты могут использовать нейросеть и чат-бот для обмена опытом и знаниями с другими исследователями и специалистами в области подвижного состава железных дорог, тяги поездов и электрификации.

Нейросеть может быть использована для анализа и обобщения результатов исследований, а чат-бот может служить платформой для обсуждения и обмена идеями.

4. Обучение студентов: аспиранты могут использовать нейросеть и чат-бот для обучения студентов в области подвижного состава железных дорог, тяги поездов и электрификации. Нейросеть может быть использована для демонстрации примеров, решения задач и проведения практических занятий, а чат-бот может быть использован для ответов на вопросы студентов и помощи в выполнении заданий.

В целом использование нейросети и чат-бота позволяет аспирантам специальности 05.22.07 взаимодействовать с актуальными исследованиями, проводить свои собственные исследования, обмениваться опытом и знаниями с другими специалистами, а также обучать студентов. Это помогает развитию искусственного интеллекта в области подвижного состава железных дорог, тяги поездов и электрификации.

Реализация на практике

Примером положительного опыта применения идей и подходов к созданию нейронной сети для чат-бота «Валера» и его методических основ в системе дополнительного профессионального образования инженеров является электронный учебно-методический комплекс «Компетентный метролог».

ЭУМК «Компетентный метролог» представляет собой программный продукт, интегрированный в виртуальную образовательную среду Moodle, расположенную на портале <http://moodle.asms-vrn.ru>, и содержащий следующие функциональные блоки:

1. Теоретическая часть, состоящая из следующих разделов: законодательная метрология, прикладная метрология, организационно-техническая поддержка метрологического обеспечения

действующего производства, метрологическое обеспечение разработки, производства и испытаний продукции, организация работы метрологической службы.

2. Практическая часть, представленная виртуальными тренажерными комплексами, имитирующими процессы поверки различных средств измерений, удаленными лабораторными работами и практическими заданиями, инструментами виртуального общения.

К ЭУМК «Компетентный метролог» сегодня подключены метрологические службы предприятий и вузы (ПАО «НЛМК», г. Липецк, ПАО «ВАСО», г. Воронеж, ФГБОУ ВО «ВГУИТ», г. Воронеж, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И. С. Тургенева», г. Орел).

Выводы

На современном этапе актуальность подготовки кадров высшей квалификации становится все более важной. Работники, обладающие глубокими знаниями и навыками в своей области, могут стать ценными активами для компаний и организаций, помогая им достичь успеха в быстро меняющемся и конкурентном мире.

База данных по диссертациям на соискание ученой степени в нейросети и чат-боте является важным инструментом для исследования и развития в области искусственного интеллекта. Эта база данных содержит информацию о диссертациях, написанных в данной области, и предоставляет доступ к результатам исследований, проведенных в нейросетях и чат-ботах.

База данных позволяет исследователям и специалистам получить доступ к актуальным исследованиям, проведенным другими учеными, и использовать эти знания для своих собственных исследований. Она также может быть использована для анализа тенденций и развития в данной области, что помогает определить направления будущих исследований.

Кроме того, база данных может быть полезна для обучения студентов и специалистов в области нейросетей и чат-ботов. Они могут изучать результаты исследований, анализировать методы и подходы, используемые в диссертациях, и применять их в своей работе.

В целом использование нейросети и чат-бота позволяет аспирантам специальности 05.22.07 взаимодействовать с актуальными исследованиями, проводить свои собственные исследования, обмениваться опытом и знаниями с другими специалистами, а также обучать студентов. Это помогает развитию искусственного интеллекта в области подвижного состава железных дорог, тяги поездов и электрификации.

Положительный опыт применения идей и подходов к созданию нейронной сети для чат-бота «Валера» и его методических основ в системе дополнительного профессионального образования инженеров реализован в электронном учебно-методическом комплексе «Компетентный метролог».

ЭУМК «Компетентный метролог» представляет собой программный продукт, интегрированный в виртуальную образовательную среду Moodle, расположенную на портале <http://moodle.asms-vrn.ru>.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории цифровых средств обучения Воронежского филиала Академии стандартизации, метрологии и сертификации за помощь в работе.

Библиографический список

1. Андреев А. Л. Социология техники / А. Л. Андреев, П. А. Бутырин, В. Г. Горохов. — М.: Альфа, 2009. — 288 с.
2. Некрасова Н. А. Философия техники: учебник / Н. А. Некрасова, С. И. Некрасов. — М.: МИИТ, 2010. — 164 с. Глава 2. Инженерно-техническая деятельность: сущность и явление.
3. Андрончев И. К. Системная среда качества линейного предприятия железной дороги / И. К. Андрончев, А. И. Липатов, Н. Ф. Лукин. — Самара: СамГУПС, 2010. — 270 с.
4. Андрончев И. К. Концепция развития науки, образования и технологий Самарской области на базе междисциплинарного научно-образовательного комплекса / И. К. Андрончев. — Самара: Самарский научный центр РАН, 2016. — 85 с.
5. Кугель С. А. Молодые инженеры. Социологические проблемы инженерной деятельности / С. А. Кугель, О. М. Никандров. — М.: Мысль, 2006. — 208 с.
6. Литвинов Б. В. Основы инженерной деятельности / Б. В. Литвинов. — М.: Машиностроение, 2005. — 288 с.

Дата поступления: 04.10.2023

Решение о публикации: 17.11.2023

Контактная информация:

АНДРОНЧЕВ Иван Константинович — д-р техн. наук, проф.; andronchev.ik@asms.ru

СОЛЯНИК Анатолий Иванович — д-р техн. наук, проф.; solyanik.ai@asms.ru

Neural Network and Chatbot “Valera” for Advanced Specialist Training

I. K. Andronchev, A. I. Solyanik

Academy of Standardization, Metrology, and Certification, 90, Building 1, Volgogradsky Ave., Moscow, 109443, Russian Federation, 109443

For citation: Andronchev I. K., Solyanik A. I. Neural Network and Chatbot “Valera” for Advanced Specialist Training // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 1033–1038. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-1033-1038

Summary

Purpose: To address the issue of linking education and industry, through the model of the quality of engineering activities in additional professional education for engineers in the preparation of highly qualified personnel. To demonstrate the feasibility of using a neural network to develop methodological foundations for the preparation of highly qualified personnel. **Methods:** A model for the learning process has been proposed, utilizing a neural network and the chatbot “Valera” for the preparation of highly qualified personnel. **Results:** An example of successful experience in applying the electronic educational and methodological complex “Competent Metrologist” and its methodological foundations in the system of additional professional education for engineers and the preparation of highly qualified personnel is provided. **Practical significance:** The necessity of using a neural network in the process of personnel training is demonstrated. Positive experience in implementing ideas and approaches to creating a neural network for the chatbot “Valera” and its methodological foundations in the system of additional professional education for engineers has been realized in the electronic educational and methodological complex “Competent Metrologist”. The proposed approaches to education can be recommended for practical implementation.

Keywords: Neural network, chatbot, model, quality, engineering activities, additional professional education, preparation of highly qualified personnel.

References

1. Andreev A. L., Butyrin P. A., Gorokhov V. G. *Sotsiologiya tekhniki* [Sociology of technology]. Moscow: Al'fa Publ., 2009, 288 p. (In Russian)
2. Nekrasova N. A., Nekrasov S. I. *Filosofiya tekhniki: uchebnik. Glava 2. Inzhenerno-tekhnicheskaya deyatel'nost': sushchnost' i yavlenie* [Philosophy of technology: textbook. Chapter 2. Engineering and technical activities: essence and phenomenon.]. Moscow: MIIT Publ., 2010, 164 p. (In Russian)
3. Andronchev I. K., Lipatov A. I., Lukin N. F. *Sistemnaya sreda kachestva lineynogo predpriyatiya zheleznoy dorogi* [System environment of quality of a linear railway enterprise]. Samara: SamGUPS Publ., 2010, 270 p. (In Russian)
4. Andronchev I. K. *Kontseptsiya razvitiya nauki, obrazovaniya i tekhnologii Samarskoy oblasti na baze mezhdisiplinarnogo nauchno-obrazovatel'nogo kompleksa* [Concept of development of science, education and technology in the Samara region on the basis of an interdisciplinary scientific and educational complex]. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2016, 85 p. (In Russian)
5. Kugel' S. A., Nikandrov O. M. *Molodye inzheneriy. Sotsiologicheskie problemy inzhenernoy deyatel'nosti* [Young engineers. Sociological problems of engineering activity]. Moscow: Mysl' Publ., 2006, 208 p. (In Russian)
6. Litvinov B. V. *Osnovy inzhenernoy deyatel'nosti* [Fundamentals of engineering activities]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005, 288 p. (In Russian)

Received: October 04, 2023

Accepted: November 17, 2023

Author's information:

Ivan K. ANDRONCHEV — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; andronchev.ik@asms.ru

Anatoly I. SOLYANIK — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; solynik.ai@asms.ru