

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 21, выпуск 2, 2024

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

Учредитель

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

Издатель

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

Адрес учредителя

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

Адрес издателя

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

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

Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

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

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется

Индекс подлинки 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, профес-
сор, 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 железнодорож-
ный профессионально-технический колледж, Чжэн-
чжоу, 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 универси-
тет, Ташкент, Республика Узбекистан

Скотникова Маргарита Александровна, д-р техн.
наук, профессор, СПбПУ, Высшая школа машинострое-
ния, 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, профес-
сор, 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, профес-
сор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Фото на обложке предоставлено пресс-службой ФГБОУ ВО ПГУПС.

Подписано в печать с оригинал-макета 25.06.2024
Формат 52 x 72, 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 38,65.
Тираж 200 экз. Заказ 3061. Цена свободная.

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

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2024

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY,
volume 21, issue 2, 2024

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

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport
University

Publisher

Media Service LLC under contract № ЭА00271, 19.12.2023

Founder's address

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

Publisher's address

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

Mass media registration certificate number

П И N Ф C 2-7499 dd. 06.04.2005

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

The journal is registered

in the Russian Science Citation Index (RSCI)

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

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

The journal has the Peer-review division

The journal is distributed

Index Direct Mail Agency «Kniga-Service»: 33315

JOURNAL STAFF

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

- Т. А. Белаш, А. В. Кузнецов, В. Б. Мартиров**
Вклад архитекторов и инженеров-строителей
Петербургского университета путей сообщения в формирование транспортной
и городской инфраструктуры БАМа 311
- Л. Н. Парамонова**
Пути повышения эффективности очистки сточных вод 324
- Ю. А. Канцибер, А. Б. Пономарев, В. И. Штыков**
Оптимизация гидрологических расчетов систем очистки
поверхностного и дренажного стока воды 332
- А. А. Кочурова, Д. В. Зенченкова**
Особенности объемно-планировочных решений стационарных зданий цирков 345
- М. Д. Д. Алсултан, М. В. Шевлюгин**
Особенности построения и функционирования устройств
генерации электроэнергии в южной части Ирака 359
- Ю. Н. Канонин, О. И. Тихомиров**
Перспективы применения промышленных экзоскелетов
на железнодорожном транспорте 370
- Р. А. Майер, Г. Д. Якимов, Н. Н. Шангина, С. А. Самойлов**
Применение бентонитовой глины в качестве гидроизоляционного материала 380
- Е. И. Верех-Белоусова, А. В. Харламова**
Перспектива переработки отвальной породы угольных шахт
с последующим применением в строительстве 391

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

- Н. А. Медведева, В. С. Шварцфельд**
Многокритериальный подход к отбору вариантов создания сети железных дорог 398
- А. В. Романов, А. А. Киселев, А. А. Мирошник, М. В. Бушуев**
Результаты оценки силового воздействия тяжеловесных и длиннооставных
грузовых поездов на железнодорожный путь различными методами измерений 409
- А. А. Махонько, Ю. Г. Лазарев, А. А. Антонюк**
Структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга
инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал
в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр»
в г. Санкт-Петербурге. Часть 1 421
- Н. С. Бушуев, Д. О. Шульман**
О грузоперевозках на существующем главном ходу Октябрьской железной дороги
после ввода в эксплуатацию ВСМ Москва — Санкт-Петербург 432
- В. А. Черняева, Е. И. Шехтман, Е. В. Черняев, А. И. Иванов**
Собственные напряжения в рельсах, возникающие вследствие эксплуатации
железнодорожного пути с отступлениями по его содержанию 440

В. Н. Смирнов, Е. Е. Луковников Влияние параметров мостовых сооружений высокоскоростных железнодорожных магистралей на динамические свойства системы «мост — бесстыковой путь»	449
А. А. Сокольников, А. Н. Коньков, Ю. А. Филонов, Е. Г. Козин Математическое моделирование термодинамических процессов в вентиляционных шахтах метрополитена	457
Д. И. Фесак, Н. В. Давыдов, Д. А. Колобов, А. А. Федосеенко Программный комплекс для дифференциальной оценки риска здоровью населения от воздействия шума железнодорожного и автомобильного транспорта	470
А. Ф. Колос, В. А. Черняева, О. В. Максимов Оценка ущерба, наносимого загрязняющими веществами от выхлопных газов транспортных средств при реконструкции автомобильной дороги	480
В. Е. Козловский, И. М. Смирнов Об элементных фундаментах опор высоковольтных линий	489
А. А. Свечников Аккумулирование тепловой энергии масла и охлаждающей жидкости дизельного двигателя маневрового тепловоза	498
М. Ю. Хажеева, Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов, В. А. Кручек Исследование существующих методов сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей локомотива	508
П. В. Герасименко Сравнение годовых грузооборотов железнодорожного и автомобильного транспорта РФ: моделирование, верификация, точечный и интервальный прогноз	517

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

А. В. Татаренко, Е. В. Казакевич, А. А. Привалов, С. А. Лопатин Вопросы организации «умного поезда милосердия»	525
--	-----

CONTENTS

→ GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

- T. A. Belash, A. V. Kuznetsov, V. B. Martirov**
The contribution of architects and civil engineers
of the Petersburg University of Railways
to the formation of the transport and urban infrastructure of BAM 311
- L. N. Paramonova**
Ways to Improve the Efficiency of Wastewater Treatment..... 324
- Ju. A. Kanziber, A. B. Ponomarev, V. I. Shtykov**
Optimization of hydrological calculations for surface and drainage
runoff treatment systems 332
- A. A. Kochurova, D. V. Zenchenkova**
Features of space-planning solutions for stationary circus buildings..... 345
- M. J. J. Alsultan, M. V. Shevlyugin**
Features of construction and operation of electric power generation devices
in the southern part of Iraq 359
- Yu. N. Kanonin, O. I. Tikhomirov**
Prospects for the use of industrial exoskeletons in railway transport
as personal protective equipment 370
- R. A. Mayer, G. D. Yakimov, N. N. Shangina, S. A. Samoilov**
Use of bentonite clay as waterproofing material 380
- E. I. Verekh-Belousova, A. V. Kharlamova**
The prospect of processing waste rock from coal mines
with subsequent use in construction 391

→ PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM

- N. A. Medvedeva, V. S. Shvartcfeld**
A multi-criteria approach to the selection of options for creating a railway network 398
- A. V. Romanov, A. A. Kiselyov, A. A. Miroshnik, M. V. Bushuev**
The results of the assessment of the force effect of heavy and long-component
freight trains on the railway track by various measurement methods 409
- A. A. Makhonko, Y. G. Lazarev, A. A. Antonyuk**
Structural approach to assessing the performance of the monitoring system
of engineering structures of the cable-stayed bridge over the Petrovsky Canal
in the construction of the western speed diameter highway in St. Petersburg. Part 1 421
- N. S. Bushuev, D. O. Shulman**
About cargo traffic on the main route of Oktyabrskaya Railway
after construction high-speed railway Moscow — St. Petersburg 432
- V. A. Chernyaeva, E. I. Shehtman, E. V. Cherniaev, A. I. Ivanov**
Self-stresses in the rails arising as a result of the operation
of the railway track with deviations in its content..... 440

V. N. Smirnov, E. E. Lukovnikov The influence of the parameters of bridge structures of high-speed railways on the dynamic properties of the bridge-freewaysystem.....	449
A. A. Sokornov, A. N. Konkov, Yu. A. Filonov, E. G. Kozin Mathematical modeling of thermodynamic processes in subway ventilation shafts	457
D. I. Fesak, N. V. Davydov, D. A. Kolobov, A. A. Fedoseenko A software package for differential assessment of the public health risk from exposure to noise from rail and road transport	470
V. A. Chernyaeva, E. I. Shehtman, E. V. Cherniaev, A. I. Ivanov Self-stresses in the rails arising as a result of the operation of the railway track with deviations in its content	480
V. E. Kozlovskii, I. M. Smirnov About the elemental foundations of the supports of high-voltage lines	489
A. A. Svechnikov Accumulation of thermal energy of oil and coolant of a diesel engine of a shunting diesel locomotive	498
M. Yu. Khazheeva, E. Yu. Dulskiy, P. Yu. Ivanov, V. A. Kruchek Research of existing methods for drying wetted insulation of traction motors	508
P. V. Gerasimenko Comparison of annual railway freight turnover and automobile transport of the Russian Federation: modeling, verification, point and interval forecast.....	517

→ HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

A. V. Tatarenko, E. V. Kazakevich, A. A. Privalov, S. A. Lopatin Issues related to the organization of the "smart mercy train"	525
--	-----



УДК 69:001.5:69.007:69.032

Вклад архитекторов и инженеров-строителей Петербургского университета путей сообщения в формирование транспортной и городской инфраструктуры БАМа

Т. А. Белаш¹, А. В. Кузнецов², В. Б. Мартиров²

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

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

Для цитирования: Белаш Т. А., Кузнецов А. В., Мартиров В. Б. Вклад архитекторов и инженеров-строителей Санкт-Петербургского университета путей сообщения в формирование транспортной и городской инфраструктуры БАМа // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 311–323. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-311-323

Аннотация

Цель: проследить вклад преподавателей и сотрудников кафедр «Здания», «Архитектура и производственная эстетика» в развитие транспортной и городской инфраструктуры Байкало-Амурской магистрали. **Материалы и методы:** рассмотрены архивные документы. Выполнен системный анализ и определена хронологическая последовательность выполнения инфраструктурных проектов. **Результаты:** на основе архивных данных атрибутированы населенные пункты и железнодорожные станции, на которых впервые применялись разработки сотрудников кафедры, а силами стройотрядовцев университета возводились инфраструктурные объекты. Впервые опубликованы фотоматериалы отдельных проектов и производственных процессов. Представлен ретроспективный взгляд на становление и развитие БАМа. Проанализирована проверка временем эксплуатационных характеристик возведенных зданий, заложенных в результате научно-проектных разработок кафедр «Здания», «Архитектуры и производственной эстетики». **Практическая значимость:** сохранение памяти и связи между поколениями. Собранные авторским коллективом материалы личного происхождения позволяют расширить границы исследований, связанные с изучением исторической памяти о позднесоветском периоде и реконструировать ряд событий при описании локальных идентичностей персоналий в контексте архитектурно-строительной деятельности сотрудников ПГУПС.

Ключевые слова: Байкало-Амурская магистраль, транспортная инфраструктура, здания, железнодорожные вокзалы, сейсмостойкое строительство, стройотряды.

Введение

Развитие транспортной системы является одним из стратегических направлений многовекторной политики Российской Федерации, в котором особое место отводится Байкало-Амурской железной дороге. Строительство

было начато еще в конце 30-х годов XX века и было прервано событиями Великой Отечественной войны. Только в 70-х годах прошлого века было принято решение продолжить строительство железной дороги. В последующие трудные 90-е годы XX столетия этой

магистрали практически не уделяли должного внимания: приостановлено развитие многих инфраструктурных объектов, входящих в состав транспортной отрасли. Ее строительство продолжалось в течение многих лет с привлечением большого количества людей и материальных средств. Возрождение магистрали началось только в XXI веке. В этом году этой важнейшей магистрали страны исполняется 50 лет, в связи с чем президент России В. В. Путин подписал соответствующий приказ о праздновании юбилея БАМа с момента начала строительства [1]. Эта дорога имеет важное стратегическое значение для России, соединяя европейскую часть страны с азиатской, протянувшись примерно на 4300 км от Тайшета до Советской гавани. В наше время Байкало-Амурская магистраль продолжает развиваться и модернизироваться, что позволяет обеспечить регионы Восточной Сибири и Дальнего Востока новыми инвестиционными проектами, созданием рабочих мест и сформировать внутренний спрос на продукцию предприятий различных отраслей.

Методы исследования

Байкало-Амурская магистраль проектировалась и возводилась с учетом различных факторов воздействий и особенностей территории. Были проведены различные изыскания, учитывающие рельеф местности, неоднородность инженерно-геологических условий строительства, сейсмичность района. Определяющую роль на всех этапах проектирования и возведения инфраструктурных объектов выполняли разработанные для этих целей условия строительства с учетом сложных природно-климатических воздействий и их особенностей, включающие обширные площади криолитозоны, сложный

рельеф местности, высокую сейсмоактивность, экстремальные температуры и т. д.

Многие известные ученые и специалисты сомневались в успешном решении сложных инженерных проблем на этой магистрали, так как отсутствовал необходимый отечественный и зарубежный опыт строительства в таких условиях. Тем не менее эта задача была успешно решена благодаря совместной работе профильных министерств, ведомств и многих учреждений строительного комплекса СССР в кооперации с учебными заведениями Ленинграда, Москвы, Новосибирска, Красноярска и других городов [2, 3, 4]. Участие кафедры «Здания» обеспечивало проектно-исследовательское бюро под руководством В. А. Менчева, выполнявшее большой объем работ по организации, планированию строительных процессов в сложных климатических условиях строительства (рис. 1).

При этом следует отметить роль ЛИИЖТа (ФГБОУ ВО ПГУПС) и его сотрудников, аспирантов, студентов и инженерного персонала многих кафедр в становлении БАМа, где особое место занимали кафедры «Архитектура и производственная эстетика» и «Здания», возглавляемые соответственно их заведующими: д. арх., профессором И. Г. Явейном и к.т.н., доц. Н. И. Аджимамудяном. После смерти руководителей эти структурные подразделения были реорганизованы в единую кафедру «Здания» [5]. Но, несмотря на такие изменения, объединенный коллектив кафедры в лице канд. арх., доц. И. М. Богданова, к.т.н., доц. Ю. М. Макова, к.т.н. А. П. Кушневая и многих других сотрудников продолжал активно участвовать в решении сложных архитектурно-строительных проблем БАМа. Байкало-Амурская магистраль имеет не только стратегическое значение



Рис. 1. Возведение жилого здания с использованием рекомендаций кафедры «Здания» в г. Севербайкальске (МПС ЛИИЖТ): *а* — нулевой цикл; *б* — надземные конструкции панельного здания серии 122; *в* — монтаж стеновых панелей здания серии 122 (источник: фотографии из архива кафедры «Здания» ЛИИЖТ и личного архива Т. А. Белаш)

для страны, но она также является драйвером развития огромного региона. Это дает возможность появления новых городов и населенных пунктов. Как известно, город начинается с вокзала. Он является его визитной карточкой, именно поэтому в 1976 году был проведен Всесоюзный конкурс на проекты вокзалов для Байкало-Амурской магистрали. Командой архитекторов под руководством И. Г. Явейна разрабатывается целая серия проектов вокзалов для БАМа которые учитывали необыкновенно красивые природно-ландшафтные особенности осваиваемого региона страны и возможность применения местных строительных материалов. Проекты получили две вторые премии и две третьи премии [6]. Примеры некоторых эскизных проектов д. арх., профессора И. Г. Явейна представлены на рис. 2.

К сожалению, в связи с уходом из жизни И. Г. Явейна (1903–1980) не удалось осуществить полное внедрение предлагаемых проектных решений вокзалов на линии БАМа. Однако архитектурные идеи этого

известного архитектора в области проектирования железнодорожных зданий нашли свое воплощение в других проектах железнодорожных зданий на территории СССР. Так было установлено, что здания транспортного назначения должны иметь простые и компактные формы, сохранять симметрию в плане, что имеет особое значение в условиях высокой сейсмичности при разработке объемно-планировочных решений и фасадов. Им также рекомендовалось по возможности упрощать объемно-планировочную структуру и архитектурный облик здания. Это достигалось путем исключения ризалитов, углов, надстроек и других компонентов обогащения пластики фасадов. В отдельных случаях, когда функционально компоновка помещений проектируемого здания предполагала сложную в плане форму и значительную протяженность, было найдено инженерное решение, позволяющее обеспечить требуемую сейсмостойкость здания путем разделения антисейсмическими швами в виде отсеков простой формы.

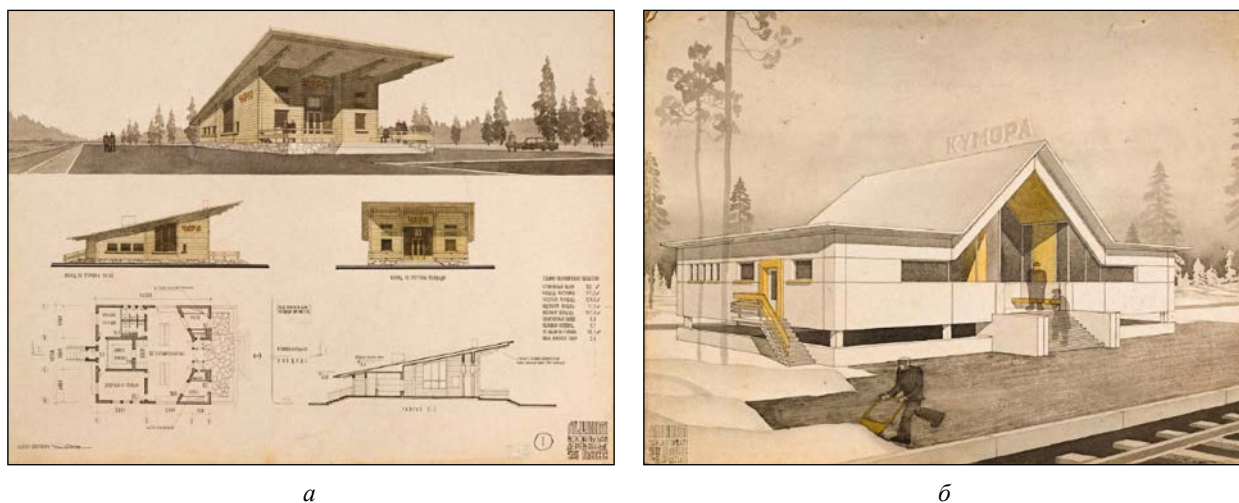


Рис. 2. Проектные решения железнодорожных вокзалов Байкало-Амурской магистрали, разработанные авторским коллективом кафедры «Архитектура и производственная эстетика» под руководством И. Г. Явейна: *а* — вокзал на 25 пассажиров из дерева. Перспектива, фасад со стороны путей, фасад со стороны площади, план, разрез. Чертеж 580 x 440 мм; *б* — ст. Кумора. Вокзал на 50 пассажиров на вечной мерзлоте. Перспектива. Чертеж 840 x 640 мм (Копии проектов, выполненных на кафедре «Архитектура и производственная эстетика» в оцифрованном виде заимствованы из электронной книги о творчестве И. Г. Явейна.

Источник: <https://igoryawein.ru/>)

Результаты и обсуждения

При участии канд. арх., доцента кафедры «Здания» И. М. Богданова и плотном взаимодействии с Ленгипротрансом были разработаны рекомендации по проектированию железнодорожных зданий в виде единого комплекса, в котором размещены различные службы, обеспечивающие непрерывную работу транспортных узлов [4]. Для станции Усть-Нюкжа, в качестве альтернативного варианта, было предложено оригинальное решение объединенного здания, в состав которого входили различные железнодорожные службы с использованием принципа блокирования [7]. Реконструированная к.т.н. А. В. Кузнецовым графическая часть этого проекта на основе архивных материалов представлена на рис. 3 в виде обобщенной схемы функционального зонирования.

Согласно проектным предложениям, здание для нужд железной дороги являлось производственным и представляло собой единый ремонтно-эксплуатационный блок-корпус, в котором достаточно функционально объединены различные службы железнодорожной отрасли. Четкое зонирование и продуманная взаимосвязь помещений вкупе с кооперацией технологических процессов учитывало и такой фактор, как высокая сейсмичность района строительства. С учетом особенностей региона архитектором И. М. Богдановым было разработано объемно-планировочное решение производственного здания, которое вошло в основу принципа блокирования и помогло создать ряд однотипных отсеков. Это позволило реализовать весьма нетривиальный подход в области

проектирования промышленной архитектуры, а именно — выдвинуть средний отсек здания на 36,5 м, тем самым обеспечив необходимые условия для инсоляции остальных блок-корпусов, выделить площадку для отдыха и коммуникации в виде атриума с зимним садом. Использование такого приема в промышленной архитектуре позволило сократить на 12 % площадь застройки и оказалось экономичнее варианта с отдельным расположением производственных зданий с тем же функционалом и объемом.

В развитие предлагаемого принципа блокирования зданий был разработан

отдельный проект на станции Чара в виде объединенного здания производственных и технических железнодорожных служб (рис. 4).

В качестве исходных данных были приняты следующие значения: минимальная температура наружного воздуха минус 50 °С; продолжительность периода со среднесуточной температурой 0 °С более 200 суток; расчетная температура наружного воздуха для ограждающих конструкций в пределах от минус 46 °С до минус 48 °С; скоростной напор ветра — 350–450 Н/м²; грунты вечномерзлые; сейсмичность 9 баллов.

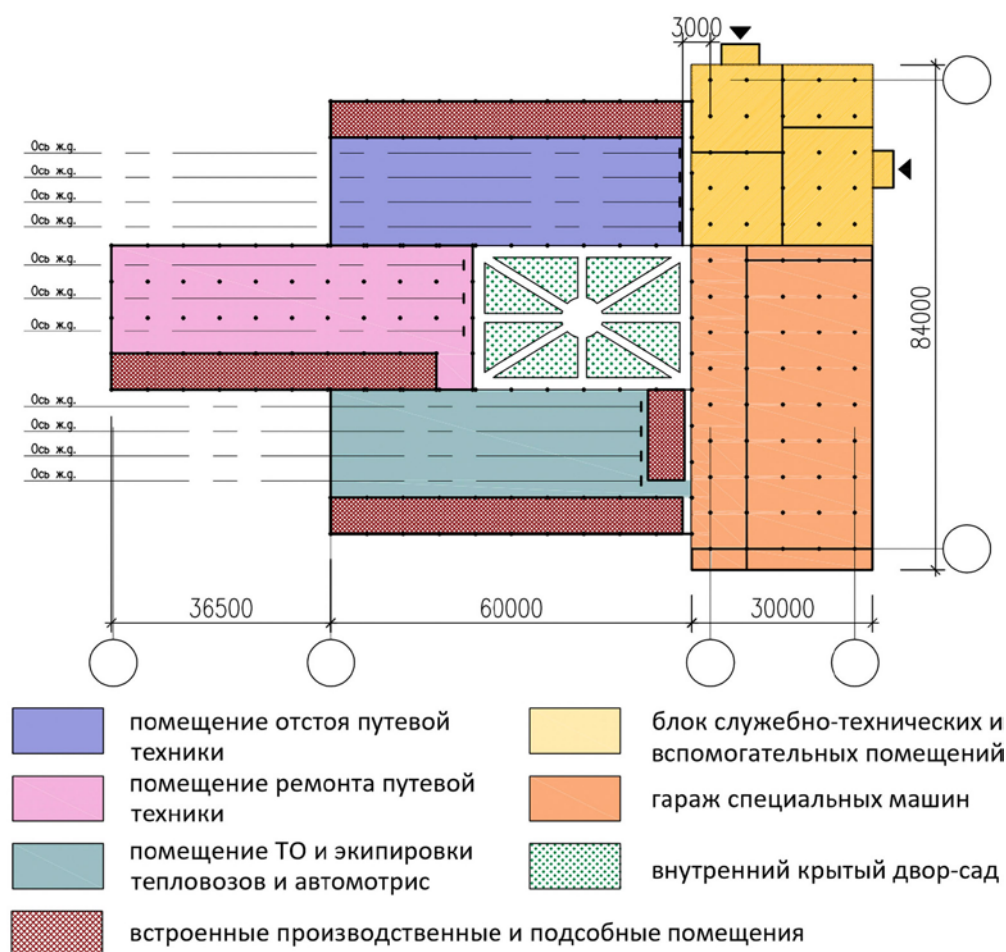


Рис. 3. Схема функционального зонирования объединенного здания различных железнодорожных служб на ст. Усть-Нюкжа Байкало-Амурской магистрали (арх. И. М. Богданов)

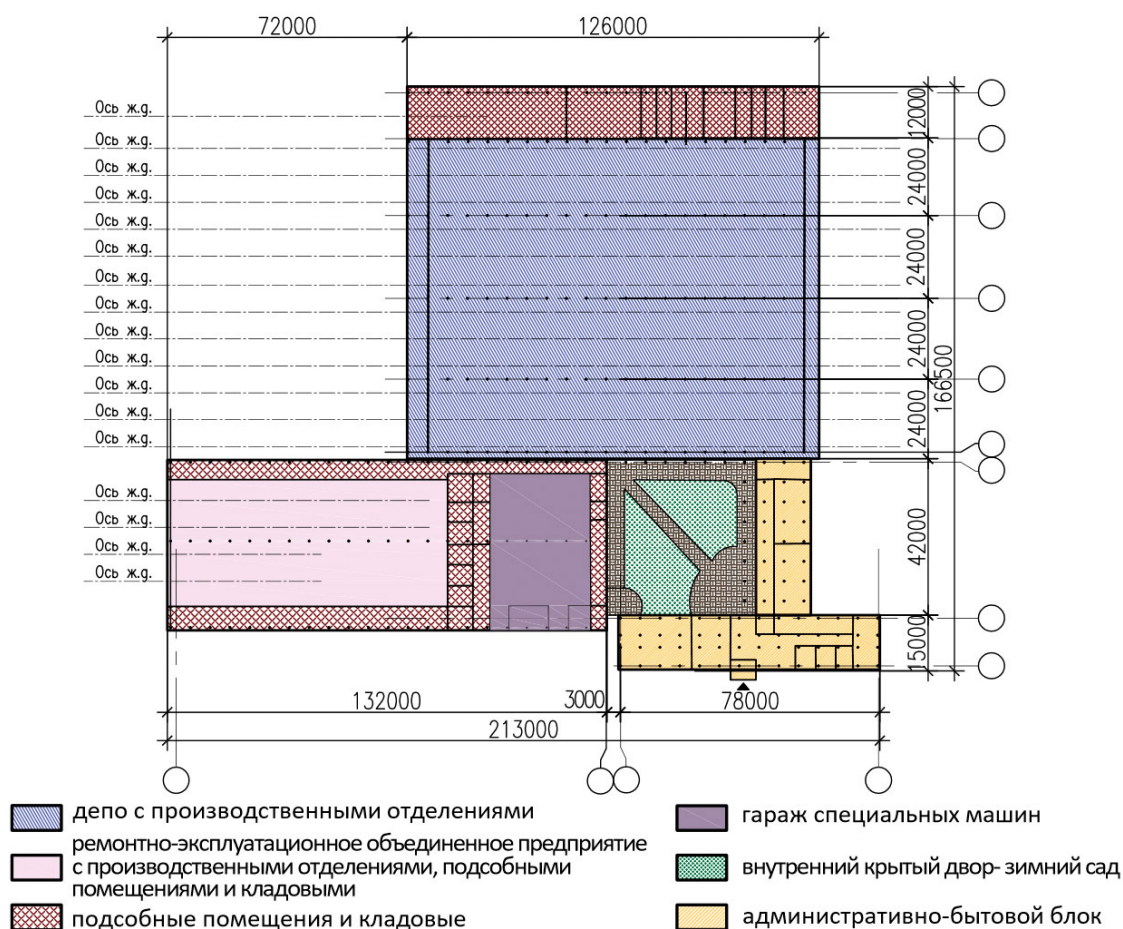


Рис. 4. Функциональная схема зонирования объединенного здания служб отделения дороги на ст. Чара Байкало-Амурской магистрали (арх. И. М. Богданов)

Проектными решениями рассматривались основные типы зданий, входящих в состав железнодорожной инфраструктуры: локомотивного депо, линейных подразделений ПЧ, ШЧ, ЭЧ и др. С учетом этих особенностей, сгруппированный состав объемно-планировочного решения включал в себя: ремонтно-эксплуатационное объединенное предприятие с производственными отделениями, подсобными помещениями и кладовыми; депо с производственными отделениями, подсобными помещениями и кладовыми; гараж спецмашин; внутренний двор — зимний сад; административно-бытовой блок.

Основной принцип такого рода объединения основан на функционально-технологических и социально-бытовых связях, возникающих в результате взаимодействия производственных и вспомогательных структурных подразделений, включая системы обслуживания работников предприятия: административно-технических, культурно-массовых, санитарно-гигиенических, медицинских служб; комплексами общественного питания и другими функционально-значимыми управленческими структурами. С подробным описанием объемно-планировочного решения можно ознакомиться в работе [7].

При разработке объемно-планировочных и конструктивных решений следует руководствоваться принятым принципом строительства в криолитозоне с учетом высокой сейсмичности района строительства [8]. С конца 70-х годов XX века на кафедре «Здания» начинаются исследования специальных конструкций сейсмозащиты в условиях вечной мерзлоты. В основе этих решений лежит принцип сейсмоизоляции, который впервые был сформулирован в работах д.т.н., профессора Т. А. Белаш [9, 10]. В последующем он был использован при обосновании проектных решений жилых зданий 122 серии в г. Северобайкальске. Практика

эксплуатации этих объектов уже в течение многих десятков лет показала их высокую надежность при землетрясениях [11]. В этот период кафедра «Здания» также активно взаимодействовала со специалистами ЛенЗНИИЭПа, ЦНИИСКА им. В. А. Кучеренко. Это плодотворное сотрудничество дало возможность развиваться целому научному направлению, которое явилось основой для создания научной школы кафедры «Здания» по сейсмостойкому строительству. Некоторые результаты проводимых кафедрой «Здания» исследований, представлены в трудах [12–23]. Одно из разработанных решений показано на рис. 5 [12].

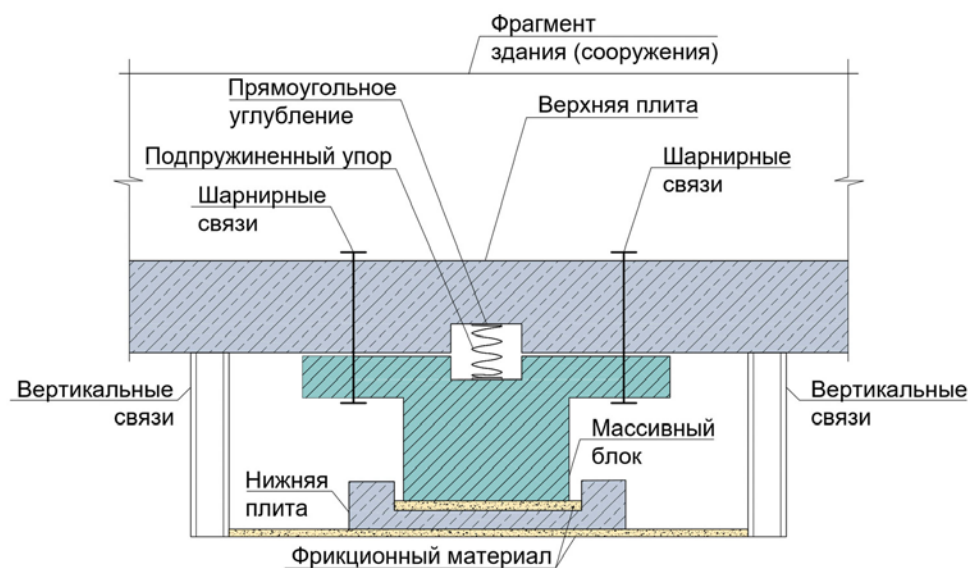


Рис. 5. Схема расположения фундамента сейсмостойкого здания (источник: личный архив Т. А. Белаш и [7, стр. 234, рис. 13.3]), изображение адаптировано А. В. Кузнецовым)

Следует упомянуть о многочисленных студенческих отрядах, в которых участвовали в том числе студенты специальности «Промышленное и гражданское строительство» под руководством преподавателей кафедры «Здания» — доцентов С. Я. Ткаченко и В. Б. Мартирова. В частности, в 1986 году

на БАМ выезжал студенческий строительный отряд «Восход», состоявший из студентов специальности «промышленное и гражданское строительство» факультета «Мосты и тоннели». Четыре бригады из трех учебных групп ПГС-308, 309, 310 (более 40 студентов) почти два месяца трудились на объектах поселка

Таксимо, выполняя различные строительные работы в СМП-694. Среди них — прокладка кабелей, возведение опалубок, бетонные и отделочные работы, причем эта деятельность засчитывалась студентам как производственная практика. На рис. 6, *а*, 6, *б* представлены результаты практической реализации по возведению входной группы с козырьком

здания школы (в настоящее время «Детско-юношеская спортивная школа Таксимо») силами студентов стройотряда «Восход» ЛИИЖТа в 1986 году. На рисунке 6, *в* представлен проект комплексного благоустройства территории перед школой, выполненный на месте доцентом В. Б. Мартировым, который был мастером отряда.

*а**б**в*

Рис. 6. Этапы реализации входной группы и элементов благоустройства территории перед зданием школы в поселке Таксимо: *а* — общий вид здания школы на ст. Таксимо; *б* — этап возведения входной группы по проекту В. Б. Мартирова; *в* — эскизный проект комплексного благоустройства территории перед школой в поселке Таксимо (источник: личный архив архитектора, доцента В. Б. Мартирова, работавшего на кафедре «Здания» ФГБОУ ВО ПГУПС с 1982 по 2019 год)

Заключение

Уникальный советский проект по освоению Восточной Сибири и Дальнего Востока способствовал формированию населенных пунктов вдоль Байкало-Амурской магистрали и не имел аналогов в градостроительной практике во всем мире. Представленный ретроспективный взгляд на развитие железнодорожной отрасли БАМа и опубликованные фотоматериалы показывают вклад ученых и сотрудников кафедр «Архитектура и производственная эстетика» и «Здания», работавших в Ленинградском институте инженеров железнодорожного транспорта, в создание институциональной экономики восточных регионов нашей страны.

В условиях комсомольской стройки построены реальные объекты, которые были возведены силами преподавателей и студенческих строительных отрядов, сформированных на базе ЛИИЖТа. В результате проведенного исследования атрибутированы реальные объекты, которые прошли испытания временем и служат во благо нашего общества по сей день.

Библиографический список

1. Указ Президента РФ от 03.03.2024 № 140 «О праздновании 50-летия начала строительства Байкало-Амурской магистрали» // Опубликован 03.03.2024 на официальном интернет-портале правовых актов. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202303030003?index=1>.
2. Байкалов Н. С. Формирование социальной инфраструктуры поселений Бурятского участка БАМа (1974–1989 гг.): специальность 07.00.02 «Отечественная история»: дис. ... канд. ист. наук. Улан-Удэ, 2005. 225 с.
3. Западный участок БАМа: прошлое, настоящее и будущее. Очерки истории, географии, культуры к 50-летию Байкало-Амурской магистрали: коллективная монография / С. М. Алексеев, Н. С. Байкалов, Р. Ю. Зуляр и др. // Иркутск: Иркутский государственный университет, 2023. 367 с. ISBN 978-5-9624-2151-3. DOI: 10.26516/978-5-9624-2151-3. 2023.1-367.
4. Байкалов Н. С. Исторический опыт формирования и развития населенных пунктов в зоне Байкало-Амурской железнодорожной магистрали (1970-е–1990-е гг.): специальность 07.00.02 «Отечественная история»: дис. ... докт. ист. наук. Улан-Удэ, 2022. 555 с.
5. Белаш Т. А., Иванова Т. И., Мартиров В. Б. Школа строительного искусства: монография // Москва: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». УМЦ ЖДТ: электронная библиотека. 2015. 96 с. ISBN: 978-5-89035-860-8 [Электронный ресурс]. URL: <https://umczdt.ru/books/1198/225545/> (дата обращения 12.04.2024). Режим доступа: по подписке.
6. Архитектор Игорь Явейн: полный каталог проектов 1923–1980 / Автор-составитель, автор текстов и аннотаций Олег Явейн. Екатеринбург: TATLIN, 2020. 479 с.: ISBN 978-5-00075-222-7.
7. Белаш Т. А., Уздин А. М. Железнодорожные здания для районов с особыми природно-климатическими условиями и техногенными воздействиями / Учебник. Москва: учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2007. 372 с. ISBN 978-5-89035-427-3.
8. Харитонов В. А. Сейсмостойкое строительство на вечномёрзлых грунтах // Л.: Стройиздат, Лен. отд., 1980. 79 с.
9. Савинов О. А., Сандович Т. А. (Белаш). О некоторых особенностях применения систем сейсмоизоляции зданий и сооружений // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Сборник научных трудов. 1982. Т. 161. С. 26–33.

10. Белаш Т.А. Нетрадиционные способы сейсмозащиты транспортных зданий и сооружений: монография // Москва: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. 175 с. ISBN 978-5-89035-981-0 [Электронный ресурс]. URL: <https://umczdt.ru/books/1198/18752/> (дата обращения 12.04.2024). Режим доступа: по подписке.
11. Белаш Т. А., Зенченкова Д. В. Сейсмостойкие конструкции крупнопанельных зданий // Academia. Архитектура и строительство. 2019. № 3. С. 130–137. DOI 10.22337/2077–9038-2019-3-130-137
12. Фундамент сейсмостойкого здания: пат. на полезную модель № 156644 U1 Российская Федерация № 2015111380/03 МПК E02D 27/34 / Т. А. Белаш, Д. А. Сергеев; заявл. 30.03.2015; опубл. 10.11.2015. Заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».
13. Калинин В. П. Байкало-Амурская железнодорожная магистраль, инженерно-геологическое и сейсмическое обеспечение ее строительства // Сеймотектоника и сейсмичность района строительства БАМ: сборник статей. Отв. ред. М. М. Одинцов / АН СССР, Междувед. совет по сейсмологии и сейсмостойкому стр-ву при Президиуме АН СССР, Ин-т земной коры СО АН СССР. М.: Наука, 1980. 203 с.
14. Сейсмическое микрорайонирование в условиях вечной мерзлоты / В. П. Солоненко, Н. Е. Зарубин, В. С. Гриценко и др. Отв. ред. чл.-кор. АН СССР В. П. Солоненко // АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т земной коры. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1975. 89 с.
15. Транспортные здания: Справочно-методическое пособие / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т транспорт. строительства. Под ред. Д. И. Федорова. М.: Транспорт, 1980. 296 с.
16. Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы / В. П. Солоненко, С. Д. Хилько, В. С. Хромовских и др. Отв. ред. член-корр. АН СССР В.П. Солоненко // АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т земной коры. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 303 с.
17. Рекомендации по объемно-планировочным и конструктивным решениям зданий транспортного назначения в условиях вечномерзлых грунтов и сеймики на БАМ / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т трансп. стр-ва. Москва: ЦНИИС, 1975. 44 с.
18. Белаш Т. А., Зенченкова Д. В. Сейсмостойкие конструкции крупнопанельных зданий // Academia. Архитектура и строительство, 2019. № 3. С. 130–137. DOI 10.22337/2077–9038-2019-3-130-137
19. 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. Series: Lecture Notes in Civil Engineering, 2019. Vol. 49 // Singapore: Springer, 2020. Vol. 1. P. 79-95. DOI 10.1007/978-981-15-0450-1_9
20. Белаш Т. А., Сергеев Д. А. О возможности использования высокого свайного ростверка в качестве элемента сейсмоизоляции для зданий, возводимых в районах вечной мерзлоты // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2015. № 4. С. 45–47.
21. Лабазанов Р. Р. Энергоэкономичные сейсмостойкие конструкции быстровозводимых малоэтажных зданий // Труды молодых ученых. СПб.: изд-во СПбГАСУ. 2001. С. 158.
22. Яшин Ю. Г. Приближенный метод расчета сейсмостойких крупнопанельных зданий с «сухими» стыками: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01. СПб., 1994. 222 с.
23. Belash T. A. Design peculiarities of foundation structures in permafrost and seismically active areas / Geotechnics Fundamentals and Applications in

Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations: Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, GFAC 2019, Saint Petersburg, 06–08 February, 2019. SPb.: Taylor & Francis Group, 2019. P. 36–43. DOI 10.1201/9780429058882-8.

Дата поступления: 17.04.2024

Решение о публикации: 30.05.2024

Контактная информация:

БЕЛАШ Татьяна Александровна — докт. техн.

наук, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы», советник РААСН; belashta@mail.ru

КУЗНЕЦОВ Анатолий Всеволодович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»; akuznetsov@pgups.ru

МАРТИРОВ Виктор Борисович — архитектор, доцент кафедры «Здания» (1982–2019); martirov@mail.ru

The contribution of architects and civil engineers of the Petersburg University of Railways to the formation of the transport and urban infrastructure of BAM

T. A. Belash¹, A. V. Kuznetsov², V. B. Martirov²

¹ JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, Moscow, 109428, Russia

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

For citation: Belash T. A., Kuznetsov A.V., Martirov V. B. The contribution of architects and civil engineers of the Petersburg University of Railways to the formation of the transport and urban infrastructure of BAM // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 311–323. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-311-323

Abstract

Purpose: to trace the contribution of scientists and staff of the departments of “Buildings”, “Architecture and industrial Aesthetics” to the development of transport and urban infrastructure of the Baikal-Amur mainline. **Materials and methods:** archival documents have been reviewed. A system analysis was performed and the chronological sequence of infrastructure projects was determined. **Results:** on the basis of archival data, settlements and railway stations were attributed, where the developments of the department’s staff were used for the first time, and infrastructure facilities were built by the university’s construction crews. For the first time, photographic materials of individual projects and production processes have been published. A retrospective look at the formation and development of BAM is presented. The time check of the operational characteristics of the erected buildings, laid down as a result of scientific and design developments of the departments of “Buildings”, “Architecture and industrial aesthetics” is analyzed. **The practical significance** of the article is in preserving memory and communication between generations. The materials of personal origin collected by the author’s team make it possible to expand the boundaries of research related to the study of historical memory of the late Soviet period and reconstruct a number of events when describing local identities of personalities in the context of architectural and construction activities of the staff of the PSUPS.

Keywords: Baikal-Amur mainline, transport infrastructure, buildings, railway stations, construction teams

References

1. Ukaz Prezidenta RF ot 03.03.2024 № 140 “O prazdnovanii 50-letiya nachala stroitel'stva Bajkalo-Amurskoj magistrali” // Opublikovan 03.03.2024 na oficial'nom internet-portale pravovy'x aktov.<http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202303030003?index=1>. (In Russian)
2. Bajkalov N. S. Formirovanie social'noj infrastruktury` poselenij Buryatskogo uchastka BAMA (1974–1989 gg.): special'nost` 07.00.02 “Otechestvennaya istoriya”: dis. ... kand. ist. nauk. Ulan-Ude`, 2005. 225 s. (In Russian)
3. Zapadny`j uchastok BAMA: proshloe, nastoyashhee i budushhee. Ocherki istorii, geografii, kul'tury` K 50-letiyu Bajkalo-Amurskoj magistrali: kollektivnaya monografiya / S. M. Alekseev, N. S. Bajkalov, R. Yu. Zulyar i dr. // Irkutsk: Irkutskij gosudarstvenny`j universitet, 2023. 367 s. ISBN 978-5-9624-2151-3. DOI 10.26516/978-5-9624-2151-3.2023.1-367. (In Russian)
4. Bajkalov N. S. Istoricheskij opyt` formirovaniya i razvitiya naselenny'x punktov v zone Bajkalo-Amurskoj zheleznodorozhnoj magistrali (1970-e–1990-e gg.): special'nost` 07.00.02 “Otechestvennaya istoriya”: dis. ... dok. ist. nauk. Ulan-Ude`, 2022. 555 s. (In Russian)
5. Belash T. A., Ivanova T. I., Martirov V. B. Shkola stroitel'nogo iskusstva: monografiya // Moskva: FGBOU “Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte”. UMCz ZhDT: e`lektronnaya biblioteka. 2015. 96 s. ISBN: 978-5-89035-860-8 [E`lektronny`j resurs]. URL: <https://umczdt.ru/books/1198/225545/> (data obrashheniya 12.04.2024). Rezhim dostupa: po podpiske. (In Russian)
6. Arhitekto Igor` Yavejn: polny`j katalog proektov 1923–1980 / Avtor-sostavitel`, avtor tekstov i annotacij Oleg Yavejn. Ekaterinburg: TATLIN, 2020. 479 s.: ISBN 978-5-00075-222-7. (In Russian)
7. Belash T. A., Uzdin A. M. Zheleznodorozhny`e zdaniya dlya rajonov s osoby`mi prirodno-klimaticheskimi usloviyami i texnogenny`mi vozdejstviyami. Uchebnik // Moskva: uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2007. 372 s. ISBN 978-5-89035-427-3. (In Russian)
8. Xaritonov V. A. Sejismostojkoe stroitel'stvo na vechnomerzly`x gruntax // L.: Strojizdat, Len. otd., 1980. 79 s. (In Russian)
9. Savinov O. A., Sandovich T. A. (Belash). O nekotory`x osobennostyax primeneniya sistem sejsmoizolyacii zdaniy i sooruzhenij // Izvestiya VNIIG im. B. E. Vedeneeva. Sbornik nauchny`x trudov. 1982. T. 161. S. 26–33. (In Russian)
10. Belash T.A. Netradicionny`e sposoby` sejsmozashhity` transportny`x zdaniy i sooruzhenij: monografiya // Moskva: FGBOU “Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte”, 2016. 175 s. ISBN 978-5-89035-981-0 [E`lektronny`j resurs]. URL: <https://umczdt.ru/books/1198/18752/> (data obrashheniya 12.04.2024). Rezhim dostupa: po podpiske. (In Russian)
11. Belash T. A., Zenchenkova D. V. Sejsmostojkie konstrukcii krupnopanel'ny`x zdaniy // Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. 2019. № 3. S. 130–137. DOI 10.22337/2077–9038-2019-3-130-137. (In Russian)
12. Fundament sejsmostojkogo zdaniya: pat. na poleznuyu model` № 156644 U1 Rossijskaya Federaciya № 2015111380/03 MPK E02D 27/34 / T. A. Belash, D. A. Sergeev; zayavl. 30.03.2015; opubl. 10.11.2015. Zayavitel`: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vy`sshego professional'nogo obrazovaniya “Peterburgskij gosudarstvenny`j universitet putej soobshheniya Imperatora Aleksandra I”. (In Russian)
13. Kalinichev V. P. Bajkalo-Amurskaya zheleznodorozhnaya magistral`, inzhenerno-geologicheskoe i sejsmicheskoe obespechenie ee stroitel'stva // Sejsmotektonika i sejsmichnost` rajona stroitel'stva BAM: sbornik statej. Otv. red. M. M. Odincov / AN SSSR, Mezhdoved. sovet po sejsmologii i sejsmostojkomu str-vu pri Prezidiume AN SSSR, In-t zemnoj kory` SO AN SSSR. Moskva: Nauka, 1980. 203 s. (In Russian)

14. Sejsmicheskoe mikrorajonirovanie v usloviyax vechnoj merzloty' / V. P. Solonenko, N. E. Zarubin, V. S. Gricenko i dr. Otv. red. chl.-kor. AN SSSR V. P. Solonenko // AN SSSR, Sib. otd-nie, In-t zemnoj kory'. Novosibirsk: Nauka, Sib. otd-nie, 1975. 89 s. (In Russian)
15. Transportny'e zdaniya: Spravochno-metodicheskoe posobie / Vsesoyuz. nauch.-issled. in-t transport. stroitel'stva. Pod red. D. I. Fedorova. M.: Transport, 1980. 296 s. (In Russian)
16. Sejsmicheskoe rajonirovanie Vostochnoj Sibiri i ego geologo-geofizicheskie osnovy' / V. P. Solonenko, S. D. Xil'ko, V. S. Xromovskix i dr. Otv. red. chlen-korr. AN SSSR V. P. Solonenko // AN SSSR. Sib. otd-nie. In-t zemnoj kory'. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1977. 303 s. (In Russian)
17. Rekomendacii po ob`emno-planirovochny`m i konstruktivny`m resheniyam zdaniy transportno naznacheniya v usloviyax vechnomerzly`x gruntov i sejsmiki na BAM / Vsesoyuz. nauch.-issled. in-t transp. str-va. Moskva: CzNIIS, 1975. 44 s. (In Russian)
18. Belash T. A., Zenchenkova D. V. Sejsmostojkie konstrukcii krupnopanel'ny`x zdaniy // Academia. Arhitektura i stroitel'stvo, 2019. № 3. S. 130–137. DOI 10.22337/2077–9038-2019-3-130-137. (In Russian)
19. 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 TRANS-OILCOLD. Series: Lecture Notes in Civil Engineering, 2019. Vol. 49 // Singapore: Springer, 2020. Vol. 1. P. 79-95. DOI 10.1007/978-981-15-0450-1_9.
20. Belash T. A., Sergeev D. A. O vozmozhnosti ispol'zovaniya vy`sokogo svajnogo rostverka v kachestve e`lementa sejsmoizolyacii dlya zdaniy, vozvodimy`x v rajonax vechnoj merzloty' // Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij. 2015. № 4. S. 45–47. (In Russian)
21. Labazanov R. R. E`nergoe`konomichny`e sejsmostojkie konstrukcii by`strovzvodimy`x maloe`tazhny`x zdaniy // Trudy` molody`x ucheny`x. S.-Peterburg.: izd-vo SPbGASU. 2001. S. 158. (In Russian)
22. Yashinin Yu. G. Priblizhenny`j metod rascheta sejsmostojkix krupnopanel'ny`x zdaniy s "suximi" sty`kami: diss. ... kand. texn. nauk: 05.23.01. SPb., 1994. 222 s. (In Russian)
23. Belash T. A. Design peculiarities of foundation structures in permafrost and seismically active areas / Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations: Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, GFAC 2019, Saint Petersburg, 06–08 February, 2019. Saint Petersburg: Taylor & Francis Group, 2019. P. 36–43. DOI 10.1201/9780429058882-8.

Received: 17.04.2024

Accepted: 30.05.2024

Author's information:

Tatyana A. BELASH — Dr. Sci. in Engineering, Professor of the Department of Building Structures, Structures and Materials, Advisor to the RAASN; Scopus 7801647643, WoS ResearcherID: B-7819-2018, ORCID: 0000-0002-4577-8794, SPIN: 5217-7177, Author ID: 66498;

belashta@mail.ru;

Anatoly V. KUZNETSOV — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Building Structures, Buildings and Structures; Scopus 57205441909, WoS ResearcherID: HPH-1274-2023, ORCID: 0000-0002-3809-399X, SPIN: 8756-5314, Author ID: 659654; akuznetsov@pgups.ru

Viktor B. MARTIROV — architect, Associate Professor of the Department of Buildings (1982–2019), SPIN: 1602-7833, Author ID: 684098;

martirov@mail.ru

УДК 628.3

Пути повышения эффективности очистки сточных вод

Л. Н. Парамонова

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

Для цитирования: Парамонова Л. Н. Пути повышения эффективности очистки сточных вод // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 324–331. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-324-331

Аннотация

Цель: обобщение имеющихся методов повышения эффективности очистки сточных вод. Для достижения поставленной цели в статье рассмотрены способы интенсификации различных канализационных сооружений. **Методы:** сбор, сравнение и систематизация существующих методов повышения эффективности работы сооружений. **Результаты:** рассмотрены различные варианты повышения уровня эффективности очистки сточных вод, выявлены наиболее перспективные решения для модернизации как отдельных сооружений, так и устройств технологической очистки городских сточных вод. **Практическая значимость:** использование рекомендуемых современных отечественных разработок при реконструкции и/или строительстве новых очистных сооружений позволит с минимальными затратами, как денежными, так и временными, достигнуть требуемой новыми нормативами степени очистки сточных вод.

Ключевые слова: системы водоотведения, очистка сточных вод, повышение эффективности, резервуары-накопители, решетки, аэрируемые песколовки, отстойники, тонкослойные блоки, аэротенки, доочистка.

Введение

В настоящее время в связи с повышением экологических требований и нормативов на сброс очищенных сточных вод особо остро встает вопрос оптимизации производительности сооружений канализации.

Водоочистные канализационные сооружения в большей части были построены во второй половине XX века и не располагают возможностью удовлетворять все более ужесточающиеся нормативные требования к очищенным стокам [1–2]. Эти нормативы требуют новых подходов к проектированию и реконструкции сооружений. Применение новых технологий очистки воды, усовершенствование конструкций как самих сооружений, так и их отдельных элементов,

а также использование эффективных реагентов является наиболее действенным способом интенсификации работы очистных сооружений.

Повышение эффективности работы сооружений

Улучшению процесса очистки сточных вод на станциях может способствовать регулирование расхода поступающих стоков. Учитывая, что подача сточной воды на станции очистки осуществляется неравномерно, обеспечение стабильного равномерного расхода стоков является приоритетной задачей. Для этой цели можно рекомендовать использовать резервуары-накопители с прямым

для осадка [3], данная конструкция позволяет снизить энергозатраты, повысить производительность и качество подготовки воды.

Одними из первых сооружений механического метода очистки являются решетки и песколовки. Оптимизация работы решеток достижима путем применения усовершенствованных моделей решеток. Эффект удержания песка может быть усилен за счет стабилизации расхода с помощью специального водослива и улучшения работы скребкового механизма.

Для предотвращения попадания в отстойники и сооружения биологической очистки минеральных частиц используются песколовки. Одними из эффективных с этой точки зрения считаются круглые в плане пескоуловители, в которых подвод воды располагается по касательной и создается циркуляция загрязненной воды внутри (по периферии жидкость движется вниз, а в центре она поднимается). Это позволяет удалить песок без органических примесей из потока. Время нахождения воды в песколовках должно быть не менее 30 минут для лучшего удаления песка, однако из-за ограниченных площадей во многих случаях нельзя увеличить длину песколовков. В таких случаях целесообразно повысить эффективность процессов очистки, применяя нестандартное конструктивное оборудование.

Применение аэрируемых песколовков в системе очистки может быть использовано в качестве средства предварительной аэрации, поскольку одновременно осуществляется интенсивная аэрация с усилением эффекта задержания песка. Данная модель песколовков позволяет улавливать минеральные частицы в 1,5–2 раза эффективнее. Имея более высокие гидравличе-

ские нагрузки, тем не менее она задерживает более мелкие фракции песка [4].

Седиментация является простым, экономичным и низкоэнергетическим подходом к отделению суспендированных загрязнителей от сточных вод с плотностью, отличной от воды. В результате действия гравитационных сил нерастворенные примеси опускаются на дно сооружений или всплывают на поверхность.

Опыты, проведенные в России и за границей с использованием био пленки и биофлокулирующих свойств избыточного активного ила, позволили в значительной степени повысить результативность процессов первичной седиментации. Оптимизация процессов осаждения взвеси и уплотнения образующихся осадков позволяет снизить нагрузку на сооружения при последующей очистке.

Совершенствование конструкций для сбора и удаления плавающих веществ с поверхности первичного отстойника также повышает работу сооружений.

При брожении осадка выделяется большое количество газов, которые, поднимаясь на поверхность, увлекают за собой частицы осадка, что приводит к образованию пены и скоплений жировых включений (шлама) из гидрофобизированных дисперсных примесей.

Сотрудниками кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика» ФГБОУ ВО ПГУПС была разработана и успешно реализована на КОС города Петродворца система для удаления плавающих загрязнений, пены, корки загнившего ила на радиальных отстойниках канализации сооружений (рис. 1).

Инновационная конструкция жиросборников обеспечивает точную настройку

высотных характеристик устройства. При движении жироборной доски, которая крепится на ферме движущегося илососа или илоскреба, жироборник периодически срабатывает, тем самым не давая образовываться корке на поверхности отстойников. Установка статических щеток позволяет очистить отверстия жироприемника автоматически и не требует присутствия обслуживающего персонала. Конструкция успешно доказала свою экономичность и эффективность [5].



Рис. 1. Система для удаления плавающих загрязнений, пены, корки загнившего ила на радиальных отстойниках КОС г. Петродворца

Эффективность функционирования отстойников определяется двумя факторами: совершенством их гидродинамических характеристик, определяющих условия отстаивания, и кинетикой осаждения загрязнений природных и сточных вод. Для повышения эффективности работы сооружений отстаивания рекомендуется встраивать в их конструкцию тонкостенные блоки. Примеры установки таких элементов в отстойнике радиального типа показаны на рис. 2 и 3.



Рис. 2. Реконструкция отстойников КОС С.-Петербурга, секция радиального отстойника с установленными тонкослойными полочными блоками (вид сверху)



Рис. 3. Реконструкция отстойников КОС С.-Петербурга, полочные блоки с радиальными тонкослойными элементами в процессе монтажа (вид снизу)



В тонкослойных отстойниках формирование потока жидкости происходит более сложно, чем в обычных отстойниках [6–8]. Ламинарное движение потока внутри блоков снижает вынос загрязняющих веществ и увеличивает эффективность очистки до 30–40 % по массе.

Одним из наиболее часто используемых сооружений биологической очистки сточных вод являются аэротенки (биоблоки). Их модернизация может происходить в нескольких направлениях:

1. Использование аэротенков с распределительными каналами сточной воды и активного возвратного ила (рис. 4) [9]. При этом производительность сооружений увеличивается, уменьшаются капитальные и эксплуатационные затраты, а также повышается качество очищенных стоков;

2. Для установления фиксированных популяций микрофлоры в аэротенках применяют нейтральные носители. Применяются свободно плавающие (активный ил) и привязанные к носителю микроорганизмы. В этом контексте используются два разных типа. Для заселения микробных культур используются как неподвижные насадки из разнообразных материалов и форм, так и плавающие, которые благоприятствуют увеличению доли ила в аэротенке;

3. Эксплуатация аэротенков с круговым движением воды (карусельная система) позволяет значительно сократить энергозатраты на денитрификацию и нитрификацию.

Универсальность различных аэротенков и технологических схем очистки канализационных стоков позволяет изменить технологическую схему очистки под конкретную цель реконструкции станций аэрации.

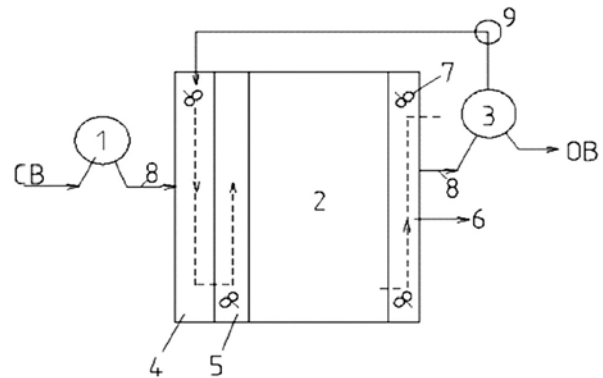


Рис. 4. Аэротенк при глубокой очистке сточных вод: 1 — первичные отстойники; 2 — аэротенк-биоблок; 3 — вторичные отстойники; 4 — распределительный канал сточной воды; 5 — распределительный канал возвратного активного ила; 6 — сборный канал; 7 — мешалки; 8 — трубопроводы; 9 — иловая насосная станция; СВ — неочищенная сточная вода; ОВ — очищенная сточная вода [9]

Повышение эффективности работы вторичных отстойников, одновременная организация в их емкости доочистки стоков возможны при дополнении конструкции отстойника тонкослойными блоками с плавающими фильтрами и системой непрерывной промывки фильтрующего слоя [10–12]. Эффективность данного решения подтверждается экономической оценкой. Оно позволяет сократить затраты на эксплуатацию и многократно снизить затраты на электроэнергию. При таком решении капитальные затраты будут так же минимальны [13–15]. Для интенсификации работы канализационных очистных сооружений следует учитывать не только оптимизацию работы системы, но и выбирать конкретные решения по технологии доочистки стоков [5].

Заключение

При высокой стоимости земли в черте города или при ее дефиците использование интенсификации работы каждого сооружения в технологической цепочке очистки городских сточных вод является технически и экономически оправданным. При таком подходе отпадает необходимость в строительстве новых очистных сооружений, а реконструкция существующих потребует меньших капиталовложений, при этом увеличится пропускная способность сооружений, а качество очищенной воды будет соответствовать нормативным показателям. Выбор конкретных решений по повышению эффективности очистки сточных вод должен осуществляться на основании технико-экономических расчетов.

Библиографический список:

1. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
2. СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий».
3. Патент № 2138317 С1 Российская Федерация, МПК В01D 21/00. Резервуар-накопитель № 98122343/12; заявл. 10.12.1998; опубл. 27.09.1999 / В. Д. Журавлев, И. В. Журавлева, В. Ф. Бабкин, М. И. Алексеев. Заявитель: Воронежская государственная архитектурно-строительная академия. EDN ZCUYMM.
4. Журавлева И. В., Бабкин В. Ф. Рациональные технологии и прогрессивные конструкции для повышения эффективности существующих станций очистки городских сточных вод // Инженерные системы и сооружения. 2014. № 1 (14). С. 30–39.
5. Мишуков Б. Г., Иванов В. Г., Амеличкин С. Г. и др. Следуя по пути модернизации типовых КОС к современным требованиям водоочистки // Водоснабжение и канализация. 2013. № 1–2. С. 76–86.
6. Иванов В. Г. Реализация принципов тонкослойного отстаивания в разработках кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика» // Новые достижения в областях водоснабжения, водоотведения, гидравлики и охраны водных ресурсов: сборник статей Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 10 декабря 2015 года. Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. 2016. С. 39–46. EDN XGVMQB.
7. Иванов В. Г. Изучение гидравлических характеристик потока в тонкослойных отстойниках // Новые достижения в области водоснабжения, водоотведения, гидравлики и охраны водных ресурсов: сборник статей Международной научно-практической конференции, посвященной 210-летию со дня основания Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, 13–15 ноября 2019 года / ответственный за выпуск: О. Г. Капинос. 2021. С. 52–58. EDN KGBBFY.
8. Иванов В. Г., Черников Н. А., Твардовская Н. В. Тонкослойный флотатор с камерой хлопьеобразования: сборник докладов XVI Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С. В. Яковлева // М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. 2021. С. 125–128. EDN QOFFEK.

9. Патент на полезную модель № 122650 U1 Российская Федерация, МПК C02F 3/00. Аэротенк глубокой очистки сточных вод; № 2012128911/05; заявл. 28.06.2012; опубл. 10.12.2012 / С. Г. Амеличкин, А. Н. Медведев, В. Г. Иванов. EDN URVIET.
10. Патент на полезную модель RU 68498 U1, 27.11.2007. Заявка № 2007128122/22 от 20.07.2007. Установка для очистки сточных вод / В. Г. Иванов, А. В. Ганжин.
11. Патент на полезную модель RU 87422 U1, 10.10.2009. Заявка № 2009118762/22 от 18.05.2009. Установка для очистки сточных вод / В. Г. Иванов, Н. В. Твардовская, Н. В. Хабазов.
12. Патент на полезную модель RU 166598 U1, 10.12.2016; заявка № 2016118413/05 от 11.05.2016. Установка для очистки сточных вод / В. Г. Иванов, Н. В. Твардовская, Е. В. Максимова, Ю. Ю. Круць.
13. Иванов В. Г., Твардовская Н. В., Хабазов Н. В. Использование емкости вторичных отстойников для доочистки сточных вод / Новые исследования в областях водоснабжения, водоотведения, гидравлики и охраны водных ресурсов. Материалы четвертых академических чтений, посвященных 200-летию Университета путей сообщения. Сер. «Академические чтения» // Российская академия архитектуры и строительных наук. 2009. С. 82–83.
14. Импортозамещающая модернизация вторичных отстойников / Е. В. Максимова, Ю. Ю. Круць, В. Г. Иванов, Н. В. Твардовская // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2016. С. 215–218.
15. Твардовская Н. В., Максимова Е. В. Доочистка биологически очищенных сточных вод / Новые достижения в областях водоснабжения, водоотведения, гидравлики и охраны водных ресурсов: сборник статей Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10 декабря 2015 года // Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. СПб. 2016. С. 168–171.

Дата поступления: 15.04.2024

Решение о публикации: 31.05.2024

Контактная информация:

ПАРАМОНОВА Любовь Николаевна —
зав.лабораторией
кафедры «Водоснабжение,
водоотведение и гидравлика»;
super.pln2013@yandex.ru

Ways to Improve the Efficiency of Wastewater Treatment

L. N. Paramonova

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

For citation: Paramonova L. N. Ways to Improve the Efficiency of Wastewater Treatment // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 324–331. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-324-331

Abstract

Purpose: generalization of available methods to improve the efficiency of wastewater treatment. To achieve this goal, the article discusses ways to intensify various sewage facilities. **Methods:** collection, comparison and systematization of existing methods for improving the efficiency of structures. **Results:** various options for improving the efficiency of wastewater treatment are considered, the most promising solutions for the modernization of both individual structures

and devices for technological treatment of urban wastewater are identified. **Practical significance:** the use of recommended modern domestic developments in the reconstruction and/or construction of new wastewater treatment plants will allow achieving the degree of wastewater treatment required by the new standards with minimal costs, both monetary and temporary.

Keywords: wastewater disposal systems, wastewater treatment, efficiency improvement, storage tanks, grids, aerated sand traps, settling tanks, thin-layer blocks, aerotanks, aftertreatment

References

1. SanPiN 1.2.3685-21 "Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov srede obitaniya". (In Russian)
2. SanPiN 2.1.3684-21 "Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k sodержaniyu territorij gorodskih i sel'skih poselenij, k vodnym ob'ektam, pit'evoj vode i pit'evomu vodosnabzheniyu, atmosfernomu vozduhu, pochvam, zhilym pomeshcheniyam, ekspluatacii proizvodstvennyh, obshchestvennyh pomeshchenij, organizacii i provedeniyu sanitarno-protivoepidemiceskikh (profilakticheskikh) meropriyatij". (In Russian)
3. Patent № 2138317 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK B01D 21/00. Rezervuar-nakopitel' №98122343/12; zayavl. 10.12.1998; opubl. 27.09.1999 / V. D. Zhuravlev, I. V. Zhuravleva, V. F. Babkin, M. I. Alekseev. Zayavitel': Voronezhskaya gosudarstvennaya arhitekturno-stroitel'naya akademiya. EDN ZCUYMM. (In Russian)
4. Zhuravleva I. V., Babkin V. F. Racional'nye tekhnologii i progressivnye konstrukcii dlya povysheniya effektivnosti sushchestvuyushchih stancij ochistki gorodskih stochnyh vod // Inzhenernye sistemy i sooruzheniya. 2014. № 1 (14). S. 30–39. (In Russian)
5. Mishukov B. G., Ivanov V. G., Amelichkin S. G. i dr. Sleduja po puti modernizacii tipovyh KOS k sovremennym trebovaniyam vodoochistki // Vodosnabzhenie i kanalizaciya. 2013. № 1–2. S. 76–86. (In Russian)
6. Ivanov V. G. Realizaciya principov tonkoslojnogo otstaivaniya v razrabotkah kafedry "Vodosnabzhenie, vodootvedenie i gidravlika" // Novye dostizheniya v oblastyah vodosnabzheniya, vodootvedeniya, gidravliki i ohrany vodnyh resursov: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Sankt-Peterburg, 10 dekabrya 2015 goda. Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I. 2016. S. 39–46. EDN XGVMQB. (In Russian)
7. Ivanov V. G. Izuchenie gidravlicheskih harakteristik potoka v tonkoslojnyh otstojnikah // Novye dostizheniya v oblasti vodosnabzheniya, vodootvedeniya, gidravliki i ohrany vodnyh resursov: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 210-letiyu so dnya osnovaniya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, Sankt-Peterburg, 13–15 noyabrya 2019 goda / otvetstvennyj za vypusk: O. G. Kapinos. 2021. S. 52–58. EDN KGBBFY. (In Russian)
8. Ivanov V. G., Chernikov N. A., Tvardovskaya N. V. Tonkoslojnyj flotator s kameroj hlop'eobrazovaniya: sbornik dokladov XVI Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, posvyashchennoj pamyati akademika RAN S. V. Yakovleva // M.: Nacional'nyj issledovatel'skij Moskovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet. 2021. S. 125–128. EDN QOFFEK. (In Russian)
9. Patent na poleznuyu model' № 122650 U1 Rossijskaya Federaciya, MPK C02F 3/00. Aerotenk glubokoj ochistki stochnyh vod; № 2012128911/05; zayavl. 28.06.2012; opubl. 10.12.2012 / S. G. Amelichkin, A. N. Medvedev, V. G. Ivanov. EDN URVIET. (In Russian)
10. Patent na poleznuyu model' RU 68498 U1, 27.11.2007. Zayavka № 2007128122/22 ot 20.07.2007. Ustanovka dlya ochistki stochnyh vod / V. G. Ivanov, A. V. Ganzhin. (In Russian)
11. Patent na poleznuyu model' RU 87422 U1, 10.10.2009. Zayavka № 2009118762/22 ot 18.05.2009. Ustanovka dlya ochistki stochnyh vod / V. G. Ivanov, N. V. Tvardovskaya, N. V. Habazov. (In Russian)

12. Patent na poleznuyu model' RU 166598 U1, 10.12.2016; zayavka № 2016118413/05 ot 11.05.2016. Ustanovka dlya ochistki stochnyh vod / V. G. Ivanov, N. V. Tvardovskaya, E. V. Maksimova, Yu. Yu. Kruc'. (In Russian)

13. Ivanov V. G., Tvardovskaya N. V., Habazov N. V. Ispol'zovanie emkosti vtorichnyh otstojnikov dlya doochistki stochnyh vod / Novye issledovaniya v oblasti vodosnabzheniya, vodootvedeniya, gidravliki i ohrany vodnyh resursov. Materialy chetvertyh akademicheskikh chtenij, posvyashchennyh 200-letiyu Universiteta putej soobshcheniya. Ser. "Akademicheskie chteniya" // Rossijskaya akademiya arhitektury i stroitel'nyh nauk. 2009. S. 82–83. (In Russian)

14. Importozameshchayushchaya modernizaciya vtorichnyh otstojnikov / E. V. Maksimova, Yu. Yu. Kruc', V. G. Ivanov, N. V. Tvardovskaya // Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXVI Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konfe-

rencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. 2016. S. 215–218. (In Russian)

15. Tvardovskaya N. V., Maksimova E. V. Doochistka biologicheskimi ochishchennyh stochnyh vod / Novye dostizheniya v oblasti vodosnabzheniya, vodootvedeniya, gidravliki i ohrany vodnyh resursov: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Sankt-Peterburg, 10 dekabrya 2015 goda // Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I. SPb. 2016. S. 168–171. (In Russian)

Received: 15.04.2024

Accepted: 31.05.2024

Author's information:

Lyubov' N. PARAMONOVA — Head of the laboratory of the department "Water supply, sanitation and hydraulics"; super.pln2013@yandex.ru

УДК 628.29; 556.048

Оптимизация гидрологических расчетов систем очистки поверхностного и дренажного стока воды

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

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

Для цитирования: Канцибер Ю. А., Пономарев А. Б., Штыков В. И. Оптимизация гидрологических расчетов систем очистки поверхностного и дренажного стока воды // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 332–344. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-332-344

Аннотация

Цель: разработать способ определения оптимальных гидрологических характеристик систем очистки загрязненных поверхностных и дренажных вод. **Методы:** применено уравнение баланса загрязняющих веществ. Для сравнения использована методика НИИ «Водгео». Исследованы затраты на очистку и экологический ущерб от загрязнения водотоков при различных вариантах водности года и параметрах очистных сооружений. В качестве основных параметров выбраны виды загрязняющих веществ (взвешенные вещества и нефтепродукты) и коэффициент разделения стока в разделительных камерах. **Результаты:** разработан способ оптимизационных расчетов гидрологических характеристик систем очистки поверхностных и дренажных вод, учитывающий вероятность стока в половодье и паводки, затраты на строительство и эксплуатацию очистных сооружений и ущерб от загрязнения водотоков. В качестве примера выполнены оптимизационные расчеты нескольких вариантов очистки талого, дождевого и дренажного стока. **Практическая значимость:** способ оптимизационных расчетов ОС позволит более обосновано и точно определить необходимую степень очистки сточных вод, производительность и параметры очистных сооружений, а в ряде случаев — снизить степень загрязнения водотоков.

Ключевые слова: очистные сооружения, загрязняющие вещества, водный объект, сток, расходы воды, половодье, дождевой паводок, кратность разбавления, экологический ущерб, оптимальная производительность.

Введение

В соответствии с действующими в РФ нормативно-методическими документами по проектированию гидротехнических сооружений, гидрологические характеристики, необходимые для обоснования их конструкций и параметров, должны устанавливаться в результате сравнительных технико-экономических расчетов в зависимости от гидрологического режима и характера использования водного объекта,

а также капитальности сооружений, включая системы водоотведения и очистки загрязненных стоков. Однако в связи с отсутствием достаточно обоснованных и практически реализуемых методов таких расчетов в настоящее время используются, как правило, нормативные (фиксированные) значения расчетных обеспеченностей расходов и объемов как речного стока, так и стока с селитебных и производственных

территорий (ЗТ). Причем при проектировании очистных сооружений (ОС) ориентируются в основном на очистку поверхностного стока в маловодные и средние по водности расчетные периоды года (половодье, паводки), что, естественно, может привести к увеличению степени загрязнения водных объектов при сбросе в них максимального стока с ЗТ, считая его сравнительно чистым, то есть имеющим значительно меньшее содержание загрязняющих веществ в воде. В то же время, занижая расчетные расходы загрязненных вод, поступающих на ОС, мы тем самым уменьшаем затраты на их строительство и эксплуатацию, что, безусловно, выгодно заказчику, который, как правило, недостаточно заинтересован в должной мере учитывать экологический ущерб (ЭУ) от загрязнения водных объектов.

Основными гидрологическими характеристиками систем очистки поверхностных вод являются прежде всего предельный расход и объем воды, направляемый от разделительной камеры на очистные сооружения или в общесплавной коллектор. В зависимости от их величины определяется производительность ОС, подбираются конструкции с соответствующими техническими характеристиками.

Согласно Методическому пособию НИИ «Водгео» [1], **предельный** расход дождевых вод рассчитывается с помощью коэффициента разделения расхода после определения **расчетного** расхода перед разделительной камерой и гидравлического расчета сети дождевой канализации. Его величина устанавливается в зависимости от продолжительности периода однократного превышения, принимаемого при расчете предельного расхода в пределах от 0,05 до 0,2 года,

а также зональных коэффициентов (C, n). При этом недостаточно учитывается сток и качество воды с ЗТ, что снижает эффективность работы ОС и повышает экологический ущерб от загрязнения водоприемника. Кроме того, очевидно, предельный **секундный** расход, по величине которого определяют параметры разделительной камеры, не соответствует предельному **суточному** расходу, используемому для оценки производительности ОС.

Основы оптимизационных расчетов ОС

Предлагаемый способ оптимизационных гидролого-экономических расчетов предназначен для обоснования оптимальных гидрологических характеристик (ОГХ) загрязненного стока воды, необходимых при определении конструкций и параметров систем его очистки. При этом используется уравнение баланса загрязняющих веществ (ЗВ), учитывающее сток и качество воды в водоприемнике и ЗТ [2].

Оптимизационные расчеты следует выполнять по основным ЗВ отдельно для весеннего половодья (талый сток) и летне-осеннему (летнему) дождевому паводку (дождевой сток). Причем необходимо рассматривать различные варианты работы ОС по водности и коэффициенту разделения расхода воды с ЗТ, поступающей в разделительную камеру на коллекторе, от которого зависит производительность и параметры ОС.

Таким образом, расчетными вариантами будут являться:

— виды основных загрязняющих веществ в поверхностном стоке (взвешенные и биогенные вещества, нефтепродукты, СПАВ и др.);

— водность расчетного периода, которая характеризуется рядом величин (7–9) обеспеченности ($p\%$) расхода и объема стока воды с ЗТ в пределах от 2 до 99 % или соответствующим периодом однократного превышения максимальных суточных осадков (P);

— коэффициент разделения расчетного расхода воды в разделительной камере дождевого коллектора (K_{oc}), изменяющейся от 0 до 1.

В качестве критерия оптимальности принимаем минимальную сумму затрат на очистку загрязненного поверхностного стока с ЗТ (Z_i) и экологического ущерба (ЭУ) от загрязнения водного объекта i -м ЗВ (ΣY_i) за проектный период эксплуатации ОС, то есть $\Sigma(Z_i + \Sigma Y_i)$ мин. При должном обосновании возможно использование других экономических критериев оптимальности: максимального дифференциального дохода, минимального срока окупаемости капиталовложений и др. При окончательном выборе оптимальных вариантов необходимо учитывать социально-экологические условия объекта, которые в ряде случаев будут приоритетными.

За расчетные величины ОГХ принимаются наибольшие из найденных для всех вариантов расчета значения направляемых на ОС расходов (расчетной производительности) и объемов загрязненного стока воды с ЗТ.

Расчетные расходы и производительность ОС

Расчетная общая производительность ОС накопительного типа по очистке поверхностного и дренажного стока определяется по формуле [1]:

$$P \approx \frac{q_c - Q_n}{3,6(T_n - T_m - T_o)}, \text{ л/с} \quad (1)$$

где q_c — предельный суточный расход талых (дождевых и дренажных) вод, направляемых на ОС, м³/сут;

Q_n — суточный объем возвратных промывочных вод, м³;

T_n — нормативный период переработки суточного объема стока, ч;

T_m — продолжительность технологических перерывов в работе ОС, ч;

T_o — продолжительность периода отстаивания стока, ч.

Нормативный период переработки суточного объема стока в ОС должен быть существенно больше продолжительности его отстаивания, которая определяется исходя из величин гидравлической крупности частиц взвешенных веществ, скорости водного потока и максимальной глубины наполнения аккумулирующего резервуара (отстойника) [1]. Так как, как правило, $T_n \gg (T_m + T_o)$ и $q_c \gg Q_n$, то в сравнительных гидролого-экономических расчетах можно приближенно принять $(T_m + T_o) \approx 0$ и $Q_n \approx 0$.

Учитывая, что в период весеннего снеготаяния талый сток будет поступать на ОС каждые сутки, нормативная продолжительность его переработки без аккумулирующего резервуара должна быть не более 24 часов. При устройстве аккумулирующего резервуара в зависимости от его объема T_n увеличивают до 30–50 часов и более.

Для дождевого стока $T_n \approx (T_o + 24)$, где T_o — средняя продолжительность бездождевого (сухого) периода, который для Северо-Запада РФ составляет 48–72 часа.

Предельный суточный расход талых вод $p\%$ обеспеченности, направляемый на ОС, наблюдается, как правило, в дневные часы на пике половодья и определяется в соответствии с указаниями [1, 3–6].

Предельный суточный суммарный расход дождевых, поливомоечных и дренажных вод $p\%$ обеспеченности, направляемый на ОС, равен:

$$q_c = K_{oc} \cdot q_{p\%} = K_{oc} \cdot (Q_{лс} + Q_{пм} + Q_{др}), \text{ м}^3$$

$$Q_{лс} = 10 \cdot (K_{p\%} \cdot h_{сос}) \cdot \varphi_q \cdot F$$

$$Q_{пм} = 10 \cdot q_{пм} \cdot \varphi_{ка} \cdot F_{пм}$$

$$Q_{др} = 86,4 \cdot (q_{до} \cdot F_o + q_{дз} \cdot F_з)$$

где: $q_{p\%}$ — суммарный максимальный суточный приток воды $p\%$ обеспеченности с ЗТ в коллектор (до разделительной камеры), м^3 ;
 $Q_{лс}$ — максимальный суточный приток дождевых вод с ЗТ, м^3 ;
 $Q_{пм}$ — приток поливомоечных вод при 1 поливе (мойке), м^3 ;
 $Q_{др}$ — максимальный суточный приток дренажных вод с ЗТ, м^3 ;
 $q_{пм} = 0,3–1,5$ л на 1 м^2 — расход воды на 1 мойку (полив) асфальтобетонных покрытий дорог и стоянок и пр. на ЗТ [7];
 $\varphi_{ка}$ — коэффициент поверхностного стока воды с асфальтобетонных покрытий дорог и стоянок на ЗТ [1];
 F — общая площадь ЗТ, га;
 $F_{пм}$ — площадь поливомоечных асфальтобетонных покрытий дорог, стоянок и пр. на ЗТ, га;
 φ_q — средневзвешенный коэффициент стока дождевых вод с ЗТ;
 $h_{сос}$ — расчетный **средне многолетний** максимальный суточный слой осадков [9–11], мм;
 $K_{p\%}$ — ордината кривых обеспеченностей биномиального или трехпараметрического (Пирсона 3-го типа) распределения вероятностей осадков;

$q_{до}, q_{дз}$ — максимальный модуль дренажного стока с «открытой» (газоны, парки, лесопарки, кладбища и пр.) и «закрытой» площади ЗТ соответственно, л/(с*га);

$F_o, F_з$ — «открытая» и «закрытая» площади ЗТ соответственно, га.

Учитывая, что до 60–70 % загрязненного предельного суточного расхода будет задерживаться накопителями (отстойниками), средний за расчетные сутки половодья (паводка) секундный расход, сбрасываемый в водоток с ОС **накопительного типа**, должен быть равен их расчетной производительности.

Максимальный модуль дренажного стока изменяется в зависимости от водности сезона или обеспеченности стока примерно в пределах от 0,3 ($p > 75\%$) до 1 ($p < 25\%$) л/(с*га) и более на «открытых» площадях ЗТ и от 0,1 ($p > 75\%$) до 0,4 ($p < 25\%$) л/(с*га) на «закрытых» площадях ЗТ [8].

Следует отметить, что величина $Q_{пм}$ в среднем может достигнуть 20 % от суточного расхода дождевых вод только в «сухие» годы и не превысит 2–3 % во влажные. Поэтому учитывая невысокую точность определения исходных данных, сток загрязненных поливомоечных вод в суммарном стоке целесообразно учитывать только в «сухие» годы.

Оценка экологического ущерба от загрязнения водного объекта

Экологический вред или ущерб от загрязнения водного объекта возникает в результате превышения допустимых концентраций ЗВ в сбрасываемых стоках с ЗТ и ОС:

- в местах их выпуска;
- в расчетном створе водотока ниже выпуска.

В первом случае место выпуска располагается в пределах населенного пункта или рекреационной зоны, а также при питьевом

и рыбохозяйственном характере использования водотока. В последние годы в связи с ужесточением экологического законодательства РФ большинство даже очень небольших водотоков относят к этой категории.

Расчеты ЭУ основаны на **компенсационном** принципе оценки и возмещения размера вреда по величине суммарных затрат, необходимых для устранения его причин и последствий. Таким образом, ЭУ должен определяться в зависимости от стоимости очистки **сверхдопустимой (сверхлимитной)** массы ($\sum M_i$) загрязняющего вещества, попадающего в водный объект.

В соответствии с Методикой [12] без учета поправочных коэффициентов, которые для сравнительных оптимизационных расчетов можно принять равными единице, ЭУ составит:

$$\sum Y_i = H_i \cdot \sum M_i \quad (3)$$

где $\sum Y_i$ – размер вреда (ЭУ) от i -го ЗВ, тыс. руб.;

H_i — таксы для исчисления размера вреда от сброса i -го ЗВ в водные объекты; определяются в соответствии с [12], тыс. руб./т;

$\sum M_i$ — суммарная сверхдопустимая масса ЗВ, сброшенная в водный объект за весь период эксплуатации ОС, т.

В водоприемник будет поступать как очищенный сток с ОС, так и неочищенный, сбрасываемый непосредственно в ВО с помощью разделительной камеры, установленной на коллекторе, в который направляется поверхностный и дренажный сток со всей площади ЗТ [13–15].

Величина $\sum M_i$ вычисляется для каждого варианта обеспеченности загрязненного стока по уравнению баланса масс стока ЗВ в виде разности между общей массой стока ЗВ, поступающей в водный объект с ЗТ за весь период эксплуатации ОС, и предельно допустимой массой стока ЗВ, который может быть сброшен в водный объект за этот же период, то есть:

$$\begin{aligned} M_{p+1} &= 10^{-6} \cdot (W_{oc} \cdot C_{ок} + W_{го} \cdot C_c)_{p+1} - НДС_{p+1} = 10^{-6} \cdot W_{го}(C_c - C_{ок})_{p+1}, \text{ т} \\ НДС_{p+1} &= 10^{-6} \cdot W_{p+1} \cdot C_{ок}, \text{ т} \\ M_p &= 10^{-6} \cdot (W_{oc} \cdot C_{ок} + W_{го} \cdot C_c)_p - НДС_p = 10^{-6} \cdot W_{го}(C_c - C_{ок})_p, \text{ т} \\ НДС_p &= 10^{-6} \cdot W_p \cdot C_{ок}, \text{ т} \end{aligned} \quad (4)$$

где M_{p+1} и M_p — сверхдопустимая масса сброшенного в водный объект стока ЗВ для текущего (p) и последующего ($p+1$) вариантов обеспеченности, т;

C_c — средняя концентрация ЗВ в талом или дождевом максимальном стоке с ЗТ, который сбрасывается без очистки в ВО, г/м³;

$C_{ок}$ — допустимая концентрация ЗВ

в талом или дождевом очищаемом стоке воды для текущего (p) и последующего ($p+1$) вариантов обеспеченности, г/м³;

$W_{p\%}$ (W_{p+1} , W_p) — суммарный объем стока поверхностных (талых, дождевых, поливомоечных) и дренажных вод с ЗТ для текущего (p) и последующего ($p+1$) вариантов обеспеченности, м³;

$W_{60} = W_p - W_{oc}$ — объем стока с ЗТ p и $(p+1)$ обеспеченности, отводимый непосредственно в водный объект, то есть минуя ОС, м³;

W_{oc} — объем стока p и $(p+1)$ обеспеченности, отводимый на ОС, м³;

$НДС_p$ — предельно допустимая масса стока ЗВ, поступающая в ВО с ЗТ для текущего (p) и последующего ($p+1$) вариантов обеспеченности (прилож. 2), т.

Из формулы (4) следует, что экологический ущерб от загрязнения водного объекта возникает в случае $C_c > C_{ок}$.

Используя кривую («ломаный» график) обеспеченности (повторяемости) сверхдопустимой массы стока ЗВ, сброшенного в водный объект при $K_{oc} < 1$, а также формулу площадей трапеций на ней, получим выражение для определения накапливаемых сумм $\sum M_i$ в период эксплуатации ОС в виде:

$$\sum M_{p+1} = \sum M_p + 0,5 \cdot (M_{p+1} + M_p) \cdot (N_{p+1} + N_p) \quad (5)$$

где p — номер варианта обеспеченности стока (1... n);

N_{p+1} и N_p — повторяемость или число лет превышения рассчитанных **годовых или сезонных масс** загрязнения ВО в период эксплуатации ОС для текущего (p) и последующего ($p+1$) вариантов обеспеченности стока.

Величины **средней и допустимой** концентрации основных загрязняющих веществ (взвешенных и биогенных веществ, нефтепродуктов, СПАВ и др.) определяют в соответствии с [1]. Для обеспечения условия непревышения ПДК ЗВ в местах выпуска стоков в водоток принимаем $C_{ок} = C_{нок}$ (где $C_{нок}$ — **предельно допустимая** концентрация ЗВ_{*i*} в стоке, сбрасываемом в водный объект, г/м³).

Кратность основного разбавления сточных вод до контрольного створа в водотоке

(n_p), необходимая для расчетов допустимой концентрации ЗВ, НДС и др., определяется отдельно для весеннего половодья и летнего (летне-осеннего) дождевого паводка [1].

Конструкции и параметры сооружений ОС (накопитель, насосная станция и пр.) должны рассчитываться на прием и переработку определенной массы ЗВ $p\%$ обеспеченности (M_p) [16]. При полном отводе стока с ЗТ на ОС, то есть при $K_{oc} = 1$, часть поступившей к ОС сверх этой массы ЗВ, равная разности ($M_{p+1} - M_p$), будет без очистки сбрасываться в ВО, так как она не может быть «обработана» из-за конструктивных ограничений. Таким образом, сверхдопустимая масса стока ЗВ при $K_{oc} = 1$, которую мы вынуждены сбрасывать в водный объект без очистки в период эксплуатации ОС по каждому варианту обеспеченности стока, составит:

$$\sum M_{p+1} = \sum M_p + 0,5 \cdot (M_{p+1} - M_p) \cdot (N_{p+1} - N_p) \quad (6)$$

Для **годовых или сезонных** объемов стока и масс ЗВ, поступающих в ВО, повторяемость их превышения равна [3]:

$$N = \frac{100}{p}, \text{ год (сезон)} \quad (7)$$

Тогда повторяемость или число лет превышения рассчитанных годовых или сезонных объемов стока и масс ЗВ $p\%$ обеспеченности за период эксплуатации ОС (M) составит:

$$N_p = p \cdot \frac{M}{100} = \frac{100}{N} \cdot \frac{M}{100} = \frac{M}{N} \quad (8)$$

Исходя из свойства соотношения площадей подобных треугольников, аппроксимирующих гидрографы стока с ЗТ (W_m) и в водный объект (W_{60}), получим:

$$\frac{W_{60}}{W_m} = \left(\frac{q_{p\%} - q_c}{q_{p\%}} \right)^2. \quad (9)$$

Таким образом, объем стока **талых** вод, направляемых на ОС (W_{oc}) для различных вариантов K_{oc} , будет равен:

$$W_{oc} = W_m - W_{60} = W_m \left[1 - \left(\frac{q_{p\%} - q_c}{q_{p\%}} \right)^2 \right] = W_m \left[1 - (1 - K_{oc})^2 \right]. \quad (10)$$

Для определения объема стока поверхностных и дренажных вод $p\%$ обеспеченности (W_{oc}), поступающих на ОС из разделительной камеры в теплый период года, можно использовать приближенную эмпирическую зависимость:

$$W_{oc} = W_{\partial+dp} \cdot \left(\frac{q_c}{q_{p\%}} \right)^\gamma = W_{\partial+dp} \cdot (K_{oc})^\gamma, \quad (11)$$

где γ — показатель степени; изменяется в пределах 0,3–0,5;

$W_{\partial+dp} = W_{\partial} + W_{dp}$ — суммарный объем поверхностного и дренажного стока, поступающий с ЗТ в коллектор, м³.

Суммарный объем поверхностного стока **дождевых и поливомоечных** вод $p\%$ обеспеченности с ЗТ в теплый период года (W_{∂}) вычисляется с учетом рекомендаций [1, 5–7].

Объем дренажного стока с систем осушения на ЗТ (W_{dp}) определяется в зависимости от объемов инфильтрационного притока воды в дренаж и утечек воды из водонесущих коммуникаций,

к которым следует отнести водопроводную сеть, дождевую и бытовую канализацию [8].

Затраты на очистку загрязненного поверхностного стока

Капитальные и эксплуатационные затраты на очистку загрязненного поверхностного стока с ЗТ за проектный период эксплуатации ОС (Z_i) зависят в основном от стоимости оборудования (сооружений) и сметных (укрупненных) нормативов на их строительство и эксплуатацию, принимаемых, как правило, из проектно-сметной документации. Стоимость оборудования следует определять в зависимости от расчетной производительности, числа функций и степени очистки воды от ЗВ. В большинстве случаев производится очистка талых и дождевых стоков с ЗТ от взвешенных веществ и нефтепродуктов, реже — от СПАВ и биогенных веществ.

Величина Z_i вычисляется по каждому расчетному варианту в виде суммы текущих (эксплуатационных) затрат и единовременных капитальных вложений в строительство ОС:

$$Z_i = (K_i + \sum \mathcal{E}_i), \text{ тыс. р.}$$

$$K_i = C_{об} + C_{мн} + C_{нпр} + C_{нр}$$

$$C_{об} = A \cdot P^n$$

$$\sum \mathcal{E}_i = 0,01 \cdot K_i \cdot K_3 \cdot M \quad (12)$$

$$C_{мн} = 0,01 \cdot K_{мн} \cdot C_{об}$$

$$C_{нпр} = 0,01 \cdot K_{нпр} \cdot (C_{об} + C_{мн})$$

$$C_{нр} = 0,01 \cdot K_{нр} \cdot (C_{об} + C_{мн} + C_{нпр})$$

где K_i — затраты на строительство ОС, тыс. р;

$\sum \mathcal{E}_i$ — сумма эксплуатационных затрат за период эксплуатации ОС, тыс. р;

$C_{об}$ — стоимость оборудования, тыс. р;

P — расчетная производительность очистных сооружений, л/с;

$C_{мн}$ — стоимость строительно-монтажных и пусконаладочных работ;

$C_{нпр}$ — стоимость проектно-изыскательских работ;

$C_{нр}$ — накладные расходы;

$K_{нпр}$ — норматив затрат на проектно-изыскательские работы (5–7), %;

$K_{мн}$ — норматив затрат на строительно-монтажные и пусконаладочные работы. С учетом накладных расходов, плановых накоплений, НДС и пр. его величина достигает 30–50 % и более;

$K_{нр}$ — норматив накладных расходов (5–10), %;

K_3 — норматив ежегодных затрат на эксплуатацию ОС (10–15), %;

M — проектный период эксплуатации ОС (30–50 и более), лет;

A, n — параметры зависимости, определяемые по данным поставщиков (про-

изводителей) оборудования. Для оборудования, предназначенного для очистки талых и дождевых стоков с ЗТ от взвешенных веществ и нефтепродуктов в Северо-Западной зоне РФ ориентировочно $A = 10–20, n = 1,2–1,5$.

Результаты оптимизационных расчетов

В соответствии с разработанным способом (методикой) на примере пригорода Санкт-Петербурга произведены оптимизационные расчеты гидрологических характеристик ОС с вариациями:

— стоимости ОС от относительно недорогих, предназначенных для обработки взвешенных веществ и нефтепродуктов до дорогих, обрабатывающих еще и биогенные загрязняющие вещества;

— концентрации ЗВ в максимальном стоке с ЗТ, который сбрасывается без очистки из разделительной камеры в водоприемник;

— коэффициентов вариации (C_v) и асимметрии (C_s) кривой распределения вероятностей стока воды с ЗТ;

— расчетного периода (половодье и летне-осенний дождевой паводок).

Отметим, что допустимая концентрация ЗВ в очищаемом стоке вычислялась без учета качества максимального стока, то есть в соответствии рекомендациями [1, 2, 5].

Анализ результатов многовариантных расчетов (таблица 1) показал:

1. Величина суммы затрат и ущерба от загрязнения водного объекта $\sum(Z_i + \sum Y_i)$ зависит от принимаемых в расчетах ОС, обеспеченности стока воды с ЗТ и коэффициента его разделения. С увеличением K_{oc} она возрастает.

2. Минимальная сумма $\sum(Z_i + \sum Y_i)$ получена для вариантов с очисткой дождевого

и дренажного стока до допустимых концентраций ЗВ в многоводные годы 5–10 % обеспеченности при $K_{oc} = 0,4–0,6$ и производительности ОС (П) в диапазоне от 10 до 20 л/с. Причем при очистке стока от нефтепродуктов в половодье величина П снижается до 5–10 л/с при $K_{oc} = 1$. Удельная оптимальная производительность ОС в расчете на 1 га изменяется примерно от 0,2 до 0,4 л/(с*га).

3. При расположении выпуска очищенных стоков в населенном пункте или рекреационной зоне, а также при питьевом и рыбохозяйственном использовании водотока следует в половодье полностью отводить загрязненный талый сток с ЗТ на очистные сооружения, ориентируясь на среднегодовые значения ($p \approx 40\%$) и $P = 5–8$ л/с, принимая в расчетах $C_{ок} = C_{нок}$ и $K_{oc} = 1$. Оптимальная производительность систем очистки дождевого и дренажного стока с ЗТ от взвешенных веществ и нефтепродуктов будет в 2–3 раза больше, чем для талого стока и на 20–30 % больше расчетной произво-

дительности, определенной в соответствии с нормативно-методическими рекомендациями [1].

4. С увеличением концентрации взвешенных веществ (C_c) с 50 до 400 г/м³ в максимальном дождевом стоке с ЗТ, который сбрасывается без очистки из разделительной камеры в водоприемник, оптимальная производительность ОС при $C_{ок} = C_{нок}$ возрастает примерно в 3 раза, K_{oc} изменяется от 0,2 до 0,6 при $p = 5–10\%$. Это обстоятельство необходимо учесть при оценке указанной характеристики качества стока, отдавая безусловное предпочтение полевому методу определения C_c , который является наиболее объективным и точным методом его определения.

5. При увеличении стоимости оборудования в 4–5 раз оптимальная производительность ОС снизится только на 30–35 %.

6. При изменении коэффициентов вариации (C_v) и асимметрии (C_s) в 1,5–2 раза производительность ОС возрастет не более чем на 10 %.

ТАБЛИЦА 1. Основные результаты гидролого-экономических расчетов оптимальных характеристик систем очистки стока с ЗТ от взвешенных веществ и нефтепродуктов. Пригород г. Санкт-Петербурга. $F = 50$ га, $M = 50$ лет, $np = 80$, $C_v = 0,3$, $C_s/C_v = 2$

ЗВ	Вид стока	$C_{дк}(C_c)$, г/м ³	$\sum(3I_i + \Sigma Y_i)$ млн р.	Соб, млн р.	p, %	K_{oc}	П, л/с	W_{oc} , тыс. м ³
Взвешенные вещества	Талый	97(250)	3,1	0,16	40	1	7,6	14,7
		10(250)	3,1	0,16	40	1	7,6	14,7
	Дождевой и дренажный	21(250)	5	0,42	5	0,4	17	206
		10 (250)*2	4,4	0,35	10	0,4	14,5	95
		10(50)	2	0,18	5	0,2	8,5	167
		10(100)	4	0,35	10	0,4	14,5	179
		10(400)	7,3	0,68	5	0,6	26	233
		10(250)*1	2,9	0,24	5	0,6	26	232
		10 (250)*3	9,7	0,8	20	0,6	18	178

Окончание ТАБЛИЦЫ 1

ЗВ	Вид стока	$C_{\text{дк}}(C_c)$, г/м ³	$\sum(3i+\Sigma Y_i)$ мин. млн р.	Соб, млн р.	Р, %	$K_{\text{ос}}$	П, л/с	$W_{\text{ос}}$, тыс. м ³
Нефтепродукты	Талый	0,3	1,5	0,096	30	0,6	5	3,9
	Дождевой и дренажный	0,3	4	0,35	10	0,4	14,5	179
	Нормативный* ⁴	0,3	—	—	—	0,3	11,5	—

Примечание. *¹, *², *³ — низкая, средняя и высокая стоимость оборудования ОС соответственно.
*⁴ — значения $K_{\text{ос}}$ и P определены в соответствии с рекомендациями [1].

Выводы

Разработан способ гидролого-экономического обоснования оптимальных значений гидрологических характеристик загрязненного стока с ЗТ, необходимых для определения конструкций и параметров систем его очистки. Оптимизационные расчеты выполняют по основным загрязняющим веществам отдельно для весеннего половодья (талый сток) и летне-осеннему (летнему) дождевому паводку (дождевой сток). При разных вариантах водности сезонов и коэффициента разделения стока с ЗТ, поступающего в разделительную камеру коллектора. Произведены многовариантные расчеты и установлено влияние вариации основных исходных данных на расчетные характеристики.

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. / ФГУП «НИИ Водгео». М., 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, 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 № 654/пр от 11 сентября 2023. М. ФАУ «ФЦС». 2023.103 с.

4. Пособие по определению основных расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 447 с.

5. Дикаревский В. С., Курганов А. М., Нечаев А. П. и др. Отведение и очистка поверхностных сточных вод. Л.: Стройиздат, 1990. 223 с.

6. Канцибер Ю. А., Пономарев А. Б. Расчеты характеристик поверхностного стока систем водоотведения на селитебных и производственных территориях Северо-Запада РФ // Известия ПГУПС. 2016, вып. 1 (46). С. 68–76.

7. СП 32.13330.2021. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.02-84.

8. Канцибер Ю. А., Штыков В. И. Оценка характеристик дренажного стока с селитебных и производственных территорий Северо-Запада РФ // Инженерно-строительный журнал. СПб., 2012. Т. 30, вып. 4. С. 46–51. DOI: 10.5862/МСЕ.30.7

9. Научно-прикладной справочник «Климат России» / В. Н. Разуваев, О. Н. Булыгина, Н. Н. Коршунова и др. // ВНИИГМИ-МЦД, 2024 [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/svc/aisori-climsprn/> (дата обращения: 14.04.2024).
10. СП 131.13330.2020. Свод правил. СНиП 23-01-99*, введен 24.05.2021 / Строительная климатология. М.: Минстрой России, 2020. 146 с.
11. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолет. Данные. Ч. 1–6 / Гос. ком. СССР по гидрометеорологии. СПб.: Гидрометеопиздат, 1993. 22 с.
12. Методика исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства. Утверждена приказом Минприроды России от 13 апреля 2009 года № 87 (с изменениями на 26 августа 2015 года).
13. 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. 2023. Т. 20, вып. 4. С. 801–810. DOI 10.20295/1815-588X-2023-4-801-810. EDN ALKZAL
14. Иванов В. Г., Черников Н. А., Твардовская Н. В. Интенсивность расчетных дождей и анализ соотношения объемов дождевой и производственной сточной воды для железнодорожных станций сибирского и дальневосточного регионов России // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16, вып. 1. С. 95–104. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-95-104. EDN MBIPEN
15. Chernikov N. A., Tvardovskaya N. V., Okhremenko I. M. Influence of financing water protection measures in the field of transport on water quality of water bodies / BRICS Transport. 2023. Vol. 2, iss. 2. DOI 10.46684/2023.2.2. EDN AGSEGJ
16. Черников Н. А., Твардовская Н. В. Совместная очистка производственных и дождевых сточных вод / III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов, Санкт-Петербург, 2–3 декабря 2021 года // СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2021. Т. 2. С. 186–188. EDN NIIDJB
- Дата поступления: 27.04.2024
Решение о публикации: 31.05.2024
- Контактная информация:**
КАНЦИБЕР Юрий Алексеевич — канд. техн. наук, доцент; kanziber3@yandex.ru
ПОНОМАРЕВ Андрей Борисович — канд. техн. наук, доцент; pol1nom@yandex.ru
ШТЫКОВ Валерий Иванович — докт. техн. наук, профессор; shtykov41@mail.ru

Optimization of hydrological calculations for surface and drainage runoff treatment systems

Ju. A. Kanziber, A. B. Ponomarev, V. I. Shtykov

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

For citation: Kanziber Ju. A., Ponomarev A. B., Shtykov V. I. Optimization of hydrological calculations for surface and drainage runoff treatment systems // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2, P. 332–344. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-332-344

Abstract

Objective: to develop a method for determining the optimal hydrological characteristics of systems for treating contaminated surface and drainage waters. **Methods:** the pollutant balance equation was applied. For comparison, the method of the Vodgeo Research Institute was used. The costs of treatment and environmental damage from pollution of watercourses were studied for various water levels of the year and the parameters of treatment facilities. The main parameters chosen are the types of pollutants (suspended substances and petroleum products) and the separation coefficient of the runoff in the separation chambers. **Results:** a method has been developed for optimization calculations of the hydrological characteristics of surface and drainage water treatment systems, taking into account the likelihood of runoff during high water and floods, the costs of construction and operation of treatment facilities and damage from pollution of watercourses. As an example, optimization calculations were performed for several options for treating melt, rain and drainage runoff. **Practical importance:** the method of optimization calculations of environmental protection will allow a more reasonable and accurate determination of the required degree of wastewater treatment, 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 flow, flood, rain flood, dilution factor, availability, repeatability, reliability.

References

1. Rekomendacii po raschetu sistem sbora, otvedeniya i ochistki poverhnostnogo stoka s selitebnyh territorij, ploshhadok predpriyatij i opredeleniju uslovij vypuska ego v vodnye ob#ekty. / FGUP «NII Vodgeo». M., 2015. 146 s. (In Russian)
2. SP 32.13330.2018. Kanalizacija. Naruzhnye seti i sooruzhenija. SNiP 2.04.03-85. Utv. prikazom Ministerstva stroitel'stva i ZhKH RF (Minstroj Rossii) ot 25 dekabrya 2018 g. № 680/pr, vveden v dejstvie s 26 ijunya 2019 g. M.: Standartinform, 2019. 76 s. (In Russian)
3. SP 529.1325800.2023 Opredelenie osnovnyh raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik. Utv. prikazom Ministerstva stroitel'stva i ZhKH RF № 654/pr ot 11 sentjabrja 2023. M. FAU «FCS». 2023. 103 s. (In Russian)
4. Posobie po opredeleniju osnovnyh raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik. L.: Gidrometeoizdat, 1984. 447 s. (In Russian)
5. Dikarevskij V. S., Kurganov A. M., Nechaev A. P. i dr. Otvedenie i ochistka poverhnostnyh stochnyh vod. L.: Strojizdat, 1990. 223 s. (In Russian)
6. Kanziber Ju. A., Ponomarev A. B. Raschety harakteristik poverhnostnogo stoka sistem vodootvedeniya na selitebnyh i proizvodstvennyh territorijah Severo-Zapada RF // *Izvestija PGUPS*. 2016, vyp. 1 (46). S. 68–76. (In Russian)
7. SP 32.13330.2021. Vodosnabzhenie. Naruzhnye seti i sooruzhenija. SNiP 2.04.02-84. (In Russian)

8. Kanciber Ju. A., Shtykov V. I. Ocenka harakteristik drenazhnogo stoka s selitebnyh i proizvodstvennyh territorij Severo-Zapada RF // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. SPb., 2012. T. 30, vyp. 4. S. 46–51. DOI: 10.5862/MCE.30.7. (In Russian)
9. Nauchno-prikladnoj spravochnik "Klimat Rossii" / V. N. Razuvaev, O. N. Bulygina, N. N. Korshunova i dr. // VNIIGMI-MCD, 2024 [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://meteo.ru/svc/aisori-climspn/> (data obrashhenija: 14.04.2024). (In Russian)
10. SP131.13330.2020.Svodpravil.SNIP23-01-99*, vveden 24.05.2021 / Stroitel'naja klimatologija. M.: Ministroy Rossii, 2020. 146 s. (In Russian)
11. Nauchno-prikladnoj spravochnik po klimatu SSSR. Ser. 3. Mnogolet. Dannye. Ch. 1–6 / Gos. kom. SSSR po gidrometeorologii. SPb.: Gidrometeoizdat, 1993. 22 s. (In Russian)
12. Metodika ischislenija razmera vreda, prichinenogo vodnym ob#ektam vsledstvie narushenija vodnogo zakonodatel'stva. Utverzhdena prikazom Minprirody Rossii ot 13 aprelya 2009 goda № 87 (s izmenenijami na 26 avgusta 2015 goda). (In Russian)
13. Kanciber Ju. A., Ponomarev A. B., Shtykov V. I. Osnovnye raschetnye gidrologicheskie harakteristiki sistem ochistki poverhnostnogo stoka v Severo-Zapadnoj zone Rossii // Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija. 2023. T. 20, vyp. 4. S. 801–810. DOI 10.20295/1815-588X-2023-4-801-810. EDN ALKZAL. (In Russian)
14. Ivanov V. G., Chernikov N. A., Tvardovskaja N. V. Intensivnost' raschetnyh dozhdej i analiz sootnoshenija ob#emov dozhdevoj i proizvodstvennoj stochnoj vody dlja zheleznodorozhnyh stancij sibirskogo i dal'nevostochnogo regionov Rossii // Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija. 2019. T. 16, vyp. 1. S. 95–104. DOI 10.20295/1815-588X-2019-1-95-104. EDN MBIPEH. (In Russian)
15. Chernikov N. A., Tvardovskaja N. V., Okhremenko I. M. Influence of financing water protection measures in the field of transport on water quality of water bodies / BRICS Transport. 2023. Vol. 2, iss. 2. DOI 10.46684/2023.2.2. EDN AGSEGJ
16. Chernikov N. A., Tvardovskaja N. V. Sovmestnaja ochistka proizvodstvennyh i dozhdevykh stochnykh vod / III Betankurovskij mezhdunarodnyj inzhenernyj forum: sbornik trudov, Sankt-Peterburg, 2–3 dekabrja 2021 goda // SPb: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija Imperatora Aleksandra I, 2021. T. 2. S. 186–188. EDN NIIDJB. (In Russian)

Received: 27.04.2024

Accepted: 31.05.2024

Author's information:

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

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

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

УДК 721.011

Особенности объемно-планировочных решений стационарных зданий цирков

А. А. Кочурова, Д. В. Зенченкова

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

Для цитирования: Кочурова А. А., Зенченкова Д. В. Особенности объемно-планировочных решений стационарных зданий цирков // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 345–358. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-345-358

Аннотация

Цель: данная работа посвящена исследованию особенностей в объемно-планировочных решениях стационарных зданий цирков и определению тенденций развития архитектуры цирка. В последние годы с появлением новых технологий требования к объемно-планировочным и техническим решениям зданий цирка претерпевают значительные изменения. Большое значение имеет сохранение традиций циркового искусства и в то же время необходима модификация и трансформация зданий цирка для расширения возможностей цирковых представлений. **Метод:** проведен комплексный анализ существующих зданий цирка в Европе, Азии и России. Исследование основано на анализе профессиональной литературы и научных статей. **Результаты:** выявлена тенденция к строительству многофункциональных зрелищных зданий с элементами цирковых выступлений и различными шоу-представлениями (водными, ледовыми, в воздухе). Технические инновации, применяемые в современных представлениях, такие как сменные манежи, использование виртуальной реальности и современных технических систем эквилибристики, диктуют новые подходы к организации пространства. В Европе представления с участием животных уходят в прошлое. В России и Азии животные остаются неотъемлемой частью циркового шоу, при этом ужесточается контроль за их содержанием. На основе изучения существующих зданий цирка определены перспективные решения для новых и реконструируемых зданий цирка. **Практическая значимость:** результаты позволяют выявить основные тенденции в объемно-планировочных решениях стационарных зданий цирков. Данное исследование будет полезным для архитекторов, проектировщиков и специалистов, которые занимаются проектированием и реконструкцией цирков. Результаты работы могут быть использованы для создания современных и функциональных зданий цирка, которые будут соответствовать ожиданиям зрителей и обеспечивать комфортные условия для артистов.

Ключевые слова: цирк, стационарный цирк, цирковые здания, шапито, многофункциональные здания, манеж, сменные манежи, зверинец.

Введение

Проблематика проектирования и реконструкции зданий для цирковых представлений тесно связана со спецификой циркового искусства [1–2], что делает задачу архитекторов-проектировщиков очень многогранной.

Отсутствие специальной, профильной документации по проектированию цирковых зданий дополнительно осложняет задачу. Нормативные документы оговаривают общие требования к театрально-зрелищным сооружениям, при этом не учитывают

специфических особенностей цирков и их богатое функциональное наполнение. В связи с этим изучение уже построенных цирков (отечественных и зарубежных), их преимуществ и недостатков, а также исследование современных тенденций циркового искусства играет важную роль при разработке новых и реконструкции старых зданий подобного назначения [3–6].

Цирковое искусство и, соответственно, сооружения цирка с течением времени испытывали взлеты и спады интереса. В XIX веке в Европе стали появляться стационарные здания цирков. А в XX веке многие крупные европейские города, чтобы принимать труппы артистов цирка со всего мира, стали строить свое специализированное здание [7–8]. Сегодня в Европе не строят новых зданий цирков, а реконструируют существующие объекты.

В России тенденции развития цирка и циркового искусства несколько отличаются от зарубежного опыта. В цирковых программах сохраняются традиции циркового дела братьев Никитиных [9–10]. Тем не менее сегодня цирковые шоу реорганизованы, что приводит к частичному отступлению от устоявшихся правил. Немногочисленные новые цирки и проекты реконструкций существующих цирковых зданий по всему миру делают с учетом современных требований, таких как обеспечение требуемого микроклимата различных помещений, в том числе для содержания животных, требования пожарной безопасности, доступности для маломобильных групп населения, повышение уровня комфортности зрительских мест. При разработке проектов учитывают современные тенденции, такие как возможность трансформации залов, многофункциональ-

ность, возможность проведения водных и ледовых шоу, повышение зрелищности за счет использования нового оборудования и технологий [11]. Внедрение таких технологий при реконструкции и строительстве способствует дальнейшему развитию циркового искусства и востребованности цирковых зданий.

Выбор формы здания, состав и компоновка помещений

Как правило, цирки возводятся по индивидуальным проектам и отличаются своим особенным архитектурным обликом. Цирк обычно имеет сложное пространственное покрытие в виде купола. Конструкции покрытия отличаются по конструктивному и архитектурному решению, придавая неповторимый вид многим цирковым зданиям (рис. 1) [12–13].

Своеобразная форма зрительного зала создает особенности в рассеивании звука и его отражении. Для достижения высокого акустического качества зала необходимо подбирать форму купола и его акустические характеристики, а также выбирать тип и расположение звукопоглощающих элементов. Данные вопросы исследованы рядом авторов [14–15].

Вместимость цирковых зданий варьируется в широком диапазоне и зависит от различных факторов. Зрительные залы в цирках могут вмещать более 3500 человек.

Выделяют два типа сооружений для цирковых представлений: стационарные, функционирующие круглый год, и мобильные, так называемые шапито, часто работающие только летом. Цирки шапито имеют сборно-разборную конструкцию. Сейчас на территории России работает 37 стационарных цирков и только 3 цирка шапито.

Цирк состоит из основного зального помещения, а также производственно-технологических площадей. Они разнообразны по своему составу, площадям, назначению и функционально связаны с основным зрительным объемом.

Композиционные примеры планировочного решения цирковых зданий представлены на рис. 2.

Зрительный зал цирка включает, как правило, манеж (арену), амфитеатр, эстраду для оркестра, осветительные ложи и осветительный мостик. По сложившейся традиции сценой для выступлений служит круглая арена. В цирках по всему миру существует требование к размерам манежа, которое было установлено еще в XIX веке. Оно объясняется профессиональной



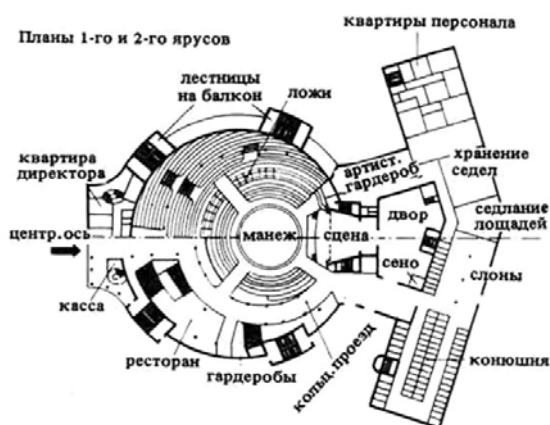
а



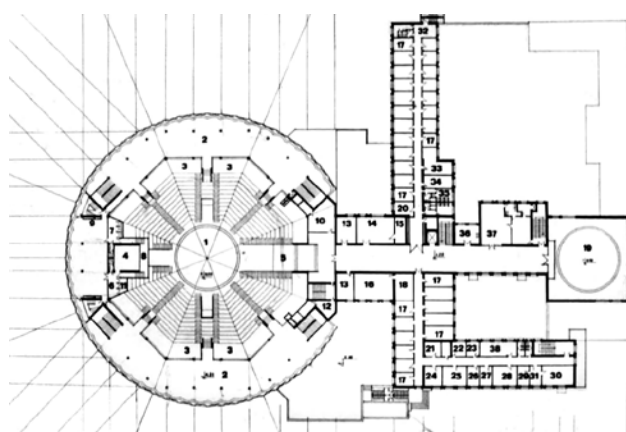
б

Рис. 1. Архитектурный облик зданий цирка:

а — Большой Санкт-Петербургский государственный цирк; б — Екатеринбургский цирк
(источники: а — Mistervlad/Shutterstock/FOTODOM; б — Inna Postnikova/Shutterstock/FOTODOM)



а



б

Рис. 2. Планировочное решение цирковых зданий:

а — Цирк Сарразани в городе Дрездене; б — Карагандинский цирк
(источники: а — https://sds.uz/wp-content/uploads/2011/02/NF_342_01.jpg;
б — <https://i.archi.ru/i/214821.jpg>)

необходимостью в проведении таких сложных развлекательных номеров, как конная вольтижировка и акробатика. В результате этого требования все цирки были вынуждены унифицировать свои манежи (диаметр 13 м). Для безопасности как артистов, так и зрителей, манеж окружен барьером обычно высотой и шириной 0,5 м. В связи с отказом от животных, в том числе конных выступлений, а также инновационных технических решений по трансформации пространства, сегодня появляется свобода в планировочном решении арены и отступлении от традиционной формы и размера (здание цирка La Nouba Cirque du Soleil в Disney Springs, Международный цирк Чимелонг в городе Гуанчжоу).

Амфитеатр, который окружает манеж, является одним из наиболее крутых среди прочих зрелищных сооружений, что связано со спецификой выступлений воздушных акробатов на значительной высоте. Рабочая высота воздушной эквилибристики, как правило, не менее 20 м, при этом еще выше, под куполом, встраивают колосниковую решетку для подвешивания гимнастической аппаратуры.

На манеж может вести один или несколько артистических проходов. Помещение для оркестра располагается в виде эстрады над одним из них. Предпочтительно расположение на противоположной стороне от главного прохода, чтобы дирижер мог видеть выход артистов.

Организация производственных помещений в цирке подчиняется особым требованиям. Принципиальное значение имеет группировка рабочих помещений с противоположной стороны от главного входа в здание цирка, при этом необходимо обеспечить удобную связь между рабочими помещениями и зрительным залом.

К производственным помещениям можно отнести следующие функциональные зоны: артистические, репетиционные, служебно-административные, зоны содержания животных, группы медицинско-оздоровительного назначения, санитарно-гигиенические помещения, мастерские, складские помещения, помещения технического назначения. Состав и площади данных помещений могут отличаться в разных цирках.

В отличие от множества других стран, Россия продолжает проводить цирковые представления с участием животных. Первой страной, которая ввела запрет на подобные выступления, была Болгария в 1998 году. За ней последовали около 45 других стран. Они приняли решение запретить использование диких или всех животных в цирке, объясняя, что такая практика не соответствует этическим нормам и принципам заботы о благополучии животных. В России Министерство культуры решило сохранить использование животных в цирковых программах до 2035 года [10, 16].

Помещения для животных должны быть расположены только на уровне отметки пола манежа, в непосредственной близости от артистических проходов. Очевидно, что животные в неволе требуют значительных пространств для своего полноценного физического и поведенческого развития. В связи с этим при разработке объемно-планировочных решений цирков следует учесть потребности условий проживания разных видов животных, например, требуемые объемы помещений, обеспечение требуемого микроклимата, естественного освещения, инсоляции, пожарной безопасности и планирование путей эвакуации животных [17]. Эти помещения проектируются с принудительной вентиляцией, водоснабжением и канализацией.

Функциональное зонирование помещений цирков и процентное соотношение их площадей анализируется в работе [3].

Многофункциональное использование зданий цирков

С целью сохранения и продолжения мировых традиций цирков необходимо сохранять существующие здания, которые часто являются объектами архитектурного наследия, а вновь строящиеся объекты делать заманчивыми для инвесторов [4]. Этому способствует многофункциональное использование здания цирка. Данная тенденция ярко прослеживается во всем мире последние десятилетия.

Современные здания цирков можно адаптировать (трансформировать) под различные виды представлений, начиная от цирковых шоу и заканчивая концертами, различными просветительскими, культурными и спортивными мероприятиями. Все элементы при этом (амфитеатр, манеж и технические системы) устроены таким образом, чтобы быстро и просто изменять конфигурацию зала. Сменные манежи расширяют возможности организации

различных мероприятий, включая водные, ледовые и иллюзионные шоу. Правильно спроектированное и обоснованное планировочное решение может сделать здание цирка многофункциональным и экономически эффективным.

Одним из примеров такого здания является **цирк Прайса в Мадриде** (рис. 3), который выполняет функции театра, культурного, образовательного и экспозиционного центра [7].

Строительство стационарного цирка было начато в 2002 году по проекту архитектора М. Байона. Зрительный зал, рассчитанный более чем на 2200 мест, легко трансформируется. В цирке Прайса сохранены многие традиции циркового искусства, но номера с участием животных в цирке запрещены.

Комплекс включает в себя несколько зданий разной формы и этажности: центральное здание с цирковой ареной, выставочный, административный и подсобный корпуса (рис. 3, а, б). В нижних подвальных уровнях располагаются технические помещения, а между корпусами размещаются всевозможные мастерские.



а



б

Рис. 3. Цирк Прайса (Teatro Circo Price), город Мадрид, Испания

Другой пример многофункционального использования — **цирк в Копенгагене, Дания**. Здание цирка представляет собой круглое здание, построенное еще в 1886 году для проведения цирковых представлений. После снижения продаж билетов цирк покинул здание в 1990 году. А после реконструкции здание цирка приобрело вторую жизнь и используется сегодня для различных мероприятий, включая цирковые выступления, мюзиклы, балет, конференции и концерты.

В настоящее время историческое помещение цирка, оснащенное по последнему слову техники, дает возможность проводить всевозможные мероприятия разных масштабов. Главный зрительный зал вмещает от 300 до 1000 гостей (рис. 4) и оборудован современными акустическими и световыми системами.

Используются сценические эффекты — демонстрация фонтанов, имитируется

эффект фейерверка без использования огня, без дыма и запаха. Также по-новому используются бывшие конюшни для верблюдов и лошадей в здании цирка (рис. 5), в настоящее время в них проводятся конференции и корпоративные мероприятия.

Инженерные инновации

Современные здания цирков воплощают в себе передовые технологии и инновации в области акустическим систем, освещения и подвесных воздушных систем, необходимых для выступления гимнастов.

Инженеры и архитекторы используют различные акустические материалы и конструкции для минимизации нежелательных эффектов, таких как эхо и резонанс. Световое оборудование при использовании в цирковых шоу должно освещать представление, но не светить животным в глаза. Кроме того, необходимо создавать четкую границу света и тени



а



б

Рис. 4. Многофункциональное здание цирка в Копенгагене:

а — фасад здания цирка; б — интерьер зрительного зала во время мероприятия

(источники: а — Sun_Shine/Shutterstock/FOTODOM; б — <https://cirkusbygningen.dk/content/uploads/sites/15/2023/01/thumbnails/the-circus-hall-overview-1920x1080-1-2400x2400.webp>)



Рис. 5. Интерьер бывших конюшен в здании цирка в Копенгагене

(источник: <https://cirkusbygningen.dk/content/uploads/sites/15/2023/01/the-old-stables-4-789x557-1.jpg>)

между манежем, на котором выступают животные, и зрительным залом. В большинстве случаев осветительные приборы устанавливаются на колосниковой решетке, непосредственно над манежем, а осветительную ложу и кольцевой осветительный мостик располагают на значительной высоте.

Многие цирковые номера связаны с поднятием артистов в воздух. Для этого используются специальные системы, такие как трапеции, лифты и волчки. Конструкции этих систем могут меняться в зависимости от типа представлений. Необходимо обеспечить легкую и быструю смену этих систем.

В последние годы все большей популярностью пользуются технологии виртуальной реальности. Используя специальные очки или шлемы, зрители могут полностью ощутить себя внутри циркового купола, где происходят выступления. Проекция — это еще один эффективный инструмент, используемый в цирковых выступлениях.



Рис. 6. Представление с использованием голограммы

(источник: <https://i.pinimg.com/originals/2a/95/40/2a9540d4c69413f8aeecf9f8372c1f8e.jpg>)

С помощью специальных проекторов артистам удастся создавать интерактивные картинки, которые сопровождают и дополняют их выступления (рис. 6).

Развитие ледовых и водных представлений в цирке привело к необходимости конструктивных изменений манежа. Все чаще используются системы, позволяющие быстро и относительно просто устанавливать и убирать ледовое или водное покрытие. Для этого манеж оснащают специальными механизмами, которые могут поднимать и опускать покрытие, а также регулировать его уровень.

Интересным в этом отношении является **Шанхайский цирк** (рис. 7). Это современное многофункциональное здание было открыто в 1999 году. Зал вмещает более 1600 человек. Для обеспечения многофункциональности и зрелищности арена сконструирована на вращающейся платформе. Также предусмотрено, что сцена может подниматься на разную высоту и даже превращаться в экран.



а



б

Рис. 7. Всемирный Шанхайский цирк, город Шанхай, Китай

(источник: а — posztos/Shutterstock/FOTODOM; б — Yingna Cai/Shutterstock/FOTODOM)

Ярким примером здания цирка с современными техническими системами является **Большой Московский цирк** на проспекте Вернадского (рис. 8) (архитекторы С. Х. Сатунц, Я. Б. Белопольский, Л. В. Мисожников и Е. П. Вулых). Московский цирк является одним из самых крупных в Европе, его зрительный зал вмещает 3400 человек.

Несмотря на то что здание цирка функционирует уже более 50 лет (цирк открыт в 1971 году), многие архитектурные и инженерные решения являются по сей день передовыми.

Купол цирка представляет собой архитектурно-выразительные металлические складки с консолями (инженеры Г. Кривин



Рис. 8. Здание Большого Московского цирка

(источник: kosmos111/Shutterstock/FOTODOM)

и А. Л. Левенштейн). Под несущей конструкцией купола располагаются колосниковые решетки, скрытые подвесным потолком и дающие возможность закреплять оборудование в любой точке купола.

Удачным является организация вестибюлей для входа зрителей в зал, которые расположены значительно выше арены. Благодаря такому пространственному решению организовано несколько отдельных выходов на манеж артистов и животных. Служебные помещения цирка компактно располагаются в стилобатной части. Также в цирке предусмотрен репетиционный манеж.

В техническом оснащении были предусмотрены инновационные для цирка решения: ксеноновые прожекторы, несколько киноустановок, современные акустические системы, в том числе динамики в спинках кресел. Особый интерес представляют пять сменных манежей (конный, ледовый, водный, иллюзионный и световой). Располагаются они на глубине 18 м и приводятся в движение специальными механизмами, позволяющими менять манежи за 5 минут (рис. 9).



Рис. 9. Сменные манежи Большого Московского цирка

(источник: <https://rblogger.ru/img3/2017/bratya-zapashnyie-molodci/11.jpg>. Фото: Евгений Чесноков)

Инновационные технические и архитектурные решения отличают **цирк La Nouba в Disney Springs, город Орlando, США**. Disney Springs является наиболее крупным центром развлечений и жемчужиной среди крупнейших построек империи «Дисней». La Nouba — это большой цирк, сцена которого строится индивидуально для каждого проекта. Особенностью цирка является его техническая обеспеченность, необходимая для различного рода представлений (рис. 10).



a



б

Рис. 10. Здание цирка La Nouba в Disney Spring: *a* — фасад цирка, *б* — схема зрительного зала

(источники: *a* — Feng Cheng/Shutterstock/FOTODOM;

б — <https://i.pinimg.com/originals/95/7e/e0/957ee060190fed0e1052b97b91e228e2.jpg>)

Непосредственно в сцену встроены лифты, которые могут двигаться и подниматься на высоту до 5 м, за счет этого достигается постоянная трансформация окружения для каждого номера. Сцена может разъезжаться, делая доступными батутные дорожки для акробатов (рис. 11).

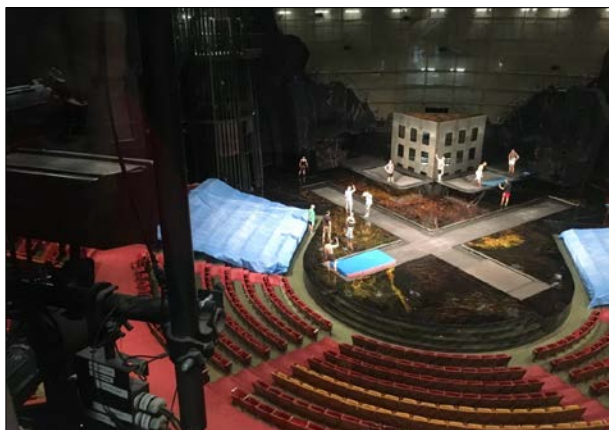


Рис. 11. Здание цирка La Nouba: вид сцены с батутными дорожками
(источник: https://kimandcarrie.com/wp-content/uploads/2016/03/IMG_3047-1024x768.jpg)

Огромная высота театра (от уровня земли до высоты полета эквилибристов — 30 м; до вершины мачты — 46 м) позволяет хранить сценическое и акробатическое оборудование под куполом.

Еще одним интересным примером современного цирка является **Международный цирк Чимелонг, город Гуанчжоу, Китай**, основанный в 2000 году. Особенностью цирка Чимелонг является масштаб представлений и самого здания, которое отличается необычным для цирков объемно-планировочным решением (рис. 12). Это крупнейший в мире стационарный цирк вместимостью около 7000 зрителей.

Внутри здания инженеры предусмотрели многоступенчатую систему навигации. Так, посетители не будут мешать друг другу, поскольку входы и выходы запроектированы на разных уровнях.

Здесь сконструирована самая большая в мире сцена шириной свыше 100 м и глубиной более 50 м, на которой размещаются



Рис. 12. Фасад Международного цирка Чимелонг

(источник: <https://www.archdaily.com/923005/stufish-entertainment-architects-design-the-chimelong-theatre-in-china/5d53b1d2284dd1c0e10005fd-stufish-entertainment-architects-design-the-chimelong-theatre-in-china-image>)

декорации, достигающие высоты 11-этажного здания. Благодаря таким размерам в цирке Чимелонг можно создавать леса, холмы, горные потоки и другие объекты в натуральную величину и организовывать беспрецедентные по своему масштабу шоу (рис. 13).

Выводы

Стационарные здания цирков являются сложными и уникальными объектами как в конструктивном, так и в объемно-планировочном решении. Ограниченность информации по технологии разработки и обеспечению цирковых шоу, особенности дрессировки и содержания цирковых животных делают задачу проектирования зданий цирков нетривиальной. В результате анализа уже существующих объектов выявлено, что актуальным является обеспечение возможности многофункционального использования пространства стационарных зданий цирка. Большинство успешных

цирков мира к XXI веку трансформировали стационарные здания цирков в многофункциональные здания (цирк Прайса в Испании, цирк в Копенгагене в Дании, Зимний цирк (Cirque d’Hiver) во Франции). Новые, современные здания цирка (например, Международный цирк Чимелонг, цирк La Nouba в Disney Springs) спроектированы со способностью к трансформации внутреннего пространства.

Вопрос об участии животных в цирковых шоу является спорным и неоднозначным в мировой практике. Россия и азиатские страны сохраняют традиции привлечения животных в цирковых шоу. Участие животных является одним из важных факторов, влияющих на объемно-планировочное решение вспомогательных помещений цирка, назначение габаритов и конструкции манежа, а также организацию осветительных систем.

В настоящее время необходимо учитывать технические инновации, применяемые в современных представлениях:



a



б

Рис. 13. Здание Международного цирка Чимелонг:

a — вид манежа во время представления; *б* — схема зрительного зала

(источники: *a* — <https://media-cdn.tripadvisor.com/media/photo-s/1b/8a/02/0e/img-20200619-205432-largejpg.jpg>;

б — <https://avatars.mds.yandex.net/i?id=1b0dfdfef496cd108846fdb736338d81d268f927c-10932673-images-thumbs&n=13>)

сменные манежи, использование виртуальной реальности и современных технических систем эквилибристики, что, конечно, отражается на архитектурно-планировочных и конструктивных решениях основного зала. Сочетание исторических традиций циркового искусства с инновационными технологиями диктует новые подходы к организации пространства и, соответственно, новым объемно-планировочным решениям зданий цирка.

Библиографический список

1. Хренов Н.А. Некоторые особенности циркового искусства в контексте зрелищной культуры / Н.А. Хренов, А.М. Дотлибова // Зрелищные искусства. Обзорная информация. М., 1988. Вып. 3. С. 24.
2. Чао С. Новый цирк как синтез традиционных цирковых форм и современного театрального искусства / С. Чао // Культура: открытый формат: сб. науч. статей Международной заочной научной конференции, Минск, 23 июня 2022 года. Минск: Белорусский государственный университет культуры и искусств, 2023. С. 199–205.
3. Шамаева Т.В. Предпосылки и тенденции развития архитектуры современных цирков / Т.В. Шамаева, Н.С. Подколзина // Строительные материалы и изделия. 2023. Т. 6, № 2. С. 81–103. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-2-81-103.
4. Смирнова Н.Р. Закономерности формирования архитектуры зрелищных зданий и сооружений в условиях реконструкции / Н.Р. Смирнова // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2023. № 2 (160). С. 75–80.
5. Семина А. А. О принципах проектирования зданий цирков на современном этапе развития архитектуры / А.А. Семина // Дни студенческой науки: сб. докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры НИУ МГСУ, Москва, 2–5 марта 2020 года. М.: Изд-во МИСИ—МГСУ, 2020. С. 116–118.
6. Dolganova E.A. The history of the development of circus architecture / E.A. Dolganova, N.V. Patyayeva // 18–19 октября 2022 года, 2022. P. 856–860.
7. Сысоева Е.В. Эволюция и перспективы строительства зданий цирков в Европе / Е.В. Сысоева // Инновации и инвестиции. 2017. № 12. С. 258–263.
8. Divac M. Circus is a performance but it is also a building — memory of circus buildings in Europe / M. Divac, M. Krklješ, S. Milošević // City, Territory and Architecture. 2022. Vol. 9, no. 1. P. 9. DOI: 10.1186/s40410-022-00156-3.
9. Клепацкая О.С. Цирк, как феномен русской культуры первой трети XX века: автореф. дис. ... канд. культурол. / Вят. гос. гуманитар. ун-т, Киров, 2009. 19 с.
10. Ганин А.А. Развитие циркового искусства в России до 2035 года в культурологическом аспекте / А.А. Ганин, Т.В. Бушкова // Человек и культура. 2023. № 4. С. 41–50. DOI: 10.25136/2409-8744.2023.4.43817.
11. Шамаева Т.В. Цирки — исчезающий типологический вид или новый этап развития? / Т.В. Шамаева, Н.С. Подколзина // Инновации и инвестиции. 2022. № 9. С. 133–138.
12. Сысоева Е.В. История проектирования и строительства цирков России / Е.В. Сысоева, С.И. Трушин // Строительство и реконструкция. 2017. № 2 (70). С. 95–102.
13. Цирк Чинизелли. От создания до возрождения / Сост. Е.Ю. Шаина. СПб.: Типография «НП-Принт», 2015. 120 с.
14. Cairoli M. The architectural acoustic design for a circus: The case study of Rigas Cirks // Applied Acoustics. 2021. Vol. 173. Art. № 107726.
15. Ismail M. R., Eldaly H. Acoustic of monolithic dome structures // Frontiers of Architectural Research. 2018. Vol. 7, no. 1. P. 56–66.
16. Постановление Правительства РФ от 30 декабря 2019 года № 1937 «Об утверждении требований к использованию животных в культурно-зрелищных целях и их содержанию» // Собрание

законодательства РФ. 01.01.2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564089624?ysclid=Islstm0vhi428605134> (дата обращения 02.02.2024).

17. Смирнов М. Е. Особенности планирования эвакуации животных при пожаре в цирках / М. Е. Смирнов // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2018. № 1 (9). С. 397–399.

Дата поступления: 26.03.2024

Решение о публикации: 13.05.2024

Контактная информация:

КОЧУРОВА Александра Алексеевна — студент;

Kochurovp@list.ru

ЗЕНЧЕНКОВА Диана Вениаминовна —

канд. техн. наук, доцент;

dvz2012@mail.ru

Features of space-planning solutions for stationary circus buildings

A. A. Kochurova, D. V. Zenchenkova

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

For citation: Kochurova A. A., Zenchenkova D. V. Features of space-planning solutions for stationary circus buildings // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 345–358. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-345-358

Abstract

Objective: this work is devoted to the study of the features in space-planning solutions for stationary circus buildings and to determine the development of circus architecture. In recent years, with the appearance of new technologies, the requirements for space-planning and technical solutions of circus buildings have undergone significant changes. It is very important to preserve the traditions of circus art and, at the same time, for expansion of the circus performances are necessary modifications and transformations of the buildings. **Methods:** have been made a comprehensive analysis of existing circus buildings in Europe, Asia and Russia. The research is based on the analysis of professional literature and scientific articles. **Results:** has been revealed patterns and main features in construction of multifunctional entertainment buildings with elements of circus and various show performances (on ice, on water, in the air). Technical innovations applied in modern representations, such as removable playpens, the use of virtual reality and modern technical balancing systems, dictate new approaches to the organization of space. In Europe, animal performances are a thing of the past. In Russia and Asia, animals remain an essential part of the circus show, meanwhile control over their living conditions is becoming more strict. Based on the study of the already built circus facilities were determined the prospects for the construction of new and reconstruction of existing buildings. **Practical significance:** the results allow us to identify the main trends in the space-planning solutions of stationary circus buildings. This research will be useful for architects, designers and other specialists who are engaged in the design and reconstruction of circuses. The results of this research can be used to create modern and functional circus buildings that will meet the expectations of the audience and provide comfortable conditions for the artists.

Keywords: circus, stationary circus, circus buildings, tent, multifunctional buildings, arena, interchangeable arenas, menagerie.

References

1. Khrenov N. A. Nekotoryye osobennosti tsirkovogo iskusstva v kontekste zrelishchnoy kul'tury Tekst / N. A. Khrenov, A. M. Dotlibova // Zrelishchnyye iskusstva. Obzornaya informatsiya. Vyp. 3. M., 1988. S. 24. (In Russian)
2. Chao S. Novyy tsirk kak sintez traditsionnykh tsirkovykh form i sovremennogo teatral'nogo iskusstva / S. Chao // Kul'tura: otkrytyy format: Sbornik nauchnykh statey Mezhdunarodnoy zaochnaya nauchnoy konferentsii, Minsk, 23 iyunya 2022 goda. Minsk: Belorusskiy gosudarstvennyy universitet kul'tury i iskusstv, 2023. S. 199–205. (In Russian)
3. Shamayeva T. V. Predposylki i tendentsii razvitiya arkhitektury sovremennykh tsirkov / T. V. Shamayeva, N. S. Podkolzina // Stroitel'nyye materialy i izdeliya. 2023. T. 6, № 2. S. 81–103. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-2-81-103. (In Russian)
4. Smirnova N. R. Zakonomernosti formirovaniya arkhitektury zrelishchnykh zdaniy i sooruzheniy v usloviyakh rekonstruktsii / N. R. Smirnova // Vestnik Donbasskoy natsional'noy akademii stroitel'stva i arkhitektury. 2023. № 2 (160). S. 75–80. (In Russian)
5. Semina A. A. O printsipakh proyektirovaniya zdaniy tsirkov na sovremennom etape razvitiya arkhitektury / A. A. Semina // Dni studencheskoy nauki: Cb. dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov instituta stroitel'stva i arkhitektury NIU MGSU, Moskva, 2–5 marta 2020 goda. M.: Izd-vo MISI–MGSU, 2020. S. 116–118. (In Russian)
6. Dolganova E. A. The history of the development of circus architecture / E. A. Dolganova, N. V. Patyayeva // 18–19 oktyabrya, 2022. P. 856–860.
7. Sysoyeva Ye. V. Evolyutsiya i perspektivy stroitel'stva zdaniy tsirkov v Yevrope / Ye. V. Sysoyeva // Innovatsii i investitsii. 2017. № 12. S. 258–263. (In Russian)
8. Divac M. Circus is a performance but it is also a building — memory of circus buildings in Europe / M. Divac, M. Krklješ, S. Milošević // City, Territory and Architecture. 2022. Vol. 9, no. 1. P. 9. DOI: 10.1186/s40410-022-00156-3.
9. Klepatskaya O. S. Tsirk, kak fenomen russkoy kul'tury pervoy treti XX veka: avtoref. dis. ... kand. kul'turolog. / Vyat. gos. gumanitar. un-t, Kirov, 2009. 19 s. (In Russian)
10. Ganin A. A. Razvitiye tsirkovogo iskusstva v Rossii do 2035 g. v kul'turologicheskom aspekte / A. A. Ganin, T. V. Bushkova // Chelovek i kul'tura. 2023. № 4. S. 41–50. DOI: 10.25136/2409-8744.2023.4.43817. (In Russian)
11. Shamayeva T. V. Tsirki — ischezayushchiy tipologicheskiy vid ili novyy etap razvitiya? / T. V. Shamayeva, N. S. Podkolzina // Innovatsii i investitsii. 2022. № 9. S. 133–138. (In Russian)
12. Sysoyeva Ye. V. Istoriya proyektirovaniya i stroitel'stva tsirkov Rossii / Ye. V. Sysoyeva, S. I. Trushin // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2017. № 2 (70). S. 95–102. (In Russian)
13. Tsirk Chinizelli. Ot sozdaniya do vozrozhdeniya / Sost. Ye. Yu. Shaina. S-Pb.: Tipografiya “NP-Print”, 2015. 120 s. (In Russian)
14. Cairoli M. The architectural acoustic design for a circus: The case study of Rigas Cirks // Applied Acoustics. 2021. Vol. 173. Art. № 107726.
15. Ismail M. R., Eldaly H. Acoustic of monolithic dome structures // Frontiers of Architectural Research. 2018. Vol. 7, no. 1. P. 56–66.
16. Postanovleniye Pravitel'stva RF ot 30 dekabrya 2019 g. № 1937 “Ob utverzhdenii trebovaniy k ispol'zovaniyu zhivotnykh v kul'turno-zrelishchnykh tsel'yakh i ikh soderzhaniyu” // Sobraniye zakonodatel'stva RF. 01.01.2020. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564089624?ysclid=lslstm0vhi428605134> (data obrashcheniya 02.02.2024). (In Russian)
17. Smirnov M. Ye. Osobennosti planirovaniya evakuatsii zhivotnykh pri pozhare v tsirkakh / M. Ye. Smirnov // Sovremennyye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoy oborony i likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy. 2018. № 1 (9). S. 397–399. (In Russian)

Received: 26.03.2024

Accepted: 28.05.2024

Author's information:

Alexandra Al. KOCHUROVA — Student;
Kochurovp@list.ru

Diana Ven. ZENCHENKOVA — PhD in Engineering,
Associate Professor; dvz2012@mail.ru

УДК: 621.331.3.025.1

Особенности построения и функционирования устройств генерации электроэнергии в южной части Ирака

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

¹ Российский университет транспорта (МИИТ), Россия, 127994, Москва, ул. Образцова 9, стр. 9

² Кербельский университет, Ирак, Кербела

Для цитирования: Алсултан М. Д. Д., Шевлюгин М. В. Особенности построения и функционирования устройств генерации электроэнергии в южной части Ирака // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 2, вып. 2. С. 359–369. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-359-369

Аннотация

Цель: сектор электроэнергетики Ирака находится в критическом состоянии, требующем немедленных реформ. Отрасль и академическое сообщество выразили обеспокоенность по поводу способности системы обеспечивать стабильное электроснабжение и общей операционной неэффективности. В настоящее время сектор энергетики испытывает один из самых значительных ростов спроса в мире, и, учитывая его капиталоемкость, он занимает значительную часть государственной программы инвестиций Ирака. Более того, наблюдается значительное увеличение финансовой нагрузки на электроснабжение Ирака из-за высоких субсидий, необходимых для покрытия текущих расходов. Эти субсидии считаются одними из самых высоких в мире. **Методы:** рассуждения, представленные в статье, касаются сложного вопроса о производственных мощностях электростанций, работающих в географических границах центральных и южных регионов страны Ирака, с уделением особого внимания первостепенной важности понимания масштабов и объема спроса на энергию, существующего в этих вышеупомянутых регионах, а также многогранных сложностей, связанных с разнообразными типами потребителей, которые участвуют в использовании этих энергетических ресурсов. **Результаты:** принимая во внимание вышеупомянутые трудности, в данной статье подробно рассматриваются эти вопросы и представлен ряд предложений, направленных непосредственно на повышение общей эффективности энергетического сектора. Одна из основных рекомендаций предусматривает комплексную реформу энергетического сектора с уделением особого внимания удовлетворению растущего спроса на электроэнергию среди населения. Ожидается, что реализация этого предложения позволит добиться значительных успехов в обеспечении надежных и устойчивых энергетических решений для удовлетворения постоянно растущих потребностей населения.

Ключевые слова: реформа, иракская энергосистема, генерация, распределение, учет, планирование электроэнергии, реализация проектов по производству электроэнергии, мультилинейная регрессия.

Введение

Ирак имеет долгую историю использования электроэнергии начиная с установки первого электромобиля в 1917 году. Энергетическая система страны претерпела значительные изменения до вторжения США в 2003 году. До войны в Персидском за-

ливе в 1991 году общая установленная генерирующая мощность Ирака составляла 9295 МВт, при этом 87 % населения имели доступ к электричеству. Однако война нанесла значительный ущерб электрической системе, что привело к отключениям

электроэнергии и ограничению энергоснабжения [1]. После войны начались восстановительные работы, но растущий спрос на электроэнергию и ограниченное предложение привели к постоянным отключениям электроэнергии. Создание Национального управления электроэнергетики в 1999 году и последующие реформы были направлены на решение этих проблем, но повреждение инфраструктуры, дефицит газа и проблемы управления препятствовали прогрессу [2]. Несмотря на усилия по увеличению генерирующих мощностей, спрос постоянно превышает предложение. Для решения этих проблем необходимы комплексные реформы, стимулирующие экономический рост и обеспечивающие устойчивое развитие электроэнергетического сектора, особенно в сфере распределения [3].

Состояние производства электроэнергии в южной части Ирака

Совокупная установленная мощность производства электроэнергии на юге Ирака превышает 7000 МВт и включает в себя 147 отдельных генерирующих блоков с мощностями от 1,7 до 300 МВт на блок. Эти генерирующие блоки разбросаны по 8 тепловым электростанциям, способствуя оценочной общей выработке около 2125 МВт. Среди этих блоков особую роль играют 20 газовых турбинных станций, имеющих в совокупности примерно 9823 МВт мощности. Кроме того, есть 3 дизельные электростанции с общей мощностью около 640 МВт наряду более чем с 100 небольшими дизельными генераторами, специально разработанными для управления пиковыми нагрузками, как показано в таблице 1 [3–4].

ТАБЛИЦА 1. Информация об электростанциях Ирака

TABLE 1. Information on power plants in Iraq

Район	Производитель	Наименование электростанции	Тип энергоносителя	N_T	$P_{пр}$, МВт	$P_{ср}$, МВт
Багдад	«Хитачи»	«Таджи-1»	Газ	7	179	54
	ДЕ	«Таджи-2»	Газ	4	184	100
	«Сименс» & «Ансальдо»	«Дора»	Тепловой	4	640	211
	«Вият»	«Дора»	Газ	4	148	37
	ДЕ	«Южный Багдад»	Тепловой	3	165	29
	ДЕ	«Кудис»	Газ	14	1408	511,7
	ДЕ	«Обручальный газ»	Газ	1	20	13
	ДЕ	«Южный Багдад — 1»	Газ	2	246	88
	ДЕ & «Хитачи»	«Южный Багдад — 2»	Газ	16	400	98
	«Сименс Иран»	«Садр»	Газ	4	640	436
	ДЕ	«Басмайя»	Газ	8	3	534
ДЕ	«Новая Басмайя»	Газ	10	2500	1800	
Бабель	ДЕ & «Хитачи»	«Хилла»	Газ	8	176	107
	ДЕ	«Хилла-2»	Газ	2	250	103
	Hitachi & NEI Parson	«Мусайиб»	Тепловой	4	1320	619
	ДЕ	«Мусайиб»	Газ	10	440	178
	АСЕС	«Хиндия»	Гидро	4	15	3,05

Район	Производитель	Наименование электростанции	Тип энергоносителя	N_G	$P_{пр}$, МВт	$P_{ср}$, МВт
Кербола	ДЕ	«Кербола»	Газ	2	250	144,7
	STX	«Восточная Кербола»	Дизель	10	440	82
	ДЕ	«Альхайрат»	Газ	10	1250	533
Наджаф	ВВС	«Наджаф»	Газ	4	280	136
	ДЕ	«Новый Наджаф»	Газ	2	250	174
	ДЕ	«Альхайдария»	Газ	5	656	446
Дивания	STX	«Восточная Дивания»	Дизель	2	100	73
	STX	«Северная Дивания»	Дизель	2	100	77
	ДЕ	«Газ Дивании»	Газ	4	500	401
Самава	ДЕ	«Газ Самава»	Газ	1	40	21,04

Примечание: N_G — число генераторов, $P_{пр}$ — проектная мощность, $P_{ср}$ — доступная мощность.

Согласно энергетическому мастер-плану для всего Ирака, была поставлена амбициозная цель добавления 24 400 МВт мощности производства электроэнергии между 2012 и 2019 годами. Этот план предполагал наличие 13 000 МВт газовой мощности, 7000 МВт тепловой мощности и возобновляемой энергии на уровне 400 МВт к 2015 году. К сожалению, эти цели не были достигнуты, в результате чего Ирак имеет лишь 14 часов ежедневного электроснабжения. Распреде-

ление установленной мощности производства показывает, что газовые турбины составляют 61 %, паровая генерация – 28 %, дизельная генерация — 3 %, а гидроэлектроэнергия составляет 8 % от мощности, как показано на рис. 1 [5, 7].

В 2017 году правительство предложило общую мощность 28 680 МВт; однако достигнутая мощность оказалась ниже — 24 020 МВт, даже с учетом включения 2 ГВт импорта из Ирана.



Рис. 1. Типы генерации в процентном соотношении

Fig. 1. Types of generation in percentage terms

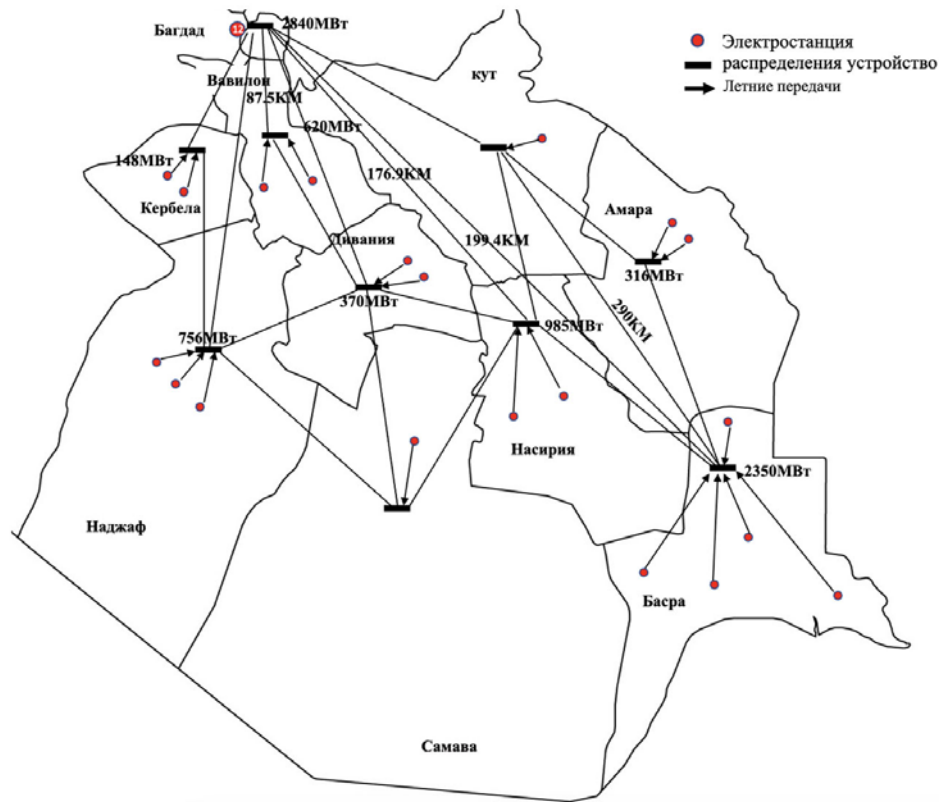


Рис. 2. Карта южной части Ирака

Fig. 2. The map of the southern part of Iraq

Рис. 2 дает визуальное представление о пространственном распределении и географическом размещении электростанций в центральных и южных регионах Ирака. Иллюстрация показывает конкретные местоположения этих станций, выделяя их присутствие и расположение в данных областях страны.

Состояние потребительства электроэнергии в южной части Ирака

Ситуацию ухудшает годовой средний прирост спроса на электроэнергию, который составляет 7 %. Следует отметить, что потребление электроэнергии превышает производство, что приводит к ограниченному доступу иракцев к электроэнергии в течение всего 5–8 часов ежедневно из-за применения

программируемых отключений между разными регионами, контролируемых Министерством электроэнергетики. Это происходит, несмотря на обещания правительства об увеличении объема производимой электроэнергии к лету 2015 года. Состояние производства и потребления электроэнергии в течение 24 часов в трех городах (Багдаде, Вавилоне, Давании) изображено на рис. 3, а, 3, б [5–7].

Для решения проблем с дефицитом в общей сети жители Ирака прибегли к альтернативным решениям, включая децентрализованные генераторы, работающие на местном уровне. Эти генераторы часто принадлежат частным инвесторам, которые поставляют электроэнергию в определенные зоны. Несмотря на то что генераторы

частично смягчают нехватку электроэнергии, вызванную недостаточной публичной сетью, стоимость электроэнергии от частных инве-

сторов выше, примерно (3 долл.) за кВт·ч, что оказывается тяжелым бременем для потребителей с доходами ниже среднего [2].

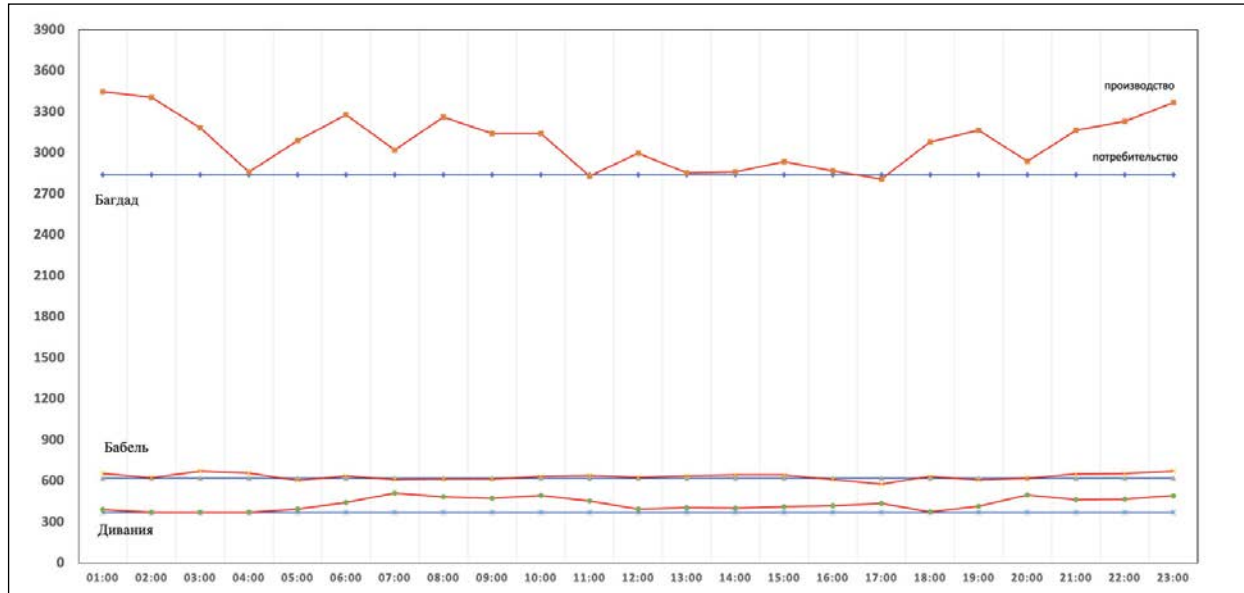


Рис. 3а. Различие между объемом производства и потребления в трех регионах (Багдад, Бабель, Дивания)

Fig. 3a. Difference between the volume of production and consumption in three regions (Baghdad, Babel, Diwaniya)



Рис. 3б. Три региона на карте (Багдад, Бабель, Дивания)

Fig. 3b. Three regions on the map (Baghdad, Babel, Diwaniya)

В ответ на это Министерство нефти предприняло меры, предоставив ограниченное количество субсидированного топлива владельцам автономных генераторов. Этот шаг направлен на смягчение финансовой нагрузки, вызванной высокой стоимостью электроэнергии. В результате владельцы этих генераторов обеспечивают минимум 10 часов электроснабжения ежедневно, а субсидирование топлива способствовало снижению цены на электроэнергию, предоставляемую частными владельцами генераторов для жилых потребителей. В настоящее время цены на электроэнергию варьируются от 4–8 долл. за кВт·ч в месяц при напряжении 220 В, в сравнении с предыдущим диапазоном (8–17 долл. за кВт·ч) [8].

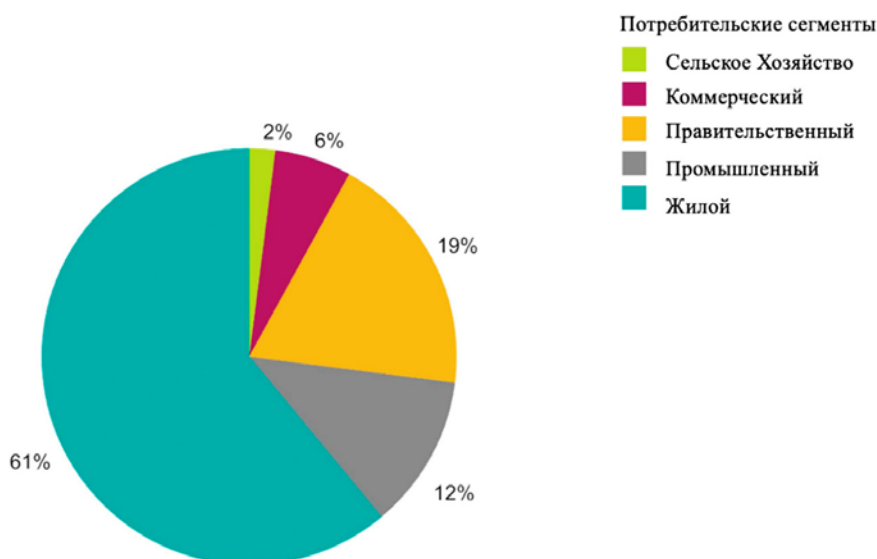


Рис. 4. Объем потребления в различных сегментах

Fig. 4. The volume of consumption in various segments

Состояние передачи и распределения электроэнергии

Передачей электроэнергии в Ираке управляют три отдельных управления, расположенных в разных регионах: Центральное управление электропередачи, Центральное управление электропередачи Евфрата и Южное управление электропередачи. В их обязанности входят техническое обслуживание и эксплуатация линий электропередачи и подстанций в центральных и южных районах страны протяженностью 16 429 км и управление высоковольтными линиями и подстанциями общей мощностью 44 000 МВА.

Для распределения электроэнергии министерство действует через шесть дирекций, созданных в соответствии с географическими местоположениями: Тавзия аль-Фурат аль-Васат, Тавзия аль-Карх, Тавзия ар-Рисафа, Тавзия аль-Васат, Тавзия ас-Садр и Тавзия аль-Джануб [2, 9]. Эти дирекции совместно обслуживают

3 275 000 конечных потребителей в 11 губернаторствах [10]. Однако система распределения находится в плохом состоянии из-за неэффективного управления и отсутствия финансирования, что приводит к техническим и нетехническим потерям. Большинство этих потерь связано с проблемами распределения, в частности с устаревшей инфраструктурой и линиями электропередачи, предназначенными для ограниченной передачи энергии на короткие расстояния.

Неэффективность операционной деятельности в распределительном секторе, включая бухгалтерский учет, выставление счетов и обслуживание клиентов, усугубила ситуацию. Акты вандализма, кражи и конфликт интересов также привели к потере пропускной способности подстанций. Эти проблемы существенно повлияли на надежность и эффективность всей электросети, что привело к авариям и снижению производительности [11, 12].

Широкое использование несанкционированных подключений без оплаты и высокий уровень неплатежей за потребление электроэнергии усугубили проблемы. Рост спроса на электроэнергию, особенно со стороны домашних пользователей для отопления и охлаждения, еще больше осложнил работу системы. Среднесуточная подача электроэнергии в дома в Ираке составляет всего 8 часов, а в большинстве мухафаз — менее 18 часов в день [13, 14].

Хотя некоторые домохозяйства имеют доступ к альтернативным источникам энергии, большинство населения по-прежнему испытывает серьезную нехватку электроэнергии, особенно внутренне перемещенные лица, получающие электричество менее 4 часов в день [14].

Реформы в секторе генерации электроэнергии

В статье представлены предложения по решению вопросов в секторе производства электроэнергии, включая восстановление существующих электростанций, введение новых установок и замену устаревшей инфраструктуры. В ней также подчеркивается необходимость увеличения инвестиций как в дополнительные генерирующие мощности, так и в секторы передачи и распределения энергии во избежание обострения проблем периодического производства энергии. Для обеспечения надежности поставок топлива в статье предлагается стратегия, направленная на использование природного газа на новых электростанциях, перевод работающих на ТМГ электростанций на газовые установки, переход на комбинированные газовые турбины и гибридизацию с солнечной энергией. Этот подход потребует 7–10 млн метрических тонн природного газа в день, что может быть достигнуто за счет привлечения неиспользованных запасов и запрета выбросов газа.

В статье описаны ключевые меры для реформирования энергетического сектора, особенно в области генерации энергии:

1. Переход от тяжелого мазута к природному газу и СГТ, стимулирование гибридных электростанций, таких как интегрированные солнечные комбинированные циклы (ИСКЦ) [15, 16].

2. Прямое внедрение возобновляемых источников, таких как ветер и солнечная энергия, как независимо, так и в гибридных схемах с ископаемыми видами топлива.

3. Постепенный вывод из эксплуатации, модернизация или приобретение устаревших энергоблоков.

4. Разработка плана расширения генерации на основе комбинированных циклов на природном газе и интегрированных солнечных комбинированных циклов (ИСКЦ).

5. Введение частных независимых производителей электроэнергии, ориентированных на открытые циклы на природном газе с возможностью интеграции СГТ в рамках плана расширения генерации.

Реформирование систем передачи и распределения электроэнергии

С учетом явного увеличения мощности генерации становится очевидным, что существующая система передачи недостаточна для обработки дополнительной нагрузки, что приводит к постоянной нестабильности системы. Эта проблема усугубляется проблемами высокого напряжения, особенно рядом с кластерами электростанций в центральных, северных и южных регионах страны. Центральный район, в частности Багдад, испытывает дополнительные высокие нагрузки, что дополнительно ограничивает пропускную способность. Министерство электроэнергетики должно придерживаться

приоритета улучшения и расширения системы передачи. Учитывая нынешнее состояние энергетического сектора Ирака, необходимо осуществить всестороннюю реформу, акцентируя внимание на улучшении инфраструктуры передачи и укреплении действий. Приобретение дополнительных высоковольтных линий рекомендуется для удовлетворения повышенного спроса на электроэнергию.

Стратегия реформирования сектора передачи включает создание новых линий передачи напряжением 400 и 132 кВ, строительство новых подстанций напряжением 400/132 и 132/33/11 кВ, реконструкцию существующих подстанций напряжением 400/132 и 132/33/11 кВ, взаимосвязь с электростанциями соседних стран (Саудовская Аравия, Турция, Иран), внедрение системы измерения сети, улучшение операционных возможностей через систему SCADA и управление диспетчеризацией.

Реформы в распределительном секторе имеют серьезные последствия из-за вертикально интегрированного характера систем производства электроэнергии. Координация и планирование имеют решающее значение для обеспечения преимуществ этих реформ. Однако для достижения желаемых результатов необходимо устранить проблемы с распределением. Необходимы срочные меры для достижения экономической устойчивости сектора распределения. В настоящее время отсутствуют система учета потребителей и устаревшие счетчики, а также широко распространены хищения электроэнергии и незаконное подключение к электросети.

По оценкам Министерства энергетики, существует большое количество незарегистрированных подключений, которые могут быть законными или иметь неисправные счетчики. Министерству следует разработать стратеги-

ческие инвестиционные планы по улучшению материальных активов сектора с уделением особого внимания замене и расширению основных объектов инфраструктуры. Необходима нормативная и законодательная политика для децентрализации энергетического сектора, внедрения ориентированного на получение прибыли предоставления услуг и поощрения более активной роли частных компаний. Для обеспечения финансовой стабильности необходимо приложить усилия по сокращению технических, коммерческих и инкассовых убытков. Реализация этой политики приведет к установке современных счетчиков и введению многолетней тарифной системы. Кроме того, следует принять меры по поддержке потребителей с низкими доходами и созданию независимого системного оператора. Также важно разработать структуры и политику соглашений о покупке электроэнергии и долгосрочных соглашений о передаче электроэнергии [8, 16].

Выводы

В общем, энергетический сектор Ирака столкнулся с низкой производительностью, особенно в областях генерации, передачи и распределения электроэнергии. Эти проблемы возникли из-за операционной и административной неэффективности, а также небрежности. В результате этого происходят значительные технические и нетехнические убытки общей суммой около 30–40 млрд долл. ежегодно. Эти проблемы усугубляются непланируемыми и нерегулируемыми расширениями в сочетании с использованием устаревшей инфраструктуры, что обуславливает перегрузку системы. Конкретно в энергетическом секторе имеются недостатки в системах тарификации, неэффективный учет, низкая скорость генерации доходов, недостаточное финансирование и неудовлетворительное управление.

С учетом этих проблем, настоящая статья проводит анализ этих вопросов и выдвигает рекомендации, направленные на повышение эффективности энергетического сектора. Одним из ключевых предложений является всесторонняя реформа энергетического сектора с акцентом на улучшение системы тарификации и учета. Этого можно достичь с помощью законодательных и регулирующих мер, позволяющих разделить энергетический сектор, а также привлечением частных компаний к трем ключевым процессам (генерация, передача и распределение) энергетического сектора для улучшения его общей производительности, особенно в части удовлетворения потребностей населения в электроэнергии. Предлагаемые реформы, описанные в данной статье, обладают потенциалом существенно сократить значительные коммерческие и технические потери, улучшить точность тарификации и сбор доходов, а также поднять общую производительность энергетического сектора.

Библиографический список

1. Reda M., Saied N., Khaldi A. et al. Iraq Electrical Power Infrastructure. Past, Present and Future Developments and Expectations // Senior Member IEEE, 2006.
2. Архив сайта Министерства электроэнергетики Республики Ирак (на арабском языке) [Электронный ресурс]. URL: https://web.archive.org/web/20090402033504/http://www.moelc.gov.iq/pages_en.aspx?id=4 (дата обращения: 06.02.2022).
3. Сайт Министерства электроэнергетики Республики Ирак (на арабском языке) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.oco.moelc.gov.iq/> (дата обращения: 06.02.2022).
4. Khazaal H. F., Alrikabi H. T. S., Abed F. T. et al. Water desalination and purification using desalination units powered by solar panels // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2019. Vol. 7, no. 3. P. 1373–1382.
5. Abass A. Z., Pavlyuchenko D. Southern Iraq gas station conversation to integrated solar combined cycle / E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 114. P. 05008: EDP Sciences.
6. Majhool M., Farhan M. S. Design and Implementation of Sunlight Tracking Based on the Internet of Things // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 877, no. 012026. P. 11.
7. Abass A. Z., Pavlyuchenko D. A., Kobobel I. V. Solar energy perspectives in Iraq // Power engineering: research, equipment, technology. 2020. Vol. 45. P. 63–70.
8. Abed F. T., Ibrahim I. A. Efficient Energy of Smart Grid Education Models for Modern Electric Power System Engineering in Iraq // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 870, no. 1. P. 012049: IOP Publishing.
9. Abass A. Z., Pavlyuchenko D. A., Balabanov A. et al. Inclusion of solar energy in Iraq gas-turbine power plants as a method of solving the country's energy system shortage // Power engineering: research, equipment, technology. 2020. Vol. 22, no. 3. P. 98–107.
10. Azeez R. A., Abdul-Hussein M. K., Mahdi M. S. et al. Design a system for an approved video copyright over cloud based on biometric iris and random walk generator using watermark technique // Periodicals of Engineering Natural Sciences. 2021. Vol. 10. № 1. P. 178–187.
11. Farhan Mohammed Hassan Majhool M. S. Enhancing the Efficiency of Solar Cell Based on the Internet of Things Applications // Wasit journal of engineering sciences. 2022. Vol. 10, no. 1.
12. Salim H. T., Jasim N. A. Design and Implementation of Smart City Applications Based on the Internet of Things / International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM). 2021. Vol. 15, no. 13. P. 4–15.
13. Majhool M. H., Alrikabi H. T. S., Farhan M. S. Using Internet of Things application for Monitoring Photo-Voltaic Panel Based on Ask Sensors Cloud / Design Engineering. 2021. P. 3884–3896.

14. Al-Rikabi H. An assessment of electricity sector reforms in Iraq // Al-Bayan Center for Planning Studies. 2017.

15. Iraq electricity master plan // P. Brinckerhoff. Baghdad: Parsons Brinckerhoff, 2010.

16. Yahya O. H., Salim H. T., Al_ airaji R. M. et al. Using Internet of Things Application for Disposing of Solid Waste // International Journal of Interactive Mobile Technologies. 2020. Vol. 14, no. 13. P. 4–18.

Дата поступления: 09.03.2024

Решение о публикации: 13.05.2024

Контактная информация:

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

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

Features of construction and operation of electric power generation devices in the southern part of Iraq

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

¹ Russian University of Transport (MIIT), 9 bld. 9, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russia

² University of Karbala, Iraq, Karbala

For citation: Alsultan M. J. J., Shevlyugin M. V. Features of construction and operation of electric power generation devices in the southern part of Iraq // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 359–369. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-359-369

Abstract

Objective: the Iraqi electricity sector is in a critical state requiring immediate reforms. The industry and the academic community have expressed concern about the system's ability to provide stable power supply and overall operational inefficiency. The energy sector is currently experiencing one of the most significant demand increases in the world, and given its capital intensity, it occupies a significant part of Iraq's government investment program. Moreover, there has been a significant increase in the financial burden on Iraq's electricity supply due to the high subsidies needed to cover current expenses. These subsidies are considered to be among the highest in the world. **Methods:** the reasoning presented in the article deals with the complex issue of the production capacities of power plants operating within the geographical boundaries of the central and southern regions of the country of Iraq, with particular attention to the paramount importance of understanding the scale and volume of energy demand existing in these aforementioned regions, as well as the multifaceted complexities associated with the diverse types of consumers who participate in the use of these energy resources. **Results:** taking into account the above-mentioned difficulties, this article examines these issues in detail and presents a number of proposals aimed directly at improving the overall efficiency of the energy sector. One of the main recommendations provides for a comprehensive reform of the energy sector, with special attention to meeting the growing demand for electricity among the population. The implementation of this proposal is expected to make significant progress in providing reliable and sustainable energy solutions to meet the ever-increasing needs of the population.

Keywords: reform, Iraqi power system, generation, distribution, metering, electrical power planning, implementation of power generation projects, multi-linear regression.

References

1. Reda M., Saied N., Khaldi A. et al. Iraq Electrical Power Infrastructure. Past, Present and Future Developments and Expectations // Senior Member IEEE, 2006.
2. Arxivsaĭta Ministerstva eĭlektroeĭnergetiki Respubliki Irak (na arabskom yazyĭke) [Eĭlektronnyĭ resurs]. URL: https://web.archive.org/web/20090402033504/http://www.moelc.gov.iq/pages_en.aspx?id=4 (data obrashheniya 06.02.2022). (In Russian)
3. Saĭt Ministerstva eĭlektroeĭnergetiki Respubliki Irak (na arabskom yazyĭke) [Eĭlektronnyĭ resurs]. URL: <http://www.oco.moelc.gov.iq/> (data obrashheniya 06.02.2022). (In Russian)
4. Khazaal H. F., Alrikabi H. T. S., Abed F. T. et al. Water desalination and purification using desalination units powered by solar panels // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2019. Vol. 7, no. 3. P. 1373–1382.
5. Abass A. Z., Pavlyuchenko D. Southern Iraq gas station conversation to integrated solar combined cycle // E3S Web of Conferences. 2019, vol. 114. P. 05008: EDP Sciences.
6. Majhool M., Farhan M. S. Design and Implementation of Sunlight Tracking Based on the Internet of Things // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 877. № 012026. P. 11.
7. Abass A. Z., Pavlyuchenko D. A., Kobobel I. V. Solar energy perspectives in Iraq // Power engineering: research, equipment, technology. 2020. Vol. 45. P. 63–70.
8. Abed F. T., Ibrahim I. A. Efficient Energy of Smart Grid Education Models for Modern Electric Power System Engineering in Iraq // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 870. № 1. P. 012049: IOP Publishing.
9. Abass A. Z., Pavlyuchenko D. A., Balabanov A. et al. Inclusion of solar energy in Iraq gas-turbine power plants as a method of solving the country's energy system shortage // Power engineering: research, equipment, technology. 2020. Vol. 22, no. 3. P. 98–107.
10. Azeez R. A., Abdul-Hussein M. K., Mahdi M. S. et al. Design a system for an approved video copyright over cloud based on biometric iris and random walk generator using watermark technique // Periodicals of Engineering Natural Sciences. 2021. Vol. 10. № 1. P. 178–187.
11. Farhan Mohammed Hassan Majhool M. S.. Enhancing the Efficiency of Solar Cell Based on the Internet of Things Applications // Wasit journal of engineering sciences. 2022. Vol. 10, no. 1.
12. Salim H. T., Jasim N. A. Design and Implementation of Smart City Applications Based on the Internet of Things / International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM). 2021. Vol. 15, no. 13. P. 4–15.
13. Majhool M. H., Alrikabi H. T. S., Farhan M. S. Using Internet of Things application for Monitoring Photo-Voltaic Panel Based on Ask Sensors Cloud / Design Engineering. 2021. P. 3884–3896.
14. Al-Rikabi H. An assessment of electricity sector reforms in Iraq // Al-Bayan Center for Planning Studies. 2017.
15. Iraq electricity master plan / P. Brinckerhoff. Baghdad: Parsons Brinckerhoff, 2010.
16. Yahya O. H., Salim H. T., Al airaji R. M. et al. Using Internet of Things Application for Disposing of Solid Waste // International Journal of Interactive Mobile Technologies. 2020. Vol. 14, no. 13. P. 4–18.

Received: 09.03.2024

Accepted: 13.05.2024

Author's information:

Mohammed Jaafar Jasim ALSULTAN —
Postgraduate Student;
1144648@edu.rut-miit.ru

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

УДК 331.453: 613.65: 613.6.027

Перспективы применения промышленных экзоскелетов на железнодорожном транспорте в качестве средств индивидуальной защиты

Ю. Н. Канонин, О. И. Тихомиров

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

Для цитирования: Канонин Ю. Н., Тихомиров О. И. Перспективы применения промышленных экзоскелетов на железнодорожном транспорте в качестве средств индивидуальной защиты // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 370–379. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-370-379

Аннотация

Цель: выявить наиболее эффективные модели промышленных экзоскелетов, определить возможность применения промышленных экзоскелетов при работах, проводимых на железнодорожном транспорте, выявить основные их недостатки и предложить варианты улучшения их конструкции. **Методы:** поиск и сравнительный анализ информации о новых промышленных экзоскелетах, применяемых в различных областях жизнедеятельности на предмет определения возможности и целесообразности их более широкого внедрения на железнодорожном транспорте. **Результаты:** произведен обзор и оценка изготавливаемых на данный момент в Российской Федерации промышленных экзоскелетов. **Практическая значимость:** выявлено, что в большинстве случаев вредные условия труда для рабочих мест на предприятиях железнодорожного транспорта обусловлены фактором тяжести труда. Влияние этого фактора можно снизить путем использования современных средств индивидуальной защиты (СИЗ) опорно-двигательного аппарата рабочих. Установлено, что перспективными СИЗ для снижения физических нагрузок являются промышленные экзоскелеты. Приведены рекомендации по их выбору для ряда профессий железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: промышленные экзоскелеты, средства индивидуальной защиты, опорно-двигательный аппарат, тяжесть труда, физические перегрузки, работники железнодорожного транспорта.

Сферы деятельности и условия труда работников железнодорожного транспорта для различных профессий отличаются большим разнообразием. От высокоинтеллектуальной деятельности до тяжелого физического труда у монтеров пути, работников восстановительных поездов, осмотрщиков вагонов, слесарей по ремонту подвижного состава, монтеров контактной сети, рабочих, занятых текущим содержанием искусственных сооружений, а также ремонтом и обслуживанием железнодорожных вагонов на пунктах технического обслуживания вагонов

и многих других. При проведении специальной оценки условий труда (СОУТ) одним из самых существенных вредных и опасных факторов является тяжесть труда.

Отнесение условий труда для конкретного рабочего места к классу условий труда по тяжести трудового процесса, как известно, осуществляется в соответствии с Методикой [1] путем оценки по целому ряду показателей: 1) физическая динамическая нагрузка; 2) масса поднимаемого и перемещаемого груза вручную; 3) стереотипные рабочие движения; 4) статическая нагрузка;

5) рабочая поза; 6) наклоны корпуса; 7) перемещение в пространстве. Общий класс условий труда устанавливается по показателю, имеющему наиболее высокий подкласс, а при наличии двух и более показателей с подклассом 3.1 или 3.2 общий класс повышается на одну степень.

В подавляющем большинстве случаев для перечисленных профессий выявленные вредные условия труда (класс 3.1 и даже выше) по результатам исследований в рамках обязательного проведения СОУТ обуславливаются именно тяжестью труда. В сводной ведомости результатов проведения СОУТ обязательно должны быть указаны рекомендуемые мероприятия по улучшению условий труда с указанием сроков выполнения. Попытаемся обосновать, что в ряде случаев именно использование экзоскелетов позволяет решить обозначенную задачу.

Не всегда мероприятия по охране труда сопровождаются экономическим эффектом поскольку обеспечение безопасности невозможно без определенных затрат. Основная цель в данном случае — это социальный эффект. Сопутствующий экономический эффект может возникнуть в результате сокращения потерь рабочего времени и соответствующих выплат в результате травм и профессиональных заболеваний опорно-двигательного аппарата (ОДА). Если рассматривать недорогие активные экзоскелеты, предназначенные для очень специфичных работ, а пассивные экзоскелеты для обычных физических работ, то последние стоят примерно 60–80 тыс. руб., что для многих предприятий вполне посильно с учетом того, что теперь экзоскелеты относятся к средствам индивидуальной защиты (СИЗ) и могут приобретаться за счет средств, выделяемых на мероприятия по охране труда.

Заболевания опорно-двигательного аппарата в результате физических перегрузок в процессе трудовой деятельности

Физические перегрузки в процессе трудовой деятельности часто приводят к заболеваниям опорно-двигательного аппарата (ОДА) из-за функционального перенапряжения и микротравм. Доля профессиональных заболеваний, связанных с нарушением работы опорно-двигательного аппарата, в России достигает 45 % [2, 3]. К заболеваниям опорно-двигательного аппарата приводят работы, связанные с поднятием и перемещением тяжестей, необходимостью длительного пребывания в фиксированной, вынужденной или в неудобной рабочей позе, с наклонами корпуса, с длительно поднятыми над головой руками или большим количеством однообразных повторяющихся движений. Часто тяжелые патологии опорно-двигательного аппарата возникают из-за несоответствия физических возможностей работников выполняемой работе. Количество заболеваний ОДА в России только за последнее десятилетие увеличилось на 30 %.

Одним из возможных вариантов решения рассмотренных проблем является применение экзоскелетов (от греческих слов «внешний» и «скелет»), разработка и применение которых изначально были связаны с военной отраслью и реабилитацией больных. В России наиболее известны медицинские экзоскелеты ExoAtlet, работы по созданию которых начались в 2011 году учеными НИИ механики МГУ, создавшими в 2013 году фирму ExoAtlet, и экзоскелеты «Компаньон» от компании Symbionix, помогающие восстановить двигательную активность людей с повреждениями спины и нижнего пояса конечностей [4].

Однако в последнее время все чаще появляется информация об использовании экзоскелетов на производстве для облегчения труда работников. Это актуально и для европейских стран, в которых тоже значительное число рабочих выполняют подъем и переноску грузов не менее четверти времени смены [5]. Аналогичная ситуация наблюдается и в РФ, где по данным [6], до 70 % работников в процессе работы вынуждены поднимать и переносить грузы, причем зачастую в стесненных условиях. Это характерно не только для целого ряда работ на железнодорожном транспорте, но и, например, для строительных, сельскохозяйственных работ, в складском и жилищно-коммунальном хозяйстве, в машиностроении, в МЧС. Среди работников железнодорожного транспорта большие физические нагрузки испытывают рабочие, занятые ремонтом подвижного состава, монтеры пути, а особенно рабочие восстановительных поездов, которым в случае аварий необходимо выполнять большой объем работ в сжатые сроки.

Опытная эксплуатация промышленных экзоскелетов на предприятиях ОАО «РЖД»

На различных предприятиях ОАО «РЖД» активно тестируют или уже внедряются промышленные экзоскелеты. Так в 2021 году в Санкт-Петербурге во время работы сетевой школы Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом ОАО «РЖД» (ЦМ) протестирован промышленный экзоскелет Exorise (рис. 1, б). Три экземпляра пассивного промышленного экзоскелета аналогичной марки были приобретены работникам железнодорожной станции

Ростов-Западный Северо-Кавказской железной дороги. Только на одной этой станции вручную ежегодно разгружается более 200 крытых грузовых вагонов. Применяемое устройство не увеличивает физическую силу, но позволяет почти на 30 % уменьшить нагрузку на позвоночник и плечевой пояс человека во время погрузки или выгрузки вагонов, что, в свою очередь, снижает риск производственного травматизма при данном виде работ. В этом устройстве используется способность рессор и эластомеров накапливать, а потом в нужный момент отдавать механическую энергию.

Пять закупленных комплектов инновационной продукции прошли опытную эксплуатацию на материальном складе станции Ярославль [7]. Модель X-Soft (российской компании Exorise) оказалась безопасной, удобной при надевании и легкой (весит всего 2,5 кг). Она не сковывает движений и позволяет наклоняться во всех направлениях. Устройство включает в себя гибкое основание повышенной прочности, распределенную систему эластомеров и корсет, предназначенный для воздействия на осанку. Цена не превышает 100 тыс. руб. Отклики от использования образцов на площадках оказались самыми положительными. Опытная эксплуатация уже началась и на Северо-Кавказской дирекции по управлению терминально-складским комплексом.

Перспективным также представляется использование модульных промышленных экзоскелетных комплексов, таких как ProEXO, производство которых началось в России с 2021 года. Этот комплекс позволяет увеличить производительность физических работ до двух раз по широкому спектру выполняемых операций.

Комплекс разработан как в пассивном исполнении (просто защищает работника от физических перегрузок), так и в активном исполнении, в котором встроенные приводящие элементы берут на себя значительную часть выполняемой физической работы [8].

В сфере производства экзоскелет можно было бы рассматривать как следующий этап развития инструментов, применяемых человеком. В дополнение к ручным инструментам стали использовать механизированные инструменты, а вот теперь и экзоскелеты.

С другой стороны, идея экзоскелета развивается из концепции, что экзоскелет — это управляемый пользователем робот, который носится на теле или плотно прилегает к нему. Его назначение заключается в выполнении некоторых действий или в снижении нагрузки на человека при выполнении этих действий. Экзоскелет способствует улучшению качества работы пользователя за счет увеличения функции их опорно-двигательного аппарата при выполнении физической работы. Экзоскелет также можно рассматривать как человеко-машинную систему. Поэтому требования к экзоскелетам приводятся в 60-й системе государственных стандартов [9, 10].

Промышленные экзоскелеты как средство индивидуальной защиты опорно-двигательного аппарата

Однако исходя из назначения, экзоскелеты логично отнести к средствам индивидуальной защиты опорно-двигательного аппарата. Поэтому совершенно оправдано и своевременно был принят национальный стандарт, в котором закрепляется это положение и приводится классификация этих СИЗ: «ГОСТ 12.4.306–2023 Средства

индивидуальной защиты опорно-двигательного аппарата. Экзоскелеты промышленные. Классификация. Термины и определения» [11].

С 1 сентября 2023 года вступил в действие Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 29.10.21 № 767н «Об утверждении норм выдачи средств индивидуальной защиты и смывающих средств» [12]. В пункте 9 этого документа («Опасность физических перегрузок») впервые говорится о необходимости применения промышленных экзоскелетов для защиты ОДА человека и приводятся опасности, от которых экзоскелеты могут защищать:

- физические перегрузки при чрезмерных физических усилиях при подъеме предметов и деталей, при перемещении предметов и деталей;

- физические перегрузки при стереотипных рабочих движениях, а также при статических нагрузках;

- физические перегрузки при неудобной рабочей позе, в том числе при наклонах корпуса тела работника более чем на 30°.

Промышленные экзоскелеты призваны компенсировать или перераспределить нагрузки, возникающие при тяжелых физических работах. В зависимости от наличия внешнего источника питания, и от того, насколько последний задействован при реализации основных функций работника, промышленные экзоскелеты подразделяются на активные, полуактивные и пассивные. Кроме этого, промышленные экзоскелеты классифицируются в зависимости от защищаемой анатомической части тела человека (верхних конечностей, нижних конечностей, шейного отдела позвоночника, грудного отдела позвоночника, пояснично-крестцового

отдела позвоночника), а также по типу физической нагрузки (статических, динамических, смешанных), от влияния которых осуществляется защита.

Направления в совершенствовании промышленных экзоскелетов

Конечно, несмотря на значительную помощь в выполнении физической работы и снижение нагрузки на ОДА, необходимо учитывать и некоторые неблагоприятные особенности экзоскелетов. Перечислим некоторые из них:

1) Соединение искусственных шарнирных жестких экзоскелетов со сложными человеческими суставами может создавать проблемы их кинематической совместимости и вызывать дискомфорт.

2) Возникают проблемы при разработке активного экзоскелета с поддержкой спины, поскольку необходимо обеспечить работнику свободу в движении, при этом используя соответствующие механизмы в нужное время. Система управления экзоскелетом должна следить за намерениями пользователя, например, с помощью электромиографических сигналов мышц человека, которые могут недостаточно верно интерпретироваться. К тому же в случае применения метода поверхностной электромиографии (ЭМГ) требуется использование электродов, непосредственно контактирующих с поверхностью тела в точке, прилегающей к целевой мышце. Такой прямой контакт может быть затруднен из-за многочисленных ремней, применяемых в экзоскелете.

3) Специализация экзоскелетов, предназначенных, например, для помощи во время подъема, может мешать другим видам деятельности, таким, например, как ходьба.

4) Увеличение габаритов работника при использовании экзоскелета из-за размещенных в них моторов, механизмов и других элементов. Это затрудняет работу в ограниченном пространстве.

При разработке новых моделей экзоскелетов необходимо, в частности, устранить и отмеченные выше недостатки.

Тем не менее, по прогнозам компании Global Industry Analysts Inc., среднегодовой мировой темп роста рынка экзоскелетов, применяемых в промышленности, составит 23,1 % в пределах 7 лет. Мировыми лидерами в разработке и внедрении экзоскелетов являются США, Канада, Япония, Китай и Германия. Но активная работа в данном направлении проводится и в России.

Промышленные экзоскелеты российских производителей

Компанией EchoAtlet для нужд МЧС разработаны экзоскелеты, позволяющие удерживать статическую нагрузку до 200 кг, а также перемещать грузы массой более 70 кг.

Кроме того, основными российскими компаниями, специализирующимися на промышленных экзоскелетах, является Дочерняя структура Госкорпорации «Ростех» — это компания «Ростех — Доверенные платформы Робототехнические Комплексы» (РТ-ДП РК) и компания «ЭкзоМед» (Курск).

Пассивные экзоскелеты ProEXO (рис. 1, а) от компании РТ-ДП РК охватывают целый спектр направлений деятельности — от доставки заказчику бутилированной воды до работ в электроэнергетике. Они служат для увеличения физических возможностей, снижения утомляемости, повышения производительности труда, снижения риска производственного травматизма. Краткая характеристика этих экзоскелетов приведена в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Краткая характеристика экзоскелетов ProEXO

Комплектация	Основное назначение и особенности
Ultra	Поддержка правильной осанки и разгрузка мышц спины при работах в наклоне. Возможно ношение как поверх верхней одежды и экипировки, так и под верхнюю одежду
Lite	Горизонтальное перемещение груза на уровне пояса без наклонов корпуса
Super Lite	Разгрузка мышц спины при работах с грузом в наклон в неудобной позе, перенос груза на расстояние
Boost	Эффективен при выполнении работ в наклоне с тяжелыми грузами до 50 кг, переносе груза, подъеме и опускании тяжестей на высоту до пояса. Распределяет нагрузку на бедра
Power	Эффективен при выполнении статических работ и переносе грузов до 50 кг, подъеме и опускании тяжестей на высоту до груди
LiteHand	Наиболее эффективен при длительном выполнении работ с руками, поднятыми над головой. Подъем и опускание тяжестей до уровня выше головы. Длительная работа руками над головой

Также компанией РТ-ДП РК производится устройство «Экзостул», имитирующее сидение на стуле и являющееся одним из элементов промышленного экзоскелета. «Экзостул» фиксирует положение коленного сустава, создавая ощущение, будто работник сидит на настоящем стуле.

Компания «ЭкзоМед» также предлагает ряд экзоскелетов (рис. 1, в). Пассивный экзоскелет EchoHeaver 3Nander имеет механический модуль, используемый для крепления тяжелого инструмента и его удержания со снижением нагрузки (так называемая «третья рука»), в том

числе с возможностью виброзащиты. Принцип действия экзоскелета основан на компенсации изгибающих моментов в суставах и передаче нагрузки с человека на механический силовой каркас. Также конструкцией предусмотрены специальные упоры, действующие подобно сиденью и снимающие нагрузку с ног оператора.

Пассивный экзоскелет EchoHeaver Low-backer с механическими компенсаторами в области спины не стесняет движений, уменьшает нагрузку на поясницу до 60 %, обеспечивает значительное снижение травматизма и рост производительности труда.



Рис. 1. Примеры промышленных экзоскелетов отечественного производства: а) экзоскелет ProEXO в комплектации Boost; б) экзоскелет X-Soft компании Exorise; в) экзоскелет EchoHeaver (в положении сидя).

Активный экзоскелет EchoHeaver Active Electric предназначен для оказания помощи при подъеме и удержании грузов и инструментов, а также для поддержания тела при необходимости длительно находиться в наклонном положении или с согнутыми ногами. Экзоскелет оснащается гравитационными компенсаторами и/или электроприводами, принимающими на себя до 90 % нагрузки. Для защиты плеч и крепления тяжелого инструмента может использоваться дополнительное оборудование.

Рекомендации по выбору СИЗ опорно-двигательного аппарата (экзоскелетов) для работников железнодорожного транспорта

В настоящее время фактор тяжести труда в ОАО «РЖД» обуславливает наибольшую часть (33,1 %) от общего количества рабочих мест с вредными условиями труда (рис. 2) [13].

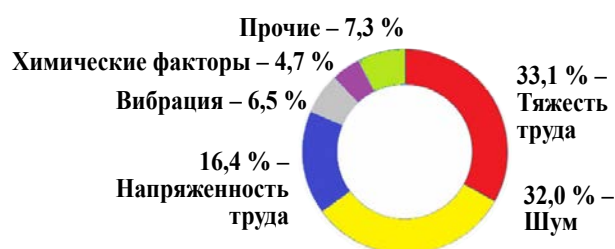


Рис. 2. Распределение рабочих мест с вредными условиями труда в ОАО «РЖД» по факторам

Тяжесть трудового процесса, характеризующаяся классом условий труда 3.1 и 3.2, на железнодорожном транспорте присуща работникам, занятым на строительстве и ремонте железнодорожных путей, работникам восстановительных поездов, слесарям по ремонту подвижного состава, осмотрщикам-ремонтникам подвижного состава, электромонтерам и многим другим профессиям.

Рассмотрим, какие СИЗ ОДА можно внедрять для снижения класса условий труда до допустимого (класс 2) у работников железнодорожных профессий (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Рекомендуемые СИЗ ОДА (экзоскелеты) для некоторых профессий железнодорожного транспорта

Профессия	Вид работ или улучшаемый параметр тяжести труда	Рекомендуемое СИЗ ОДА
Станочники (токарь, фрезеровщик и др.)	Нахождение в положении «стоя» более 60 % времени смены	«Экзостул» компании РТ-ДП РК
Слесари по ремонту подвижного состава	Нахождение в вынужденной, фиксированной или неудобной рабочей позе более 25 % времени смены	Серия ProEXO компании «ЭкзоМед»
	Работа под подвижным составом (руки подняты над головой)	LiteHand компании РТ-ДП РК
	Подъем и перемещение грузов	Power компании РТ-ДП РК
Работники восстановительных поездов	Работы по ликвидации последствий аварий и крушений поездов	Активный экзоскелет EchoHeaver Active Electric
Электромонтеры контактной сети	Работы по ремонту контактной сети	Серия ProEXO Boost
Монтеры пути	Работы по ремонту железнодорожного пути	Серия ProEXO Boost

Применение промышленных экзоскелетов представляется перспективным направлением не только для расширения (в частности усиления) физических возможностей работников, но и в качестве СИЗ опорно-двигательного аппарата рабочих ряда профессий железнодорожного транспорта, а также для уменьшения риска получения травм и снижение класса условий труда по фактору тяжести труда [14]. Сектор экзоскелетов быстро развивается, на рынок поступают новые модели и можно ожидать, что в ближайшее время они станут привычными средствами индивидуальной защиты для рабочих, занятых на тяжелых физических работах.

Библиографический список

1. Министерство труда и социальной защиты Российской Федерации. Приказ от 24.01.2014 № 33н «Об утверждении методики проведения специальной оценки условий труда, классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению».
2. Профессиональные заболевания, связанные с физическими перегрузками и функциональным перенапряжением опорно-двигательного аппарата и периферической нервной системы / Э. Ф. Габдулвалеева, Г. Г. Гимранова, А. Б. Бакиров и др. // Уфа: ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», 2016. 64 с.
3. Профессиональные заболевания, связанные с физическими перегрузками и функциональным перенапряжением опорно-двигательного аппарата // ФМБА России [Электронный ресурс]. URL: <https://cge28.ru/profzab/> (дата обращения: 01.06.2023).
4. Экзоскелет — не костюм из будущего, а необходимость. Кто и для чего производит экзоскелеты в России // RB.RU [Электронный ресурс]. URL: <https://rb.ru/longread/exoskeletons/> (дата обращения 10.10.2023).
5. European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions, Fourth European Working Conditions Survey, 2005 // Office for Official Publications of the European Communities: Luxembourg. 2007.
6. Модели и алгоритмы управления экзоскелетами промышленного назначения: монография / Яцун С. Ф., Яцун А. С., Мальчиков А. В. и др. // Курск: Юго-западный государственный университет, 2021. 143 с.
7. Экзоскелет в помощь // Газета «Северная магистраль» (Северная железная дорога) [Электронный ресурс]. URL: <https://gudok.ru/news/?ID=1595597&ysclid=ltr8dr9yk4628768564> (дата обращения 13.01.2024).
8. В России начинается выпуск дешевых промышленных экзоскелетов [Электронный ресурс]. URL: https://www.cnews.ru/news/top/2020-09-11-rosteh_nachinaet_vypusk_sverhdeshevyyh (дата обращения 28.01.2024).
9. ГОСТ Р 60.5.3.4-2023. Роботы и робототехнические устройства. Методы испытаний экзоскелетов. Оценка рабочих характеристик и безопасности экзоскелета при перемещении в ограниченном пространстве.
10. ГОСТ Р 60.5.0.2-2023. Роботы и робототехнические устройства. Экзоскелеты. Общие требования по маркировке и эксплуатационной документации.
11. ГОСТ 12.4.306-2023. Средства индивидуальной защиты опорно-двигательного аппарата. Экзоскелеты промышленные. Классификация. Термины и определения.
12. Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 29.10.21 №767н «Об утверждении норм выдачи средств индивидуальной защиты и смывающих средств».
13. Отчет об устойчивом развитии ОАО «РЖД» за 2022 год [Электронный ресурс]. URL: <https://sr2022.rzd.ru/ru/social-aspect/>

occupational-industrial-safety/improving-working-conditions (дата обращения 14.02.2024).

14. Быстров Е. Н., Харламова А. В. Обеспечение средствами индивидуальной защиты работников предприятий транспортной сферы // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2023. Т. 20, вып. 2. С. 396–403. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-396-403.

Дата поступления: 21.03.2024

Решение о публикации: 06.05.2024

Контактная информация

КАНОНИН Юрий Николаевич — канд. техн. наук, доцент; yu.n.kanonin@yandex.ru

ТИХОМИРОВ Олег Игоревич — канд. техн. наук, доцент; ot-ntb@mail.ru

Prospects for the use of industrial exoskeletons in railway transport as personal protective equipment

Yu. N. Kanonin, O. I. Tikhomirov

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

For citation: Kanonin Yu. N., Tikhomirov O. I. Prospects for the use of industrial exoskeletons in railway transport as personal protective equipment // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 370–379. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-370-379

Abstract

Purpose: to identify the most effective models of industrial exoskeletons, determine the possibility of using industrial exoskeletons for work carried out on railway transport, identify their main disadvantages and propose options for improving their design. **Methods:** search and comparative analysis of information on new industrial exoskeletons used in various areas of life to determine the possibility and feasibility of their wider implementation in railway transport. **Results:** a review and assessment of industrial exoskeletons currently manufactured in the Russian Federation was carried out. Practical significance: It has been revealed that in most cases, harmful working conditions for workplaces at railway transport enterprises are caused by the factor of labor severity. The influence of this factor can be reduced by using modern personal protective equipment (PPE) for the musculoskeletal system of workers. It has been established that industrial exoskeletons are promising PPE for reducing physical activity. Recommendations on their choice for a number of railway transport professions are given.

Keywords: industrial exoskeletons, personal protective equipment, musculoskeletal system, severity of labor, physical overload, railway workers.

References

1. Ministerstvo truda i social'noj zashhity Rossijskoj Federacii. Prikaz ot 24.01.2014 № 33n "Ob utverzhdenii metodiki provedeniya special'noj ocenki uslovij truda, klassifikatora vrednyh i (ili) opasnyh proizvodstvennyh faktorov, formy otcheta o provedenii special'noj ocenki uslovij truda i nstrukcii po ee zapolneniju". (In Russian)

2. Professional'nye zabolevaniya, svjazannye s fizicheskimi peregruzkami i funkcional'nym pere-naprjazheniem oporno-dvigatel'nogo apparata i perifericheskoy nervnoj sistemy / Je. F. Gabdulvaleeva, G. G. Gimranova, A. B. Bakirov i dr. // Ufa: FBUN "Ufimskij NII mediciny truda i jekologii cheloveka", 2016. 64 s. (In Russian)

3. Professional'nye zabolevaniya, svjazannye s fizicheskimi peregruzkami i funkcional'nym perenaprjazheniem oporno-dvigatel'nogo apparata // FMBA Rossii [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://cge28.ru/profzab/> (data obrashhenija: 01.06.2023). (In Russian)
4. Jekzoskelet — ne kostjum iz budushhego, a neobhodimost'. Kto i dlja chego proizvodit jekzoskelety v Rossii // RB.RU [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://rb.ru/longread/exoskeletons/> (data obrashhenija 10.10.2023). (In Russian)
5. European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions, Fourth European Working Conditions Survey, 2005 // Office for Official Publications of the European Communities: Luxembourg. 2007.
6. Modeli i algoritmy upravlenija jekzoskeletami promyshlennogo naznachenija: monografija / Jacun S. F., Jacun A. S., Mal'chikov A. V. i dr. // Kursk: Jugo-zapadnyj gosudarstvennyj universitet, 2021. 143 s. (In Russian)
7. Jekzoskelet v pomoshh' // Gazeta "Severnaja magistral" (Severnaja zheleznaia doroga) [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://gudok.ru/news/?ID=1595597&ysclid=ltr8dr9yk4628768564> (data obrashhenija 13.01.2024). (In Russian)
8. V Rossii nachinaetsja vypusk deshevyyh promyshlennyh jekzoskeletov [Jelektronnyj resurs]. URL: https://www.cnews.ru/news/top/2020-09-11.rosteh_nachinaet_vypusk_sverhdeshevyyh (data obrashhenija 28.01.2024). (In Russian)
9. GOST R 60.5.3.4-2023. Roboty i robototekhnicheskie ustrojstva. Metody ispytanij jekzoskeletov. Ocenka rabochnih harakteristik i bezopasnosti jekzoskeleta pri peremeshhenii v ogranichenom prostranstve. (In Russian)
10. GOST R 60.5.0.2-2023. Roboty i robototekhnicheskie ustrojstva. Jekzoskelety. Obshhie trebovaniya po markirovke i jekspluacionnoj dokumentacii. (In Russian)
11. GOST 12.4.306-2023. Sredstva individual'noj zashhity oporno-dvigatel'nogo apparata. Jekzoskelety promyshlennye. Klassifikacija. Terminy i opredelenija. (In Russian)
12. Prikaz Ministerstva truda i social'noj zashhity Rossijskoj Federacii ot 29.10.21 №767n "Ob utverzhdenii norm vydachi sredstv individual'noj zashhity i smyvajushhih sredstv". (In Russian)
13. Otchet ob ustojchivom razvitii OAO "RZhd" za 2022 god [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://sr2022.rzd.ru/ru/social-aspect/occupational-industrial-safety/improving-working-conditions> (data obrashhenija 14.02.2024). (In Russian)
14. Bystrov E. N., Harlamova A. V. Obespechenie sredstvami individual'noj zashhity rabotnikov predpriyatij transportnoj sfery // Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija. SPb.: PGUPS, 2023. T. 20, vyp. 2. S. 396–403. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-396-403. (In Russian)

Received: 21.03.2024

Accepted: 06.05.2024

Author's information:

Yurij N. KANONIN — PhD in Engineering,
yu.n.kanonin@yandex.ru

Oleg I. TIKHOMIROV — PhD in Engineering;
ot-ntb@mail.ru

УДК 620.22

Применение бентонитовой глины в качестве гидроизоляционного материала

Р. А. Майер¹, Г. Д. Якимов¹, Н. Н. Шангина¹, С. А. Самойлов²

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

² Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1

Для цитирования: Майер Р. А., Якимов Г. Д., Шангина Н. Н., Самойлов С. А. Применение бентонитовой глины в качестве гидроизоляционного материала // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21. Вып. 2. С. 380–390. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-380-390

Аннотация

Цель: аналитическое исследование возможности использования бентонита — природного минерала, обладающего высокими гидроизоляционными и адсорбционными свойствами, в различных сферах. **Методы:** использованы методы сравнительного анализа, синтеза, обобщения, аналогии. **Результаты:** в данной статье рассмотрены различные сферы применения бентонита, позволяющие позиционировать бентонит как универсальный материал, который нашел широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря своим уникальным свойствам. Отмечены преимущества бентонита перед другими гидроизоляционными материалами, включая экологичность, долговечность, эффективность и экономичность. Исследованы свойства бентонитовой глины, способность которой к набуханию и созданию гидроизоляционного барьера при контакте с водой делает ее эффективным материалом для защиты от воздействий влаги. Указано, что высокая морозостойкость бентонита обеспечивается благодаря сложной структуре материала, состоящей из атомов оксидов металлов и атомов кремния, которые образуют плотную структуру. Межслоевое пространство, в котором сосредоточены обменные катионы, является физической и физико-химической основой сорбционной активности бентонитовых глинистых пород. Установлено, что ценным качеством бентонита является его способность самозалечиваться, как и в случае использования при отрицательных температурах. Это обусловлено его молекулярной структурой. Микроскопические частицы, из которых состоит бентонит, имеют отрицательный заряд, они способны адсорбировать молекулы воды. **Практическая значимость:** гидроизоляционные работы производятся по многим направлениям строительства. При этом материалы из бентонита не используются широко. В этом аспекте в статье подробно описаны такие гидроизоляционные материалы, как бентонитовые маты, глиняный замок, инъекционная бентонитовая гидроизоляция. Авторы считают, что спрос на использование бентонита как надежного и перспективного средства гидроизоляции в строительной отрасли будет возрастать.

Ключевые слова: бентонит, гидроизоляция, эксплуатационные свойства, бентонитовые маты, глиняный замок, инъекционная бентонитовая гидроизоляция.

Введение

Бентонит — это горная порода (пластинчатая, осадочная), содержащая большое количество глинистых материалов монтмориллонитовой группы. Материал имеет хорошие сорбционные свойства.

Исторически бентонитовые глины появились около 140 млн лет назад [1]. Первым ученым, открывшим способность поглощать влагу, стал французский химик Луи-Николя Воклен в 1797 году. Он провел исследование и выявил, что при соединении воды и бентонита образуется гель, удерживающий большое количество воды. В результате этого открытия минерал получил известность и стал широко использоваться в различных отраслях промышленности [2].

Бентонит назван по имени географического места обнаружения — района форта Бентон, штат Монтана, США.

Когда бентонит вступает в контакт с водой, он начинает разбухать, в результате образуется гель (поглощает влагу), при гидратации гранулы этого материала увеличиваются примерно в 16 раз. Гель обладает высокой вязкостью и водонепроницаемостью. Описанное свойство дает возможность его использовать в различных сферах применения [6]:

1) строительство — бентонит используется в качестве добавки в бетон и другие строительные материалы для улучшения их прочности и водонепроницаемости. В сочетании с геотекстилем и другими геоматериалами бентонит может применяться для создания эффективной гидроизоляции, а также систем дренажа и фильтрации [3];

2) бурение — бентонит применяется в буровых растворах для предотвращения обвала стенок скважины и удержания грунтовых вод. Материал способствует очистке скважины от бурового шлама;

3) виноделие — используется для осветления вина, удаления осадка и улучшения его вкуса и цвета;

4) пищевая промышленность — в качестве пищевой добавки (E558) для стабилизации и загущения пищевых продуктов, таких как соусы, джемы, желе и т. д.;

5) косметика — в качестве компонента в масках для лица, шампунях, зубных пастах и других косметических продуктах. Он обладает абсорбирующими свойствами, помогает очищать кожу и волосы от загрязнений;

6) сельское хозяйство — добавка в корма для животных, так как он улучшает их пищеварение и усвоение питательных веществ;

7) очистка воды — в системах очистки воды для удаления тяжелых металлов, органических загрязнений и других вредных веществ;

8) производство бумаги — материал используется в процессе производства бумаги для улучшения ее качества и прочности;

9) производство керамики — в качестве добавки в глину для улучшения ее пластичности и прочности;

10) геотехника — для стабилизации грунтов и предотвращения оползней.

Перечисленные направления не полностью охватывают сферы применения бентонита. Таким образом, бентонит — это универсальный материал, который нашел широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря своим уникальным свойствам.

Важно отметить, что процесс набухания бентонита при контакте с водой является обратимым. При высыхании бентонит возвращается к своему первоначальному состоянию. Это делает его удобным

для использования в различных условиях и позволяет повторно использовать его после высыхания. В данной работе рассматривается использование бентонита в строительстве.

Эксплуатационные свойства бентонита

К преимуществам бентонита по сравнению с другими материалами для гидроизоляции относятся:

— универсальность использования. Бентонит подходит для различных типов поверхностей, таких как бетон, кирпич, металлы и дерево; пригоден в различных сферах строительной отрасли;

— эффективность. Имеет способность создавать водонепроницаемый барьер, удерживать воду и не допускать проникновения влаги через поверхности, на которые он был нанесен. В результате гидратации возможно увеличение в объеме до 16 раз. В некоторых случаях нет аналогов этому материалу [2];

— экологическая безопасность. Являясь природным материалом, бентонит потенциально не содержит вредных химических компонентов и не выделяет токсичные испарения. Он безопасен при контакте с питьевой водой и пищей. Если брать во внимание возможное влияние бентонита на окружающую среду, то материалы, произведенные на его основе, являются предпочтительными в случаях, когда требуется минимизировать вред окружающей среде;

— эксплуатация в условиях агрессивных сред. Данный материал обладает высокой резистентностью к воздействию таких сред, как кислоты, щелочи и соли. Он целесообразен для использования в тех условиях, когда другие гидроизоляционные материалы будут подвержены коррозии

и другим видам разрушений. Одно из направлений использования бентонита — захоронение радиоактивных отходов. Данный материал используется в качестве наполнителя, он обеспечивает удержание радиоактивных веществ и препятствует их распространению. Есть сведения, что бентонит смешивается с радиоактивными отходами и полученная смесь помещается в специальные контейнеры для последующего хранения (захоронения) [5];

— простота использования. Материал используется как в виде порошка, так и в виде готовых гидроизоляционных материалов. Легко смешиваясь с водой, он образует однородную массу (пасту), которая легко наносится на любые поверхности. Удобство использования не требует специальных навыков, то есть возможно использование при разном уровне квалификации сотрудников;

— долговечность. Сохраняя гидроизоляционные свойства на протяжении длительного периода времени, материал устойчив к воздействию ультрафиолетовых лучей, скачкам температуры, колебаний и другим разрушающим внешним факторам;

— экономичность. Бентонит альтернативен таким материалам для гидроизоляции, как полимеры, битумные мембраны. В настоящее время бентонит имеет более конкурентоспособную стоимость, привлекательную для потребителей. Материал может быть использован повторно после высыхания, что делает его еще более доступным и повышает экономическую эффективность;

— ремонтпригодность. В случае возникновения повреждений и необходимости ремонта гидроизоляции, выполненной из бентонита, не требуется дополнительных

усилий или восстановления. Демонтаж и замена в данном случае не требуются. Алгоритм проведения ремонта в стандартной ситуации — это создание нового слоя бентонита поверх имеющегося слоя. В этом случае возможно смешать дополнительную порцию бентонита с водой до получения густой пасты. Полученная паста затем наносится на имеющуюся поверхность с помощью простых строительных инструментов, таких как шпатель или валик [5].

Простота использования делает бентонит привлекательным для использования в самых разных отраслях промышленности.

Морозостойкость является отличительной характеристикой бентонита. Способность материала сохранять свои свойства при циклах замораживания/размораживания позволяет использовать бентонит в сложных климатических условиях, в том числе с переменными суточными температурами, например при строительстве различных сооружений (в том числе дорог, мостов, зданий и т. д.).

Морозостойкость бентонита зависит от марки, степени дисперсности. В целом следует отметить, что в некоторых условиях эксплуатации должны быть рассмотрены марки бентонита с учетом требования к отрицательным температурам, гарантирующим надежность применения в случаях повышенной морозостойкости.

Важно указать, что высокая морозостойкость бентонита обеспечивается благодаря сложной структуре материала, состоящей из атомов оксидов металлов и атомов кремния, образующих плотную структуру. В ней имеется межслоевое пространство, в котором сосредоточены обменные катионы. Это является физической и физико-химической основой сорбционной актив-

ности бентонитовых глинистых пород. После превращения воды в лед, а именно замерзания, вода расширяется, и это могло бы привести к разрушению гидроизоляционного материала. В случае использования бентонита из-за его плотной структуры обеспечивается препятствие проникновению воды внутрь. Именно это гарантирует устойчивость бентонита к разрушению в случае замораживания и оттаивания. Дополнительно надо отметить, что бентонит может расширяться и сжиматься без разрушения. Это еще одно качество, которое положительно его характеризует и также учитывается при использовании в случае отрицательных температур (морозостойкость) [7].

Ценным качеством бентонита является его способность самозалечиваться, как и в случае использования при отрицательных температурах. Это обусловлено его молекулярной структурой. Микроскопические частицы, из которых состоит бентонит, имеют отрицательный заряд, они способны адсорбировать молекулы воды. При смешивании с водой бентонит увеличивается в объеме и полученная смесь заполняет повреждения (трещины, сколы и т. д.) в структуре материала [4].

Процесс происходит путем электростатического притяжения молекул воды и отрицательно заряженных частиц бентонита. То есть вода проникает в микротрещины, вступает в контакт с бентонитом, вследствие чего материал расширяется и заполняет повреждения [4].

Самозалечивание бентонита — это свойство, которое обеспечивает эффективность применения данного материала в гидроизоляции и других областях, где требуется устойчивость к воздействию влаги.

Виды гидроизоляционных материалов на основе бентонита

Существует ряд гидроизоляционных материалов, производимых на основе бентонита:

1. Бентонитовые маты (геосинтетические рулонные материалы) — это своего рода каркас из полипропиленовых волокон, внутри помещены гранулы активированного натриевого бентонита. Каркас бентонитового мата (см. рис. 1), в соответствии с классификацией ГОСТ Р 55028 материал относят к глиноматам с функцией гидроизоляции. Принцип бентонитовых матов основан на свойстве бентонита, которое при полной гидратации в свободном состоянии позволяет материалу разбухать и увеличивается в объеме. В случае ограничения свободного пространства в присутствии воды создается напряженное состояние в структуре образующегося геля, за счет которого обеспечивается водонепроницаемость материала [4].

Бентонитовые маты в большинстве случаев представлены в виде достаточно простой трехслойной конструкции, соединенной иглопробивным способом, состоящей:

- из нетканого полипропиленового полотна;
- из гранулированного бентонита;
- из тканого геотекстиля.

Текстильные материалы выполняют роль барьера, который не позволяет бентониту растекаться при переходе в гелеобразное состояние, и поддерживают целостное состояние всей гидроизоляционной конструкции. Более того, благодаря этим материалам конструкция может многократно менять свою форму и имеет способность самозалечиваться.

Бентонитовые маты являются самым распространенным способом применения бентонита в качестве гидроизоляционного материала.

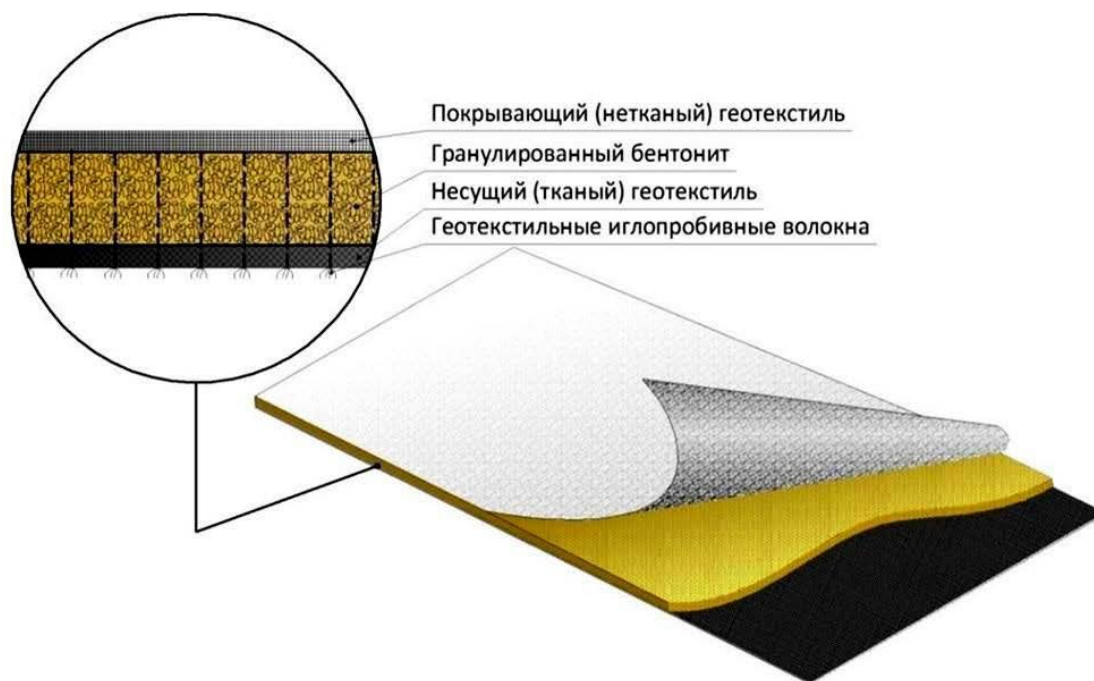


Рис. 1. Конструкция бентонитового мата
(источник: <https://polyline.ru/>)

2. Глиняный замок — это один из видов гидроизоляции, который используется для защиты фундаментов, подвалов и других строительных конструкций от воздействия влаги. Он заключается в создании слоя глины вокруг здания или сооружения, который препятствует проникновению воды (рис. 2).

Для устройства подобного вида гидроизоляции применяется сухая смесь на основе бентонитовых глин, как правило, для улучшения физико-химических свойств, полимерного композита, фракционированных песков и в некоторых случаях химических добавок. В результате получается гидро-

изоляционный слой, который при взаимодействии с водой образует высокоэффективный и экологически чистый материал [10]. Такой материал обладает следующими отличительными качествами:

- стойкость к размытию грунтовыми водами и растрескиванию;
- неограниченное количество циклов гидратации/дегидратации и легко переносит смену сезонов;
- сохранение барьерных свойств в течение всего периода эксплуатации сооружения;
- незначительные финансовые затраты на обустройство.



Рис. 2. Устройство глиняного замка с применением бентонитовых глин
(источник: <https://kalmatron.ru/>)

3. Инъекционная бентонитовая гидроизоляция представляет собой инъекционные смеси на основе гранулированной смеси натриевого бентонита (монтморрилонит не менее 90 %) и полимерных доба-

вок, существенно улучшающих свойства инъекционных бентонитовых растворов. При смешивании с водой такие смеси образуют вязкие инъекционные растворы, которые закачиваются в грунт за внешний

контур подземной конструкции при помощи насосов низкого давления (например, штукатурных станций). Схема устройства гидроизоляции методом законтурного инъецирования с применением глинистых растворов представлена на рис. 3. Примерно через 8 часов за внешним контуром защищаемого сооружения образуется гелевая оболочка – толстый водонепроницаемый и водостойкий изоляционный слой, не размываемый водой. Надолго или навсегда предохраняет конструкцию от замачивания [8].

Специальные бентонитовые инъеционные порошки можно использовать как для герметизации протечек в бетоне, так и при остановке водопритоков

в кирпичной и каменной кладке, а также при кладке из газобетонных и керамзитобетонных блоков и т. п. Это свойство делает бентонитовые инъеционные порошки незаменимыми при восстановлении гидроизоляции подземных сооружений, а также фундаментов и стен жилых и общественных зданий старого фонда, когда раскопка фундаментов нежелательна, а гидроизоляция изнутри подвальных помещений не спасает конструкции фундаментов от последующего разрушения и капиллярного подсоса влаги [8].

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики различных видов гидроизоляции, применяемых при устройстве фундаментов и подземных сооружений.

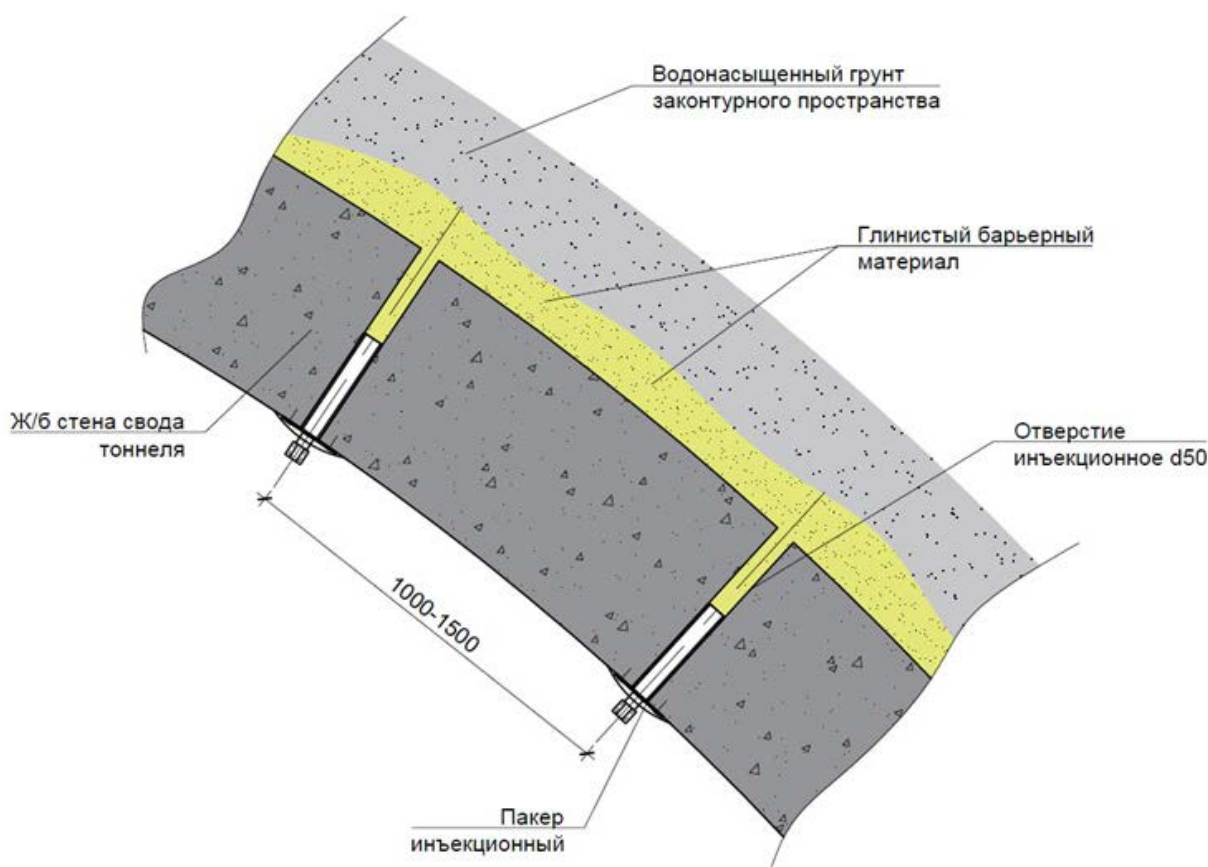


Рис. 3. Схема устройства гидроизоляции методом законтурного инъецирования с применением растворов на основе бентонита

ТАБЛИЦА 1. Сравнительные характеристики оклеечной, обмазочной и бентонитовой гидроизоляций

Характеристики	Обмазочная гидроизоляция	Оклеечная гидроизоляция	Бентонитовые маты
Срок службы	Ограничен (до 10 лет), после чего материал становится хрупким и неэластичным, возможно отслаивание от поверхности	Ограничен (до 10 лет)	Неограничен (ограничен долговечностью самого сооружения)
Устойчивость к агрессивным воздействиям	Средняя	Средняя	Средняя (при дополнительной полимеризации материал устойчив к морской воде)
Влияние низких (высоких) температур на материал	Многочисленный цикл замораживания/оттаивания (водопоглощение до 2 % в течение суток) ухудшает свойства материала	Ухудшает свойства материала	Многочисленный цикл замораживания/оттаивания не влияет на свойства
Влияние погодных условий во время строительства	Высокая зависимость	Высокая зависимость (проводить работы необходимо при положительной температуре)	Отсутствует
Требования к технологии и качеству работ	Высокие требования к соблюдению технологии работ	Высокие требования к соблюдению технологии работ	Незначительные требования
Ремонтопригодность	Ремонт связан с высокими трудовыми и материальными затратами	Ремонт связан с высокими трудовыми и материальными затратами	Эффект самозалечивания
Специальная подготовка поверхности перед нанесением	Требуется (перед нанесением поверхность необходимо покрыть слоем специальной грунтовки)	Требуется (поверхность должна быть сухой и прогрунтована эмульсией из битума)	Не требуется (поверхность может быть влажной и даже мокрой)
Количество наносимых слоев	От нескольких миллиметров до нескольких сантиметров (зависит от состояния поверхности)	В зависимости от напора воды (от 2 до 4 слоев)	1 слой
Дополнительные операции	Полив водой, укрытие полиэтиленовой пленкой (в случае использования материалов на цементной основе)	Обработка стыков (сварка или склейка), сушка (выдержка) оклеечного покрытия	Не требуется

Заключение

Спрос на использование бентонита в качестве средства гидроизоляции растет с каждым годом. Это связано с тем, что все больше людей осознают важность защиты своих зданий от негативного воздействия влаги на конструкции. Кроме того, использование бентонита позволяет существенно снизить затраты на ремонт и обслуживание зданий и сооружений в ходе эксплуата-

ции, что также является важным фактором при выборе материала для гидроизоляции.

Бентонит обладает уникальными свойствами, которые делают его незаменимым в ряде строительных задач, таких как обеспечение надежной гидроизоляции, устойчивость к воздействию агрессивных сред, обеспечение экологической безопасности, обеспечение длительности срока эксплуатации.

Таким образом, можно констатировать, что данный материал является перспективным в использовании по прямому назначению для обеспечения долговечности гидроизоляции, который не требует дополнительных затрат при эксплуатации. Учитывая, что в настоящее время в строительстве есть задачи обеспечить надежность строительных объектов в условиях влажности, бентонит перспективно будет все более востребованным в строительной отрасли.

Библиографический список

1. Лыгина Т. З., Сабитов А. А., Трофимова Ф. А. и др. Бентониты и бентонитоподобные глины: классификация, особенности состава, физико-химические и технологические свойства // Казань: издательство ЦНИИ геологии нерудных полезных ископаемых, 2005. 72 с.
2. Арифжанов А. М., Жураев Ш. Ш. Исследование водопроницаемости бентонита // Наука и мир, 2019. С. 33–35.
3. Кадырова З. Р., Сабиров Б. Т., Усманов Х. Л. и др. Гидроизоляционные материалы на основе бентонитовых глин новых месторождений Узбекистана // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. № 3. 2015. С. 16–19.
4. Кукарина Е. Е. Применение бентонитовых матов в качестве гидроизоляционных материалов в строительстве // Тенденции развития науки и образования. № 70 (2). 2021. С. 39–42.
5. Яковлев В. А., Степанов О. Н. Современные методы гидроизоляции // Твердые бытовые отходы. № 3. 2016. 19 с.
6. Завьялов С. В. Геосинтетика на основе бентонита // Башкирский экологический вестник. № 3–4. 2013. С. 20–26.
7. Каримов Э. М. Использование бентонитовой глины в качестве гидроизоляционного материала для основания и откосов автомобильной дороги южного региона Кыргызстана // Инженерный вестник Дона. № 2. 2018. С. 174.
8. Шилин А. А. Гидроизоляция подземных и заглубленных сооружений: выбор материалов // Технологии строительства. № 1. 2001. С. 40–42.
9. ООО «БентИзол»: производство геосинтетических бентонитовых материалов. [Электронный ресурс]. URL: <https://bentizol.ru>. URL: <https://bentizol.ru> (дата обращения: 10.05.2024).
10. ООО «Кальматрон-СПБ»: производство гидроизоляционных материалов. [Электронный ресурс] URL: <https://kalmatron.ru> (дата обращения: 10.05.2024).

Дата поступления: 01.04.2024

Решение о публикации: 06.05.2024

Контактная информация:

МАЙЕР Роман Алексеевич — аспирант кафедры

«Строительные материалы и технологии»;

romamayer1998@mail.ru

ЯКИМОВ Глеб Дмитриевич — аспирант кафедры

«Строительные материалы и технологии»;

gleb981@yandex.ru

ШАНГИНА Нина Николаевна — докт. тех. наук,

профессор кафедры «Строительные

материалы и технологии»;

nina.shangina@gmail.com

САМОЙЛОВ Сергей Александрович — студент

4-го курса горно-нефтяного факультета УНГТУ;

samoylovs@cloud.com

Use of bentonite clay as waterproofing material

R. A. Mayer¹, G. D. Yakimov¹, N. N. Shangina¹, S. A. Samoilo²

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

² Ufa State Petroleum Technical University, 1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia

For citation: Mayer R. A., Yakimov G. D., Shangina N. N., Samoilo S. A. Use of bentonite clay as a waterproofing material // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 380–390. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-380-390

Abstract

Purpose: analytical study of usability bentonite is a natural mineral with high waterproofing and adsorption properties in various fields. **Methods:** methods of comparative analysis, synthesis, generalization, analogy were used. **Results:** this article examines various applications of bentonite, allowing to position bentonite as a universal material, which is widely used in various industries due to its unique properties. The advantages of bentonite over other waterproofing materials are noted, including environmental friendliness, durability, efficiency and economy. The properties of bentonite clay have been studied, the ability of which to swell and create a waterproofing barrier in contact with water makes it an effective material for protection against moisture. It is indicated that the high frost resistance of bentonite is ensured due to the complex structure of the material consisting of metal oxide atoms and silicon atoms, which form a dense structure. The interlayer space in which the exchange cations are concentrated is the physical and physicochemical basis for the sorption activity of bentonite clay rocks. Bentonite has been found to be of value in its self-healing properties, as is the case when used at negative temperatures. This is due to its molecular structure. The microscopic particles that make up bentonite have a negative charge, they are able to adsorb water molecules. **Practical significance:** waterproofing works are carried out in many areas of construction. However, bentonite materials are not widely used. In this aspect, the article describes in detail such waterproofing materials as bentonite mats, clay lock, injectable bentonite waterproofing. The authors believe that the demand for the use of bentonite as a reliable and promising means of waterproofing in the construction industry will increase.

Keywords: bentonite, waterproofing, performance properties, bentonite mats, clay lock, injectable bentonite waterproofing.

References

1. Lygina T. Z., Sabitov A. A., Trofimova F. A. i dr. Bentonity i bentonitopodobnye gliny: klassifikaciya, osobennosti sostava, fiziko-himicheskie i tekhnologicheskie svoystva. // Kazan': izdatel'stvo CNII geologii nerudnyh poleznyh iskopaemyh, 2005. 72 s. (In Russian)
2. Arifzhanov A. M., Zhuraev Sh. Sh. Issledovanie vodopronicaemosti bentonita // *Nauka i mir*, 2019. S. 33–35. (In Russian)
3. Kadyrova Z. R., Sabirov B. T., Usmanov H. L. i dr. Gidroizolyacionnye materialy na osnove bentonitovyh glin novyh mestorozhdenij Uzbekistana // *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*. № 3. 2015. C. 16–19. (In Russian)
4. Kukarina E. E. Primenenie bentonitovyh matov v kachestve gidroizolyacionnyh materialov v stroitel'stve // *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya*. № 70 (2). 2021. C. 39–42. (In Russian)
5. Yakovlev V. A., Stepanov O. N. Sovremennye metody gidroizolyacii // *Tverdye bytovye othody*. № 3. 2016. 19 s. (In Russian)
6. Zav'yalov S. V. Geosintetika na osnove bentonita // *Bashkirskij ekologicheskij vestnik*. № 3–4. 2013. C. 20–26. (In Russian)
7. Karimov E. M. Ispol'zovanie bentonitovoj gliny v kachestve gidroizolyacionnogo materiala dlya osnovaniya i otkosov avtomobil'noj dorogi yuzhnogo regiona Kyrgyzstana // *Inzhenernyj vestnik Dona*. № 2. 2018. C. 174. (In Russian)

8. Shilin A. A. Gidroizolyaciya podzemnyh i zaglublennyh sooruzhenij: vybor materialov // Tekhnologii stroitel'stva. № 1. 2001. С. 40–42. (In Russian)

9. ООО “ BentIzol”: proizvodstvo geosinteticheskikh bentonitovyh materialov. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://bentizol.ru>. URL: <https://bentizol.ru> (data obrashcheniya: 10.05.2024). (In Russian)

10. ООО “Kal'matron-SPB”: proizvodstvo gidroizolyacionnyh materialov. [Elektronnyj resurs] URL: <https://kalmatron.ru> (data obrashcheniya: 10.05.2024). (In Russian)

Received: 01.04.2024

Accepted: 06.05.2024

Author's information:

Roman A. MAYER — graduate student of the Department of Construction Materials and Technologies;

romamayer1998@mail.ru

Gleb D. YAKIMOV — graduate student of the Department of Construction Materials and Technologies;

gleb981@yandex.ru

Nina N. SHANGINA — PhD in Engineering; nina.shangina@gmail.com

S. A. SAMOILOV — Student;

samoylovs@cloud.com

УДК 504:691:614.8.086.5

Перспектива переработки отвальной породы угольных шахт с последующим применением в строительстве

Е. И. Верех-Белоусова¹, А. В. Харламова²

¹ ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», Россия, 291034, ЛНР, Луганск, кв. Молодежный, 20а

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

Для цитирования: *Верех-Белоусова Е. И., Харламова А. В.* Перспектива переработки отвальной породы угольных шахт с последующим применением в строительстве // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 391–397. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-391-397

Аннотация

Цель: исследование и обоснование перспектив переработки отвальной породы угольных шахт Луганской Народной Республики с дальнейшим ее применением в строительной индустрии. **Методы:** проводился отбор проб отвальной породы с последующим лабораторным исследованием: содержания Al_2O_3 (до 22 %) и общей серы (до 4 %) в пробах породы различной степени метаморфизма, показателей ее пластичности и радиационных характеристик (до 220 Бк/кг). **Результаты:** рассмотрены вопросы переработки породных отвалов угольных шахт Луганской Народной Республики в качестве сырья для производства строительных материалов. Проведен краткий анализ существующих на сегодняшний день способов получения различных строительных материалов из отвальных пород. Лабораторные данные, полученные после проведенных исследований проб отвальной породы ряда шахт, доказывают возможность использования углеотходов в гражданском, промышленном и дорожном строительстве. **Практическая значимость:** проведенные исследования и детальный анализ различных показателей и свойств отходов угледобычи Луганской Народной Республики, включая удельную эффективную активность и коэффициент эманирования, делают возможным применение отвальной породы в качестве сырья в строительной отрасли при производстве материалов для промышленного, гражданского и дорожного строительства.

Ключевые слова: отвальная порода, отвалы угольных шахт, сырье, отходы, переработка, утилизация, строительные материалы.

Введение

На территории Луганской Народной Республики (ЛНР) располагается участок Донецкого угольного бассейна и функционирует значительное количество предприятий угольной промышленности, которые, в свою очередь, являются источниками интенсивного химического загрязнения окружающей среды. Добыча угля в регионе осуществляется преимущественно подземным способом с изъятием и отчуждением

значительных по размеру земельных угодий для складирования отвальной пустой породы. Количество таких насыпей (отвалов и терриконов) только возрастает и на данный момент достигает уже порядка 556. Суммарная площадь отчужденных под них земель составляет 4,8 тыс. га и дополнительно включает 250 плановых накопителей площадью 980 га. Все это приводит не только к отчуждению больших территорий,

но и к интенсивному загрязнению прилегающих к отвалам земель тяжелыми металлами, соединениями серы и другими химическими соединениями. Альтернативой для урегулирования существующей проблемы может стать переработка отвальной породы с дальнейшим ее использованием как сырья для производства стройматериалов промышленности, которая, в свою очередь, характеризуются высокой материалоемкостью и позволит утилизировать техногенные отходы угледобычи (породные отвалы и терриконы).

Отечественная и мировая стройиндустрия все в большей степени ориентируется на производство строительных материалов из техногенных отходов, так как требования к эффективности экономики, а также имеющийся на данный момент уровень экологической безопасности диктуют правила все более комплексного и рационального использования ресурсов, что закономерно повысит уровень их эффективного применения и снизит негативное воздействие на окружающую среду.

На сегодняшний день в стране поддается переработке около 20 % от всей ежегодной выработки отвальной породы, и не получило активного внедрения ее использование для производства строительных материалов [1]. Известно, что на материальные ресурсы, заложенные в смету стоимости изготовления стройматериалов, приходится более 55 % затрат. Таким образом, вполне целесообразно применение отходов угледобывающей отрасли промышленности как сырья для производства строительных материалов. Тем более внедрение таких малоотходных технологий будет способствовать улучшению состояния окружающей природной среды и уменьшению объемов накопленных отходов [2, 3].

Отходы угледобычи состоят из различных горных пород: алюмосиликатов, глинистых сланцев, полевых шпатов, пирита, марказита и др. В составе отвальной породы широко распространены следующие химические соединения: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , а общее содержание серы не превышает 4 % [3, 4]. Кроме того, в результате развития эндогенных термических процессов внутри отвала запускается цепь реакций биохимического превращения отвальной породы, то есть порода подвергается процессу горения при температуре до 1000 °С. Такая горелая порода обогащена каолином и другими новыми техногенными минералами, которые могут активно использоваться в строительстве.

Все это делает возможным рассматривать углепородные отвалы и терриконы шахт как техногенное сырье для производства строительных материалов.

Целью работы является исследование и обоснование перспектив переработки отвальной породы угольных шахт с дальнейшим ее применением в строительной индустрии на примере Донецкого угольного бассейна региона ЛНР.

В качестве объекта исследований были выбраны восемь породных отвалов шахт Донецкого угольного бассейна, расположенных на территории Луганской Народной Республики. В частности, отбирались пробы отвальной породы отходов шахт в городах: Стаханов («Максимовская», «шахта им. Ильича»), Зимогорье («Черкасская»), Луганск («Луганская»), Лутугино («Машенская»), Лисичанск («Матросская»), Свердловск («Шахта им. М. Свердлова») и Антрацит («Шахта им. Г. Вахрушева»).

Материалы и методы

Отбор проб отвальной породы осуществлялся согласно утвержденной в Российской Федерации методике апробирования пород отвалов [1, 5]. По данной методике для анализа отбиралась первичная проба (внешний поверхностный слой), состоящая из порционных проб.

Химический состав отвальной породы исследуемых угольных шахт региона по минеральному составу входящих в породу компонентов соответствует существующим требованиям, которые предъявляются к химическому составу глинистого сырья, обычно используемого в качестве пористых заполнителей. Однако существует ряд ограничений, который сделает невозможным такое применение, так как будет значительно ухудшаться качество строительных материалов: высокое содержание общей серы в составе отвальной породы на уровне более 4 % и высокое содержание органического углерода при значениях в составе более 20 %.

Так как отвальная порода может проходить различные стадии метаморфизации, то и процентное соотношение данных показателей будет неоднородным в зависимости от степени превращения породы. В связи с этим исследовано содержание общей серы (S_t^d) в отобранных образцах с учетом данного критерия.

Результаты

Полученные в ходе лабораторного опыта данные по содержанию общей серы в отвальной породе угольных шахт (табл. 1) показывают, что $S_t^d < 4\%$ по всем пробам в учетом стадии метаморфизации, то есть по данному показателю не создается ограничений по применению отвальной породы как строительного сырья.

ТАБЛИЦА 1. Содержание общей серы (S_t^d) в зависимости от стадии метаморфизма отвальной породы в исследуемых образцах

Стадия метаморфизма отвальной породы	Содержание S_t^d , %
Слабая	3,6
Средняя	1,48
Сильная	0,57

После отсыпки на отвалах угольных шахт происходят процессы горения отвальной породы. С течением длительного времени эти процессы постепенно затухают и окончательно завершаются. Такая отвальная порода будет относиться к полностью горелой (перегоревшей) породе, имеющей следующие свойства: высокую адсорбционную активность, за счет значительной микропористости, высокое содержание оксидов алюминия и, напротив, низкое — оксидов железа. Данные характеристики свидетельствуют о том, что отвальная порода угольных шахт применима в строительной отрасли промышленности как заполнитель в бетонах, что позволит минимизировать применение вяжущих средств, также подходит в качестве наполнителя для мастик, что повысит их твердость [1, 6, 7].

Для создания жаростойких бетонов может использоваться отвальная порода, которая имеет в составе $Al_2O_3 > 14\%$, так как этот показатель характеризует жаропрочность породы. В связи с чем было проведено исследование образцов отвальной породы угольных шахт ЛНР на валовое содержание Al_2O_3 , полученные результаты сведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Валовое содержание Al_2O_3 в исследованных образцах отвальной породы

Шахта	Отвальная порода	Содержание Al_2O_3 , %
г. Свердловск	Горелая	20,87
г. Луганск	Негорелая	13,79
г. Антрацит	Горелая	19,80
г. Лисичанск	Горелая	18,30

По результатам установлено, что перегоревшие отвальные породы исследованных шахт могут применяться с добавлением связующих материалов для изготовления жаропрочных бетонов.

Кроме того, на основании выполненных исследований установлено, что полностью перегоревшие отвальные породы после измельчения могут служить наполнителями для бетонов и растворов. В угледобывающих районах Луганской Народной Республики также целесообразно применять в подземных выработках крепежные блоки из бетонов разного веса и размера, выполненных на основе горелой измельченной породы. Таким образом, угледобывающее предприятие может частично утилизировать свои отходы угледобычи для собственных строительных нужд.

По своему минеральному составу отвальная порода сразу после отсыпки обычно характеризуется наличием глин, песчаников, аргиллитов, сланцев, песка, алевролитов, которые используются в качестве сырья для производства стройматериалов [1, 3].

Глины и сланцы, находящиеся в составе отвальной породы угольных шахт, способствуют формированию ее пластичности, что, в свою очередь, повышает возможность дальнейшего использования в строительстве. В табл. 3 представлены полученные данные по пластичности, грубо измельченной горелой и негорелой отвальной породы в исследованных образцах.

По полученным результатам пластичности различных дисперсных фракций породы (включая перегоревшую и неперегоревшую) видно, что в ней обнаруживаются литифицированные глины. В случае их тонкого измельчения (< 1 мм) они вполне применимы при производстве керамических материалов [8].

Также является экономически оправданным применение отвальной пустой породы шахт и в дорожном строительстве при отсыпке автодорог, устройства тротуаров, насыпных грунтов и т. п.

Важным фактором ограничения применения отвальной породы угольных шахт для производства стройматериалов может стать высокая радиоактивность отвальной породы [9]. Учитывая нормы радиационной безопасности при производстве строительных материалов [10], в частности из отходов добычи угля, проведено измерение удельной эффективной активности ($A_{эфф.}$) отобранных образцов (табл. 4) на основании активности цезия — 137, тория — 232, радия — 226, калия — 40 и коэффициента эманирования ($k_{эм}$) отвальной породы (рис. 1) на примере угольного аргиллита шахты «Черкасская».

ТАБЛИЦА 3. Пластичность отвальной породы в исследованных образцах

Отвальная порода	Группа пластичности	Пластичность		
		Число пластичности, %	Предел раскатывания, %	Нижний предел текучести, %
Негорелая	Умеренно пластичная	11,22	20,03	31,25
Горелая	Умеренно пластичная	10,34	19,8	30,14

ТАБЛИЦА 4. Полученные данные в ходе гамма-спектрометрического исследования образцов отвальной породы

Расположение шахты	Место отбора образца	A_{Cs-137} , Бк/кг	A_{Th-232} , Бк/кг	A_{Ra-226} , Бк/кг	A_{K-40} , Бк/кг	$A_{эфф}$, Бк/кг
г. Стаханов	Шахта «Максимовская» — перегоревшая отвальная порода	0,9	29,2	29,7	306,7	95,3
	шахта «им. Ильича» — отвальная порода	1,5	43,9	44,8	395,1	137,4
г. Зимогорье	шахта «Черкасская» — аргиллит из отвала	0,5	68,3	56,1	813	218,1
	шахта «Черкасская» — перегоревшая отвальная порода	0,7	46,7	44,4	528,8	152,7
г. Луганск	шахта «Луганская» — отвальная порода	3,0	22,7	51,2	41,6	84,5
г. Лутугино	шахта «Мащенская» — отвальная порода	9,3	3,3	13,5	0,9	14,8

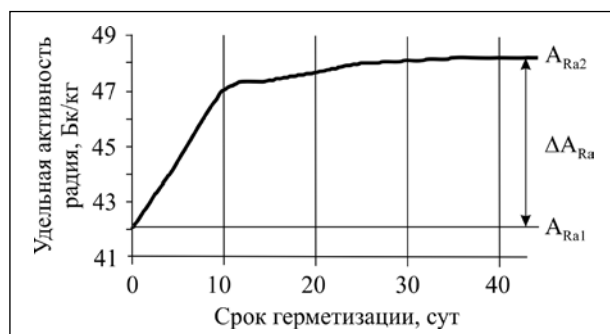


Рис. 1. Значения удельной активности радия для расчета $k_{эм}$ отвальной породы шахты «Черкасская»: A_{Ra1} — удельная активность радия (в аэрированной пробе); Бк/кг; A_{Ra2} — удельная активность радия (в загерметизированной пробе), Бк/кг

Значения удельной эффективной активности породы не превышают допустимых норм [10], а результаты расчета $k_{эм}$ свидетельствуют об умеренной эманулирующей способности отвальных пород угольных шахт Донецкого угольного бассейна региона Луганской Народной Республики. Таким образом, использование отходов добычи и обогащения угля в строительной индустрии является оправданным и перспективным.

Заключение

Проведенные исследования и детальный анализ различных показателей и свойств отходов угледобычи Луганской Народной Республики, включая удельную эффективную активность и коэффициент эмануирования, делают возможным применение отвальной породы в качестве сырья в строительной отрасли при производстве материалов для промышленного, гражданского и дорожного строительства.

Библиографический список

1. Куманева М. К., Шевелева О. Б., Зонина О. Б. Управление отходами производства в угольной отрасли: ресурсно-экологический аспект // Уголь. 2024. № 2. С. 74–78.
2. Бабак Н. А., Масленикова Л. Л. Геоэкологический резерв промышленных минеральных отходов // Безопасность жизнедеятельности. 2018. № 10 (214). С. 57–64.
3. Шаймартьянов Т. Э. К проблеме рекультивации хранилищ хвостов обогащения углей Донбасса // Вектор Геонаук, 2018. № 1 (3). С. 53–64.
4. Буравчук Н. И., Гурьянова О. В. Использование техногенного сырья в производстве нерудных строительных материалов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион (Технические науки). 2015. № 1. С. 111–117.

5. Васильев П. В., Рыбак В. Л., Егорова Т. А. Методика оценки воздействий породных отвалов шахт на окружающую среду и мероприятия по их локализации // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2016. Вып. 2. С. 3–19.
6. Ахтямов Р. Г., Сеньюшкин Н. С., Суханов А. В. Разработка методики выявления потенциально опасных объектов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 5. С. 192–197.
7. Ахтямов Р. Г. Оценка и пути уменьшения экологической опасности объектов автотранспортной инфраструктуры урбанизированной территории: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2009. 19 с.
8. Баталин Б. С., Белозерова Т. А., Гайдай М. Ф. Строительная керамика из терриконников Кизеловского угольного бассейна // Стекло и керамика. 2014. № 3. С. 8–10.
9. Радиоактивность отвалов угольных шахт Донбасса / Л. Г. Зубова, С. Г. Воробьев, В. А. Гречка, и др. // Вестник Восточноукраинского национального университета им. В. Даля. 2014. № 6. С. 166–172.
10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010): (Ионизирующее излучение, радиационная безопасность СП 2.6.1. 2612–10): зарегистрирован 11 августа 2010 г. Регистрационный № 18115. М.: Минюст России, 2010. 98 с.

Дата поступления: 14.04.2024

Решение о публикации: 31.05.2024

Контактная информация:

ВЕРЕХ-БЕЛОУСОВА Екатерина Иосифовна —

канд. техн. наук, доцент; kate3152@yandex.ru

ХАРЛАМОВА Алина Вадимовна —

канд. техн. наук, доцент; alavina@yandex.ru

The prospect of processing waste rock from coal mines with subsequent use in construction

E. I. Verekh-Belousova¹, A. V. Kharlamova²

¹ Lugansk Vladimir Dahl State University, 20a, Molodezhny kv., Lugansk, LPR, 91034, Russia

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

For citation: Verekh-Belousova E. I., Kharlamova A. V. The prospect of processing waste rock from coal mines with subsequent use in construction // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 391–397. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-391-397

Abstract

Objective: research and justification of the prospects for processing waste rock from coal mines of the Lugansk People's Republic with its further use in the construction industry. **Methods:** sampling of the dump rock was carried out, followed by laboratory research: Al_2O_3 content (up to 22 %) and total sulfur (up to 4 %) in rock samples of varying degrees of metamorphism, indicators of its plasticity and radiation characteristics (up to 220 Bk/kg). **Results:** the issues of processing rock dumps from coal mines of the Lugansk People's Republic as raw materials for the production of building materials are considered. A brief analysis of the currently existing methods for obtaining various building materials from waste rocks has been carried out. The laboratory data obtained, after studies of samples of waste rock from a number of mines, prove the possibility of using coal waste in civil, industrial and road construction. **Practical importance:** the research and detailed analysis

of various indicators and properties of coal mining waste in the Lugansk People's Republic, including specific effective activity and evaporation coefficient, make it possible to use waste rock as a raw material in the construction industry in the production of materials for industrial, civil and road construction.

Keywords: dump rock, coal mine dumps, raw materials, waste, processing, disposal, construction materials.

References

1. Kumaneva M. K., Sheveleva O. B., Zonova O. B. Upravlenie otkodami proizvodstva v ugol'noj otrasli: resursno-ekologicheskij aspekt // Ugol'. 2024. № 2. S. 74–78. (In Russian)
2. Babak N. A., Maslenikova L. L. Geoekologicheskij rezerv promyshlennyx mineral'nyx otkodov // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2018. № 10 (214). S. 57–64. (In Russian)
3. Shyajmartdyanov T. E'. K probleme rekul'tivacii xranilishh xvostov obogasheniya uglej Donbassa // Vektor Geonauk, 2018. № 1 (3). S. 53–64. (In Russian)
4. Buravchuk N. I., Gur'yanova O. V. Ispol'zovanie texnogennogo syr'ya v proizvodstve nerudnyx stroitel'nyx materialov // Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region (Texnicheskie nauki). 2015. № 1. S. 111–117. (In Russian)
5. Vasil'ev P. V., Ry'bak V. L., Egorova T. A. Metodika ocenki vozdeystvij porodnyx otvalov shaxta na okruzhayushchuyu sredyu i meropriyatiya po ix lokalizacii // Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle. 2016. Vy'p. 2. S. 3–19. (In Russian)
6. Axtyamov R. G., Senyushkin N. S., Suxanov A. V. Razrabotka metodiki vy'yavleniya potencial'no opasnyx ob'ektov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. 2011. T. 7. № 5. S. 192–197. (In Russian)
7. Axtyamov R. G. Ocenka i puti umen'sheniya ekologicheskoy opasnosti ob'ektov avtotransportnoj infrastruktury urbanizirovannoj territorii: avtoreferat dis. ... kand. texn. nauk. Kazan', 2009. 19 s.
8. Batalin B. S., Belozerova T. A., Gajdaj M. F. Stroitel'naya keramika iz terrikonnikov Kizelovskogo ugol'nogo bassejna // Steklo i keramika. 2014. № 3. S. 8–10. (In Russian)
9. Radoaktivnost' otvalov ugol'nyx shaxta Donbassa / L. G. Zubova, S. G. Vorob'ev, V. A. Grechka, i dr. // Vestnik Vostochnoukrainskogo nacional'nogo universiteta im. V. Dal'ya. 2014. № 6. S. 166–172. (In Russian)
10. Osnovny'e sanitarnye pravila obespecheniya radiacionnoj bezopasnosti (OSPORB-99/2010): (Ioniziruyushchee izluchenie, radiacionnaya bezopasnost' SP 2.6.1. 2612–10): zaregistririvan 11 avgusta 2010 g. Registracionnyj № 18115. M.: Minyust Rossii, 2010. 98 s. (In Russian)

Received: 14.04.2024

Accepted: 31.05.2024

Author's information:

Ekaterina I. VEREKH-BELOUSOVA —
PhD in Engineering; Associate Professor;
kate3152@yandex.ru

Alina V. KHARLAMOVA — PhD in Engineering,
Associate Professor; alavina@yandex.ru



УДК 656.1

Многокритериальный подход к отбору вариантов создания сети железных дорог

Н. А. Медведева, В. С. Шварцфельд

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

Для цитирования: Медведева Н. А., Шварцфельд В. С. Многокритериальный подход к отбору вариантов создания сети железных дорог // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 398–408. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-398-408

Аннотация

Цель: в статье приводится многовариантный подход к отбору вариантов начертания полигона сети на территории малоосвоенного района. **Методы:** при освоении месторождений природных ресурсов необходимо качественно проводить комплексную оценку устойчивости развития соответствующего региона и разрабатывать стратегии его развития. Малоосвоенный район можно отнести к проблемным регионам, к которым относятся слаборазвитые или депрессивные районы. Под малоосвоенными районами (регионами) авторы понимают территории большой площади, на которой проживает малочисленное население, слабо развито или полностью отсутствует железнодорожная сеть путей сообщения, с одной стороны, а с другой — имеются богатейшие запасы месторождений природных ресурсов, которые не могут быть в полной мере задействованы. Обоснование создания топологии сети железных дорог в таких районах является сложной задачей. В статье раскрыты основные теоретические положения ее решения. **Результаты:** для оценки перспективного развития сети железных дорог в таких районах с учетом ее социально-экономического развития предложен многокритериальный подход. Изложены основные положения методики формирования вариантов создания сети железных дорог с использованием теории графов и их последовательной многокритериальной оценкой. **Практическая значимость:** приводится конкретный пример расчета, показывающий работоспособность предложенной методики, позволяющей обоснованно принимать решения по отбору вариантов создания топологии сети железных дорог в малоосвоенном районе.

Ключевые слова: железные дороги, топология сети железных дорог, пути сообщения, проблемные регионы, малоосвоенный район, слаборазвитый район, теория графов, депрессивный район, многокритериальная задача, обоснование создания сети железных дорог.

Введение

Вопросы, связанные с созданием и развитием сети железных дорог в малоосвоенных районах страны, поднимались неоднократно [1–4].

На взгляд авторов, одним из первоочередных и приоритетных направлений является продолжение исследований в области обоснования строительства новых железных дорог в малоосвоенных районах России

для создания опорной транспортной сети с целью освоения природных ресурсов, создания благоприятных условий для размещения новых добывающих и перерабатывающих предприятий, увеличения плотности населения.

Вопросы создания опорной сети железных дорог тесно связаны с перспективным планированием социально-экономического развития регионов в Российской Федерации.

Цель

В данной статье вопросы, связанные с обоснованием создания топологии сети железных дорог, рассматриваются применительно к регионам, имеющим определен-

ные проблемы социально-экономического характера. В работе [5] рассматриваются проблемные регионы (рис. 1), к которым, безусловно, можно отнести и малоосвоенные районы.



Рис. 1. Схема для относительного описания регионов

В контексте изучаемой темы малоосвоенные регионы — это регионы с большой территорией, малочисленным населением, слабым развитием или полным отсутствием железнодорожной сети путей сообщения, богатейшими запасами месторождений природных ресурсов. Данные регионы из-за слаборазвитой добывающей и перерабатывающей промышленности являются депрессивными с точки зрения устойчивого развития и роста валового регионального продукта. В малоосвоенных регионах (арктическая зона, Сибирь, Прибайкалье и Дальний Восток) имеется огромный потенциал социально-экономического развития, который может быть поэтапно реализован только благодаря созданию обоснованной сети путей сообщения и в первую очередь железных дорог. Создание методики обоснования создания сети железных дорог в малоосвоенных районах является основной целью авторов данной статьи.

Исходные данные и методы расчета

В данной статье авторы продолжают исследования, предложенные в работах [6–8]. Решением задачи, связанной с выбором варианта трассы отдельной железнодорожной линии, занимались различные ученые. Одни из последних исследований отражены, например, в работах [9–13].

Для решения задачи обоснования создания сети железных дорог необходимо иметь следующие исходные данные: граф потенциальной сети железных дорог, состоящий из узлов (опорные пункты) и звеньев между узлами. Звенья представляют собой отдельные трассы железнодорожных линий, состоящих из перегонов с размещенными на них отдельными пунктами. Звенья имеют реальные длины, количество малых искусственных сооружений, суммарную длину средних и больших мостов и т. п. показатели. Одни из узлов потенциальной сети железных дорог является станцией примыкания сети

к существующей магистральной железной дороге. В данной работе рассматриваются два варианта расчетной схемы топологии сети: без дополнительного узла (рис. 2, а) и с дополнительным узлом (рис. 2, б). Дополнительный узел может быть полезен для улучшения и разнообразия начертания пер-

спективной сети. Вариант с двумя станциями примыкания, как рассматривалось авторами в [6], в этой работе не предусматривается. У каждого звена графа, в свою очередь, может быть несколько вариантов начертания.

Варианты трасс и их показатели представлены в табл. 1.

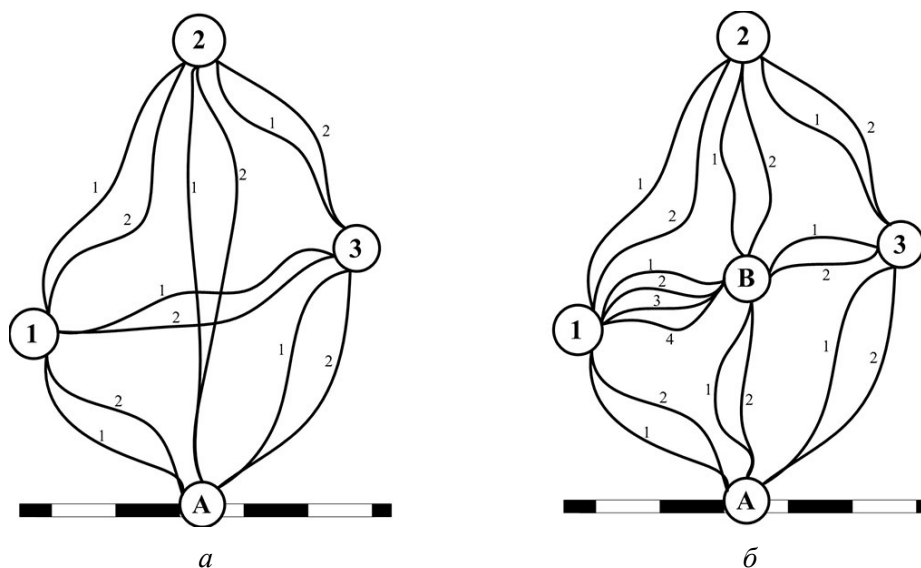


Рис. 2. Варианты расчетных схем

ТАБЛИЦА 1. Трассы и варианты

Линия ж/д, i	Вариант трассы, j	Параметры (показатели) p			
		d_1 , км	d_2 , шт.	d_3 , м	d_4 , га
А-1	1	100,07	47	547,55	538,95
	2	101,13	43	642,67	543
А-2	1	196,75	137,00	2139,21	1993,02
	2	192,66	129,00	2060,92	1922,44
А-3	1	104,56	85	2086,46	616,2
	2	101,26	85	2042,15	602,8
1-2	1	103,7	86	980	1037,02
	2	103,74	81	1090	1037,42
1-3	1	185,709	141	2374,47	1878,15
	2	183,542	138,5	2380,58	1846,38
2-3	1	99,24	36	891	704,65
	2	102,83	37	985	999,48

Окончание ТАБЛИЦЫ 1

Линия ж/д, i	Вариант трассы, j	Параметры (показатели) p			
		d_1 , км	d_2 , шт.	d_3 , м	d_4 , га
1-В	1	98	50	1786,2	981,32
	2	95,5	54	1593,4	964,76
	3	97,7	44	2059,1	977,98
	4	95,2	48	1866,3	961,54
В-3	1	86,175	88	520,39	884,84
	2	87,709	91	588,27	900,17
2-В	1	95,71	70	1203,44	993,94
	2	97,25	102	1368,98	998,16
В-А	1	99,5	35	770,23	994,86
	2	92,86	51	779,18	928,5

На первом этапе среди вариантов топологии сети железных дорог выбираются наилучшие по критериям, определяемым по формулам (1) и (2). Данные критерии представляют собой нормализованные значения каждого из представленных в табл. 1 показателей.

Нормализованные значения при минимизации частных показателей определяются по формуле:

$$r_{jp} = \frac{d_{jp} - d_p^{\min}}{d_p^{\max} - d_p^{\min}}, \quad (1)$$

где d_{jp} — показатель соответствующего варианта топологии сети железных дорог; d_p^{\min} , d_p^{\max} — соответственно минимальное и максимальное значение соответствующего показателя из рассматриваемых вариантов топологии.

Нормализованные значения при максимизации частных показателей определяются по формуле:

$$r_{jp} = \frac{d_p^{\max} - d_{jp}}{d_p^{\max} - d_p^{\min}}. \quad (2)$$

В качестве показателей (частных критериев) в данном случае выбраны:

1. Длина трассы (суммарная длина трасс по рассматриваемой сети), d_1 , км.
2. Количество малых водопропускных сооружений (сумма по сети), d_2 , штук.
3. Протяженность средних и больших мостов, d_3 , м.
4. Площадь земли отвода, d_4 , га.

Минимизации подлежат все четыре показателя и, следовательно, расчеты производятся по формуле (1).

За критерий отбора в данной работе принимается обобщенный нормализованный критерий F_j , определяемый как сумма нормализованных частных показателей с учетом коэффициента важности (полезности) λ_j каждого из них. Коэффициенты λ_j приняты на основе экспертной оценки и имеют следующие значения: $\lambda_1 = 0,4$; $\lambda_2 = 0,15$; $\lambda_3 = 0,2$; $\lambda_4 = 0,25$.

После соответствующих расчетов итоговые результаты сведены в табл. 2.

Схема сети железных дорог будет иметь вид, представленный на рис. 3 (показаны варианты начертания без оценки звеньев сети).

ТАБЛИЦА 2. Выбор начертания трасс железнодорожных линий между узлами сети железных дорог

Линия ж/д, i	Вариант трассы, j	Параметры				Сумма $F_j = \sum \lambda_i \cdot r_{ip}$
		d_1 , км	d_2 , шт.	d_3 , м	d_4 , га	
А-1	1	0	1	0	0	0,15
	2	1	0	1	1	0,85
А-2	1	1	1	1	1	1,00
	2	0	0	0	0	0,00
А-3	1	1	0	1	1	0,85
	2	0	0	0	0	0,00
1-2	1	0	1	0	0	0,15
	2	1	0	1	1	0,85
1-3	1	1	1	0	1	0,80
	2	0	0	1	0	0,20
2-3	1	0	0	0	0	0,00
	2	1	1	1	1	1,00
1-В	1	1,0	0,6	0,4	1	0,82
	2	0,1	1	0,0	0,2	0,23
	3	0,9	0	1,0	0,8	0,75
	4	0,0	0,4	0,6	0	0,18
В-3	1	0	0	0	0	0,00
	2	1	1	1	1	1,00
2-В	1	0	0	0	0	0,00
	2	1	1	1	1	1,00
В-А	1	1	0	0	1	0,65
	2	0	1	1	0	0,35

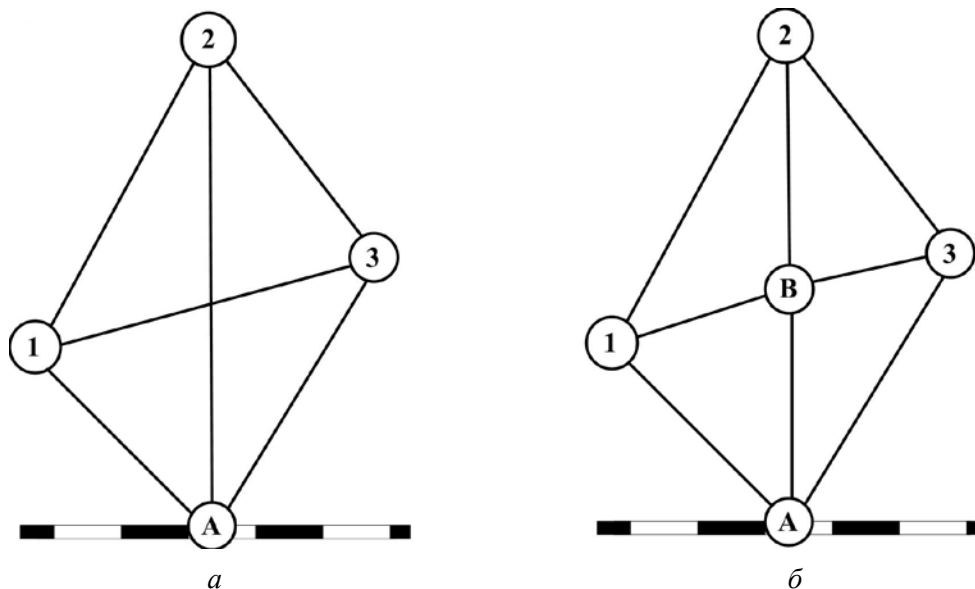


Рис. 3. Варианты расчетных схем перспективной топологии сети железных дорог

Следующим шагом (этапом) будет перебор возможных начертаний сети. Критерием отбора принят показатель — суммарная длина сети железных дорог. Отбор предлагается производить методом Прима по минимуму

протяженности сети. Результаты отбора вариантов топологии приведены в табл. 3.

Для дальнейшего расчета приняты схемы формирования опорной сети железных дорог, изображенные на рис. 4.

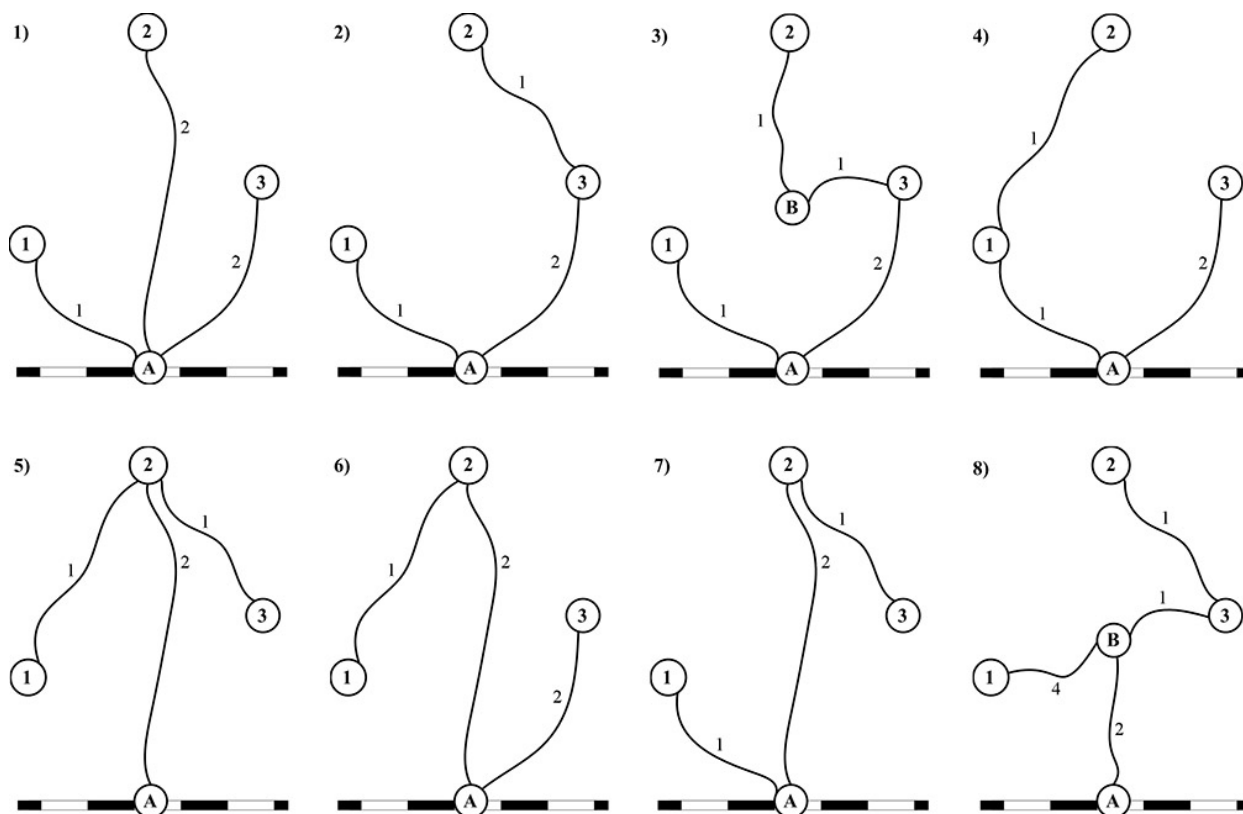


Рис. 4. Схемы сетей для сравнения

ТАБЛИЦА 3. Схемы сетей железных дорог для сравнения

Варианты сети, j	Трассы в сети, i	Параметры (показатели), p			
		d_1 , км	d_2 , шт.	d_3 , м	d_4 , га
1	1-A	100,07	47	547,55	538,95
	2-A	192,66	129	2060,915	1922,44
	3-A	101,26	85	2042,15	602,8
Сумма по параметрам $\sum d_{1p}$		393,99	261	4650,615	3064,19
2	1-A	100,07	47	547,55	538,95
	3-A	101,26	85	2042,15	602,8
	2-3	99,24	36	891	704,65
Сумма по параметрам $\sum d_{2p}$		300,57	168	3480,7	1846,4

Окончание ТАБЛИЦЫ 3

Варианты сети, j	Трассы в сети, i	Параметры (показатели), p			
		d_1 , км	d_2 , шт.	d_3 , м	d_4 , га
3	1-A	100,07	47	547,55	538,95
	3-A	101,26	85	2042,15	602,8
	3-B	86,175	88	520,39	884,84
	2-B	95,71	70	1203,44	993,94
Сумма по параметрам $\sum d_{3p}$		383,215	290	4313,53	3020,53
4	1-A	100,07	47	547,55	538,95
	1-2	103,7	86	980	1037,02
	3-A	101,26	85	2042,15	602,8
Сумма по параметрам $\sum d_{4p}$		305,03	218	3569,7	2178,77
5	1-2	103,7	86	980	1037,02
	2-3	99,24	36	891	704,65
	2-A	192,66	129	2060,915	1922,44
Сумма по параметрам $\sum d_{5p}$		395,6	251	3931,915	3664,11
6	1-2	103,7	86	980	1037,02
	2-A	192,66	129	2060,915	1922,44
	3-A	101,26	85	2042,15	602,8
Сумма по параметрам $\sum d_{6p}$		397,62	300	5083,065	3562,26
7	1-A	100,07	47	547,55	538,95
	2-A	192,66	129	2060,915	1922,44
	2-3	99,24	36	891	704,65
Сумма по параметрам $\sum d_{7p}$		391,97	212	3499,465	3166,04
8	A-B	92,86	51	779,18	928,5
	1-B	95,2	48	1866,3	961,54
	3-B	86,175	88	520,39	884,84
	2-3	99,24	36	891	704,65
Сумма по параметрам $\sum d_{8p}$		373,475	223	4056,87	3479,53

По формулам (1) и (2) аналогично предыдущему этапу определяются наилучшие варианты по каждому показателю и рассчитывается нормализованный критерий для каждого варианта сети (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Результаты расчета

Варианты сети, j	Суммы из табл. 3				Нормализованные параметры сумм из табл. 3				$F_j = \sum \lambda_i \cdot r_{jp}$
	Параметры, p				Параметры, p				
	d_1 , км	d_2 , шт.	d_3 , м	d_4 , га	r_1	r_2	r_3	r_4	
1	393,99	261	4650,615	0,67	0,39	0,11	0,13	0,17	0,80
2	300,57	168	3480,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0

Окончание ТАБЛИЦЫ 4

Варианты сети, j	Суммы из табл. 3				Нормализованные параметры сумм из табл. 3				$F_j = \sum \lambda_i \cdot r_{jp}$
	Параметры, p				Параметры, p				
	d_1 , км	d_2 , шт.	d_3 , м	d_4 , га	r_1	r_2	r_3	r_4	
3	383,215	290	4313,53	0,65	0,34	0,14	0,09	0,16	0,74
4	305,03	218	3569,7	0,18	0,02	0,06	0,01	0,05	0,13
5	395,6	251	3931,915	1,00	0,39	0,09	0,05	0,25	0,79
6	397,62	300	5083,065	0,94	0,40	0,15	0,17	0,24	0,99
7	391,97	212	3499,465	0,73	0,38	0,05	0,00	0,18	0,61
8	373,475	223	4056,87	0,90	0,30	0,06	0,06	0,22	0,66

Результаты

В соответствии с проведенными расчетами (табл. 4) можно сделать вывод, что наилучшим начертанием сети будет являться вариант № 2, так как нормализованный критерий $F_j = 0$. На рис. 5 иллюстрируется топология сети железных дорог,

соответствующая этому варианту. Близким к наилучшему является вариант сети № 4, который также может быть использован для дальнейшего рассмотрения. Наихудшим из представленных вариантов является вариант № 6: включает в себя наибольшие показатели параметров для расчета.

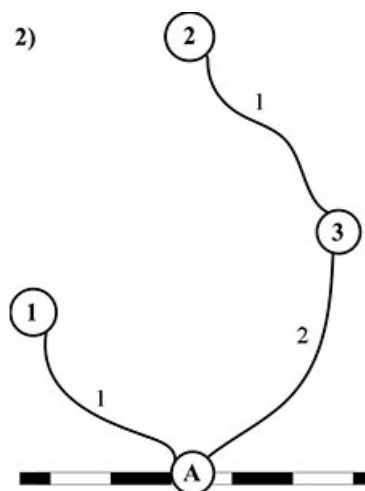


Рис. 5. Итоговая сеть

Предложенный многокритериальный подход для предварительного отбора альтернативных вариантов создания топологии сети железных дорог в малоосвоенных районах будет являться основой создаваемой авторами методики обоснования формирования опорной транспортной сети.

Библиографический список

1. Кибалов Е. Б. Проблема транспортного освоения Сибири: железнодорожные проекты XXI века // Транспорт Российской Федерации. 2006. № 4. С. 10–13.
2. Ткаченко В. Я., Малов В. Ю. Северо-Российский транспортный коридор — приоритетный

объект развития опорной транспортной сети страны // Транспортное строительство. 2007. № 4. С. 4–7.

3. Копыленко В. А., Быков Ю. А., Круглов В. М. и др. Северные и восточные районы России — важнейший полигон расширения сети железных дорог страны в XXI веке // Транспортное строительство. 2008. № 4. С. 2–4.

4. Шварцфельд В. С., Едигарян А. Р., Баранова В. В. Перспективы развития железных дорог Южной Якутии // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2019. № 7. С. 6–16.

5. Кривко С. Р. Типы проблемных регионов РФ и предпосылки их существования // Теория и практика общественного развития. 2012. № 11. С. 317–322.

6. Медведева Н. А., Шварцфельд В. С. Формирование и отбор вариантов топологии сети железных дорог в малоосвоенных регионах // Известия Транссиба. 2023. № 3 (55). С. 66–73.

7. Медведева Н. А., Шварцфельд В. С. Обоснование создания топологии сети железных дорог в малоосвоенных районах / Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 17–24 апреля 2023 года // СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. 2023. Т. 1. С. 357–362. EDN PDTKOH.

8. Шварцфельд В. С., Медведева Н. А. Модель развития сети железных дорог в малоосвоенных районах / IV Бетанкуровский международный инженерный форум: электронный сборник трудов, Санкт-Петербург, 30 ноября — 2 декабря 2022 года // СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2022. С. 402–404. EDN VJXLOT.

9. Подвербный В. А., Казарина В. В. Многокритериальный выбор направления проектируемой железной дороги // Транспортное строительство. 2019. № 3. С. 2–5. EDN HCYQSH.

10. Казарина В. В., Подвербный В. А. Принятие решения по выбору варианта трассы железнодорожной линии // Мир транспорта. 2019. Т. 17, № 3 (82). С. 140–151. DOI 10.30932/1992–3252-2019-17-3-140-151. EDN NQLQXP.

11. Перельгина А. А., Подвербный В. А. Пример принятия решения в области проектирования железных дорог // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2018. Т. 1. С. 606–611. EDN XSHYZF.

12. Быков Ю. А., Фадеева В. А., Кожевников В. В. Многофакторный анализ конкурентоспособности вариантов направления проектируемых железных дорог // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2019. № 7. С. 154–161. EDN ZUCPBA.

13. Быков Ю. А., Сидраков А. А., Фадеева В. А. Формирование множества вариантов направления проектируемых железных дорог и оценка их конкурентоспособности // Качество. Инновации. Образование. 2020. № 1 (165). С. 44–49. DOI 10.31145/1999-513x-2020-1-44-49. EDN YSCVTY.

Дата поступления: 05.05.2024

Решение о публикации: 28.05.2024

Контактная информация:

МЕДВЕДЕВА Наталия Алексеевна — аспирант кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог», +7 (931) 970-89-04; natali171297@mail.ru
ШВАРЦФЕЛЬД Вячеслав Семенович — док. техн. наук, профессор, профессор кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог», +7 (914) 541-53-20; v_s_s_@mail.ru

A multi-criteria approach to the selection of options for creating a railway network

N. A. Medvedeva, V. S. Shvartcfeld

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

For citation: Medvedeva N. A., Shvartcfeld V. S. A multi-criteria approach to the selection of options for creating a railway network // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 390–408. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-398-408

Abstract

The article provides a multivariate approach to the selection of options for the outline of a network polygon in a poorly developed area. When developing deposits of natural resources, it is necessary to qualitatively carry out a comprehensive assessment of the sustainability of the development of the relevant region and develop strategies for its development. An underdeveloped area can be classified as a problem region, which includes underdeveloped or depressed areas. By underdeveloped areas (regions), the authors understand the territories of a large area inhabited by a small population, poorly developed or completely absent railway network of communication routes on the one hand, and on the other, there are rich reserves of deposits of natural resources that cannot be fully exploited. To assess the prospective development of the railway network in such areas, taking into account its socio-economic development, it is proposed to use a multi-criteria approach. The main provisions of the methodology for the formation of options for creating a railway network using graph theory and their consistent multi-criteria evaluation are presented. A specific calculation example is given, showing the efficiency of the proposed methodology.

Keywords: railways, topology of the railway network, communication routes, problem regions, underdeveloped area, underdeveloped area, graph theory, depressed area, multi-criteria task, justification for the creation of a railway network.

References

1. Kibalov E. B. Problema transportnogo osvoeniya Sibiri: zheleznodorozhnye proekty XXI veka // *Transport Rossijskoj Federacii*. 2006. № 4. S. 10–13. (In Russian)
2. Tkachenko V. Ya., Malov V. Yu. Severo-Rossijskij transportnyj koridor — prioritetnyj ob’ekt razvitiya opornoj transportnoj seti strany // *Transportnoe stroitel’stvo*. 2007. № 4. S. 4–7. (In Russian)
3. Kopylenko V. A., Bykov Yu. A., Kruglov V. M. i dr. Severnye i vostochnye rajony Rossii — vazhnejshij poligon rasshireniya seti zheleznih dorog strany v XXI veke // *Transportnoe stroitel’stvo*. 2008. № 4. S. 2–4. (In Russian)
4. Shvartcfel’d V. S., Edigaryan A. R., Baranova V. V. Perspektivy razvitiya zheleznih dorog Yuzhnoj Yakutii // *Proektirovanie razvitiya regional’noj seti zheleznih dorog*. 2019. № 7. S. 6–16. (In Russian)
5. Krivko S. R. Tipy problemnyh regionov RF i predposylki ih sushchestvovaniya // *Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya*. 2012. № 11. S. 317–322. (In Russian)
6. Medvedeva N. A., Shvartcfel’d V. S. Formirovanie i otkor variantov topologii seti zheleznih dorog v maloosvoennyh regionah // *Izvestiya Transsiba*. 2023. № 3 (55). S. 66–73. (In Russian)
7. Medvedeva N. A., Shvartcfel’d V. S. Obosnovanie sozdaniya topologii seti zheleznih dorog v maloosvoennyh rajonah / *Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXXIII Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh, Sankt-Peterburg, 17–24 aprelya 2023 goda* // SPb: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I. 2023. T. 1. S. 357–362. EDN PDTKOH. (In Russian)

8. Shvarcfel'd V. S., Medvedeva N. A. Model' razvitiya seti zheleznyh dorog v maloosvoennyh rajonah / IV Be-tankurovskij mezhdunarodnyj inzhenernyj forum: elektronnyj sbornik trudov, Sankt-Peterburg, 30 noyabrya — 2 dekabrya 2022 goda // SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2022. S. 402–404. EDN VJXLOT. (In Russian)
9. Podverbnyj V. A., Kazarina V. V. Mnogokriterial'nyj vybor napravleniya proektiruemoj zheleznoj dorogi // Transportnoe stroitel'stvo. 2019. № 3. S. 2–5. EDN HCYQSH. (In Russian)
10. Kazarina V. V., Podverbnyj V. A. Prinyatie resheniya po vyboru varianta trassy zheleznodorozhnoj linii // Mir transporta. 2019. T. 17, № 3 (82). S. 140–151. DOI 10.30932/1992–3252-2019-17-3-140-151. EDN NQLQXP. (In Russian)
11. Pereygina A. A., Podverbnyj V. A. Primer priyatiya resheniya v oblasti proektirovaniya zheleznyh dorog // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. 2018. T. 1. S. 606–611. EDN XSHYZF. (In Russian)
12. Bykov Yu. A., Fadeeva V. A., Kozhevnikov V. V. Mnogofaktornyj analiz konkurentosposobnosti variantov napravleniya proektiruemyh zheleznyh dorog // Proektirovanie razvitiya regional'noj seti zheleznyh dorog. 2019. № 7. S. 154–161. EDN ZUCPBA. (In Russian)
13. Bykov Yu. A., Sidrakov A. A., Fadeeva V. A. Formirovanie mnozhestva variantov napravleniya proektiruemyh zheleznyh dorog i ocenka ih konkurentosposobnosti // Kachestvo. Innovacii. Obrazovanie. 2020. № 1 (165). S. 44–49. DOI 10.31145/1999-513x-2020-1-44-49. EDN YSCVTY. (In Russian)

Received: 05.05.2024

Accepted: 28.05.2024

Author's information:

Natalia A. MEDVEDEVA — postgraduate student of the Department of Research and Design of Railways, +7 (931) 970-89-04; natali171297@mail.ru

Vyacheslav S. SCHWARZFELD — PhD in Engineering, Professor of the Department of Research and Design of Railway, +7 (914) 541-53-20; v_s_s_@mail.ru

УДК 625.03

Результаты оценки силового воздействия тяжеловесных и длинносоставных грузовых поездов на железнодорожный путь различными методами измерений

А. В. Романов, А. А. Киселев, А. А. Мирошник, М. В. Бушуев

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

Для цитирования: Романов А. В., Киселев А. А., Мирошник А. А., Бушуев М. В. Результаты оценки силового воздействия тяжеловесных и длинносоставных грузовых поездов на железнодорожный путь различными методами измерений // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 409–420. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-409-420

Аннотация

Цель: оценка силового воздействия тяжеловесных и длинносоставных грузовых поездов на железнодорожный путь различными методами измерений: Шлюмпфа, матриц влияния и методом двух сечений (ПГУПС). **Методы:** измерения оценки силового воздействия тяжеловесных и длинносоставных грузовых поездов на железнодорожный путь производились методами Шлюмпфа, матриц влияния и методом двух сечений (ПГУПС). **Результаты:** установлено, что измерения вертикальных динамических сил тремя методами хорошо коррелируются между собой, а метод Шлюмпфа дает завышенные результаты при измерении горизонтальной поперечной силы. **Практическая значимость:** метод двух сечений (ПГУПС) можно рекомендовать для измерения силового воздействия как нового и модернизированного подвижного состава на железнодорожный путь, так и для эксплуатируемого подвижного состава с целью выявления дефектов и отступлений на поверхности катания колес.

Ключевые слова: контакт колеса с рельсом, взаимодействие подвижного состава с верхним строением пути, длинносоставные поезда, повышенные осевые нагрузки, кривые участки малого радиуса, тяжеловесное движение.

Введение

Для выполнения целевых показателей Транспортной стратегии Российской Федерации [1] грузооборот на сети железных дорог ОАО «РЖД» за последние годы значительно увеличился. Так, на восточном полигоне за шесть лет грузооборот увеличился на 50 %, к портам Азово-Черноморского бассейна — на 49 %.

Для этого потребовалось увеличить осевую нагрузку до 25 т/ось и увеличить длину поезда до 71 условного вагона, а на не-

которых направлениях — до 100 условных вагонов. Это привело к обновлению нормативной базы [2–6] и к затратам на реконструкцию перегонной и станционной инфраструктуры.

Проведенные комплексные испытания на участке Качканар — Смычка в 2017–2018 годах показывают, что воздействие нового подвижного состава без дефектов и отступлений не приведет к значительному росту неисправностей и дефектов. В то же

время применение на сети дорог тяжело-весных и длинносоставных грузовых поездов привело к росту количества выхода из строя рельсов по причине износа и дефектов контактно-усталостного характера, которые наблюдаются в основном в кривых участках малых радиусов. На многих участках сети дорог ресурс работы рельсов, лежащих в кривых участках пути радиусом менее 650 м, не достигает 200 млн т брутто. Расчет и количество отступлений по геометрии рельсовой колеи.

По нашему мнению, измерение и контроль силового воздействия железнодорожного экипажа на путь является одним из направлений, которое должно быть организовано для оптимизации взаимодействия в системе «колесо — рельс» и для повышения ресурса рельсов и колес.

В работе рассматриваются основные методы измерения силового воздействия железнодорожного экипажа на путь на особо грузонапряженных участках Октябрьской железной дороги.

Материалы и методы исследования

Для обследования был выбран двухпутный участок на полигоне Октябрьской железной дороги, представляющий собой кривую радиусом 600 м, электрифицированный, оборудованный автоблокировкой с грузонапряженностью 180 млн тонно-километров брутто на километр в год. Тоннаж, пропущенный по участку, — 1095,2 млн т брутто. В 2013 году проводилась реконструкция, а в 2021 году выполнен капитальный ремонт железнодорожного пути 3-го уровня, сопровождаемый работами в объеме подъемочного ремонта. На участке уложен бесстыковой путь с рельсами категории ДТ350, эпорой шпал 2000 шт./км, крепление — АРС-4,

щебеночный балласт толщиной 50 см. На участке уложен разделительный слой из геокомпозита и подбалластный слой из щебеночно-песчаной смеси.

Для регистрации динамических сил в системе «колесо — рельс» были применены методы, включенные в межгосударственный стандарт ГОСТ 34759-2021 [7], в соответствии с которым используется метод Шлюмпфа [8, 9] и метод матриц влияния [10–12].

Преимуществом метода Шлюмпфа является его простота. Практика применения метода Шлюмпфа показала достаточную точность измерения вертикальной силы и недостаточную точность измерения горизонтальных поперечных сил. По исследованиям ВНИИЖТ, ВНИКТИ, ВНИЦТТ погрешность измерений горизонтальных поперечных сил может составлять до 100 % [12–14].

Метод матриц влияния основан на совместном измерении вертикальных и горизонтальных поперечных сил. Метод измерения требует большого количества тензорезисторов, использования многоканальной аппаратуры, проведения сложных испытаний по тарировке и необходимости математической обработки сигналов, основанной на использовании матриц влияния. При этом установлено [14], что погрешность при применении метода матриц влияния от горизонтальных поперечных сил не превышает 10 %, вертикальных сил — не более 1,5 %.

Методы Шлюмпфа и матриц влияния не выявляют дефектов от воздействия колес на рельсы в связи с тем, что измерительная зона очень мала, при этом метод ПГУПС измеряет напряжения на протяжении участка длиной примерно 200 мм [13]. Этот способ может регистрировать дефекты на поверхности катания колес (рис. 1).

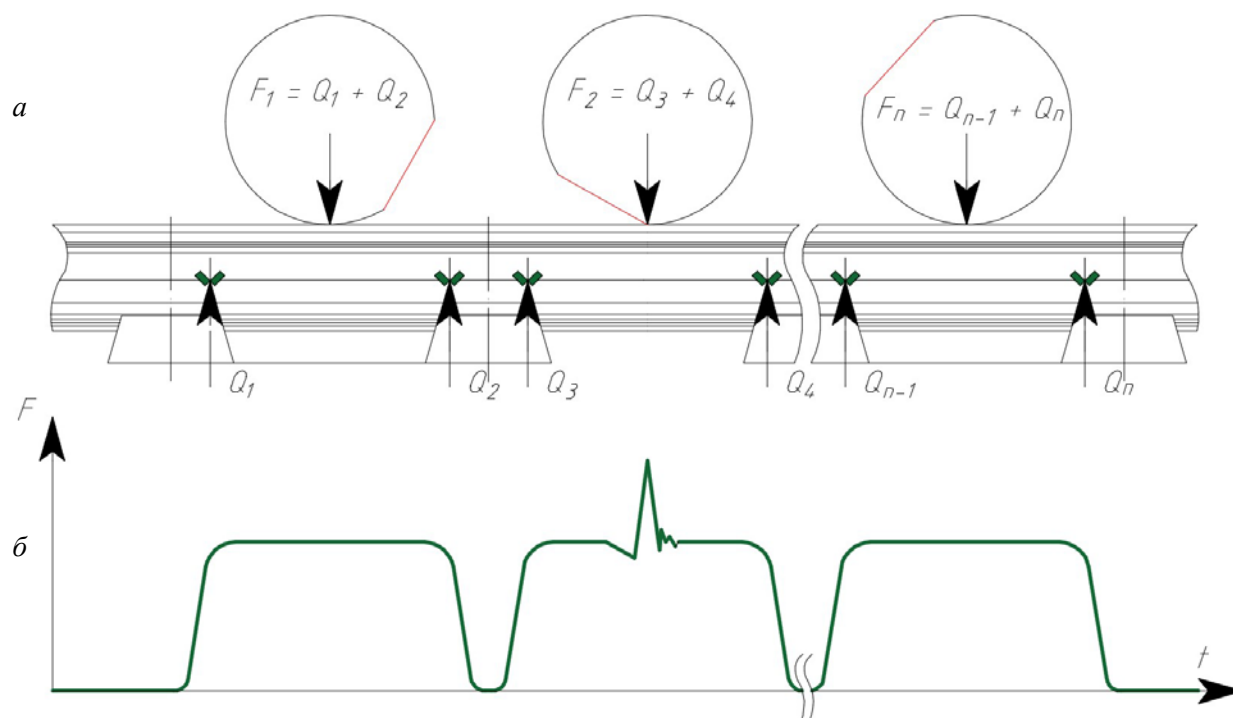


Рис. 1. Схема регистрации сил методом ПГУПС:

a — участок с датчиками; *б* — регистрация сил от воздействия колесных пар;

F_1 – F_4 — вертикально направленные силы; Q_1 – Q_4 — поперечная сила

Измерение вертикальной силы методом двух сечений (ПГУПС) выполняется включением восьми тензорезисторов, наклеенных в двух сечениях, в два параллельных моста. Измерение горизонтальной поперечной силы методом ПГУПС выполняется последовательным включением восьми тензорезисторов, наклеенных в двух сечениях, в один мост.

На экспериментальном участке датчиками оборудуются два поперечных сечения для измерения вертикальных и горизонтальных поперечных сил методом Шлюмпфа и матриц влияния и трех последовательных междушпальных промежутков для измерения сил методом ПГУПС. Измерительные сечения расположены в середине круговой кривой на внутренней и наружной нити.

Принципиальная схема оборудования участка для регистрации сил и напряжений на выбранном участке изображена на рис. 2.

Результаты исследования

Измерения на экспериментальном участке проводились в два этапа. Первый этап выполнялся в сентябре (теплая сухая погода). Второй этап выполнялся в октябре (при высокой влажности). Анализ полученных результатов показывает, что разница в итогах измерений вертикальных и горизонтальных поперечных сил от воздействия длинносоставных поездов в первом и во втором циклах незначительна и лежит в пределах точности выполненных расчетов. Из этого следует, что изменение упругих характеристик подрельсового основания и влажности балласта и грунтов основной площадки земляного полотна не влияет на точность.

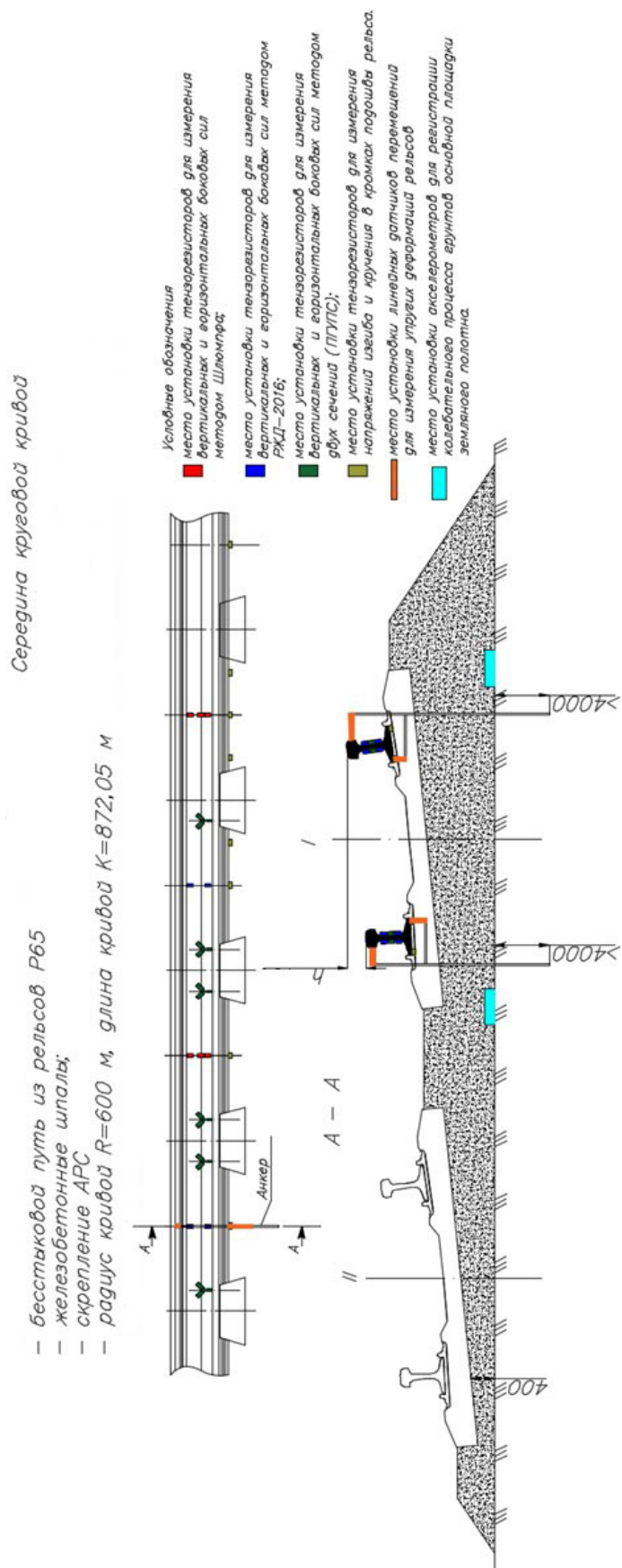
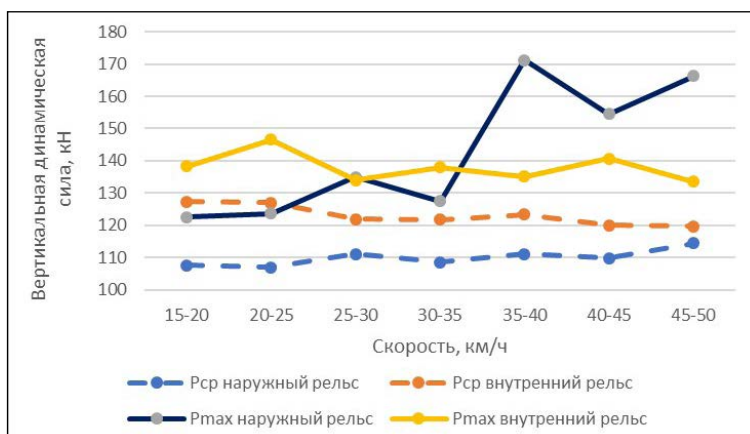


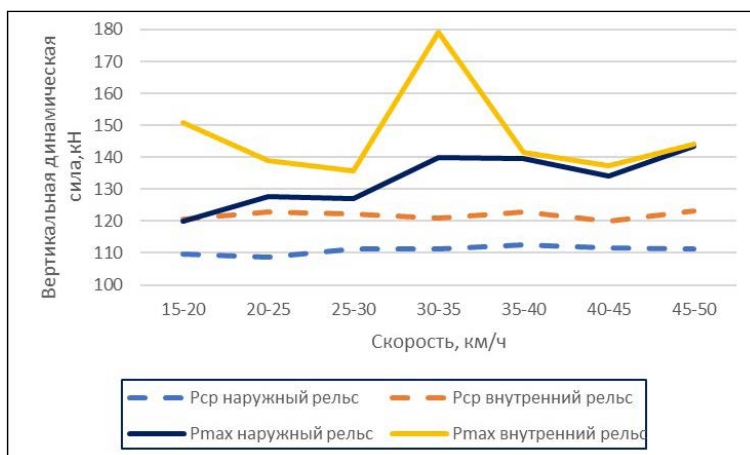
Рис. 2. Расположение датчиков для регистрации сил и напряжений

Вертикальные силы

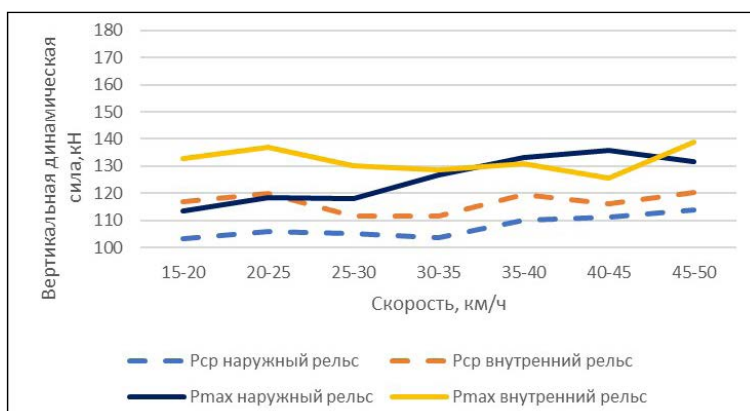
На рис. 3, 4 представлены зарегистрированные значения вертикальных сил.



а



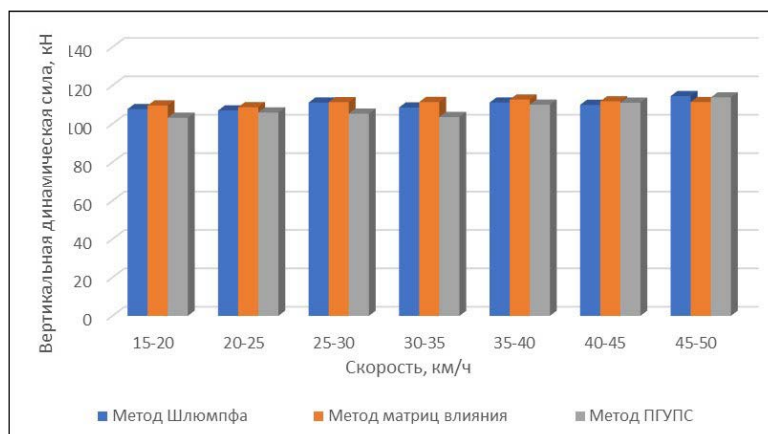
б



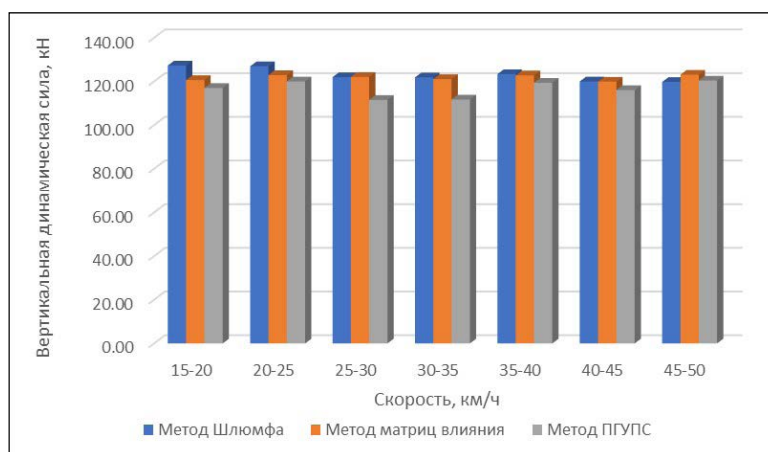
в

Рис. 3. Зарегистрированные значения вертикальных сил от колес вагонов с осевой нагрузкой 23,5 т/ось и 25 т/ось:

а — метод Шлюмфа; *б* — метод матриц влияния; *в* — метод двух сечений (ПГУПС)



а



б

Рис. 4. Сравнение результатов измерения вертикальных динамических сил, полученных различными методами: *а* — наружный рельс; *б* — внутренний рельс

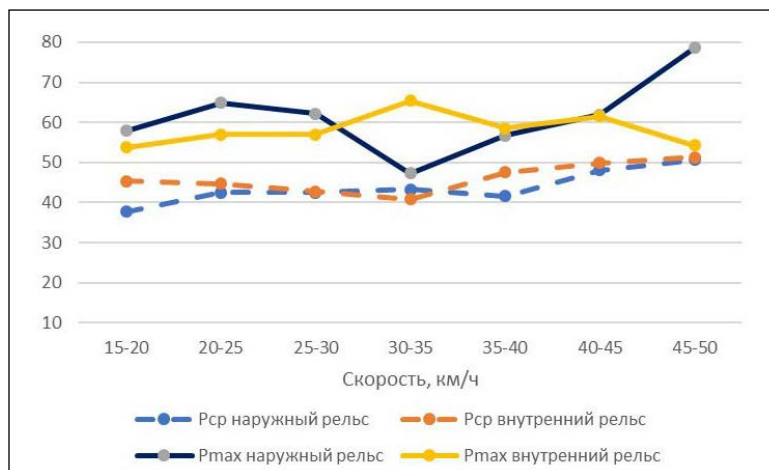
Анализ показывает, что результаты измерений вертикальных сил различными методами достаточно хорошо коррелируются между собой (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Сравнение вертикальных сил, измеренных различными методами

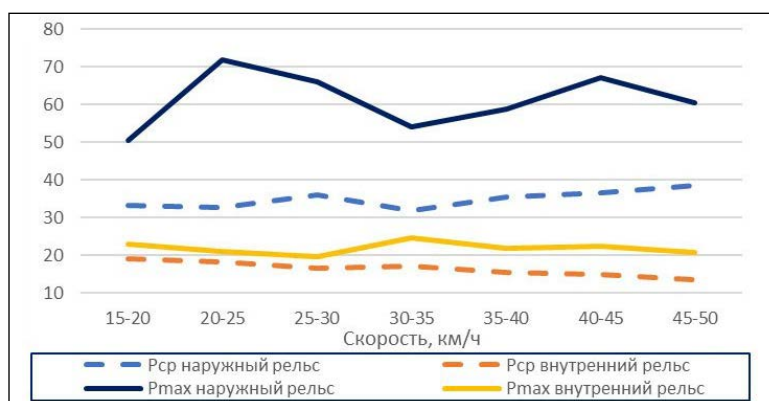
Метод измерения	Разница в результатах, % при скорости движения, км/ч						
	15–20	20–25	25–30	30–35	35–40	40–45	45–50
Наружный рельс							
Метод Шлюмфа / метод матриц влияния	1,73	1,54	0,19	2,57	1,38	1,63	2,77
ПГУПС / метод Шлюмфа	4,80	0,99	5,20	4,57	1,00	1,01	0,57
ПГУПС / метод матриц влияния	5,84	2,51	5,38	7,02	2,36	0,64	2,18
Внутренний рельс							
Метод Шлюмфа / метод матриц влияния	5,52	3,32	0,09	0,62	0,48	0,08	2,68
ПГУПС / метод Шлюмфа	8,08	5,51	8,55	8,30	3,19	3,29	0,52
ПГУПС / метод матриц влияния	3,00	2,37	8,63	7,73	2,73	3,22	2,18

Горизонтальные поперечные силы

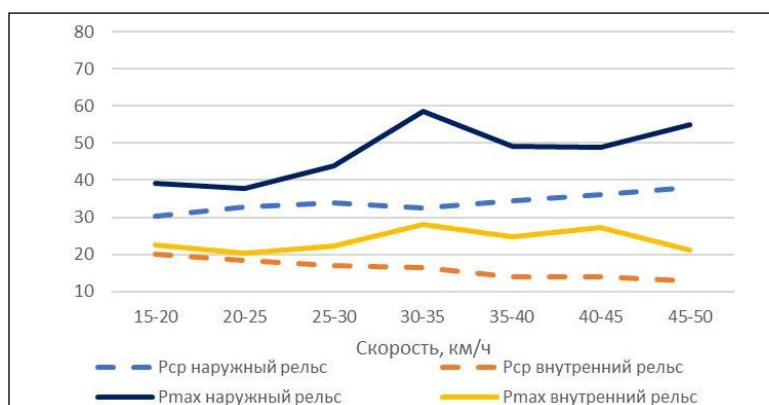
На рис. 5 и 6 представлены результаты измерений горизонтальных поперечных сил на экспериментальном участке.



а

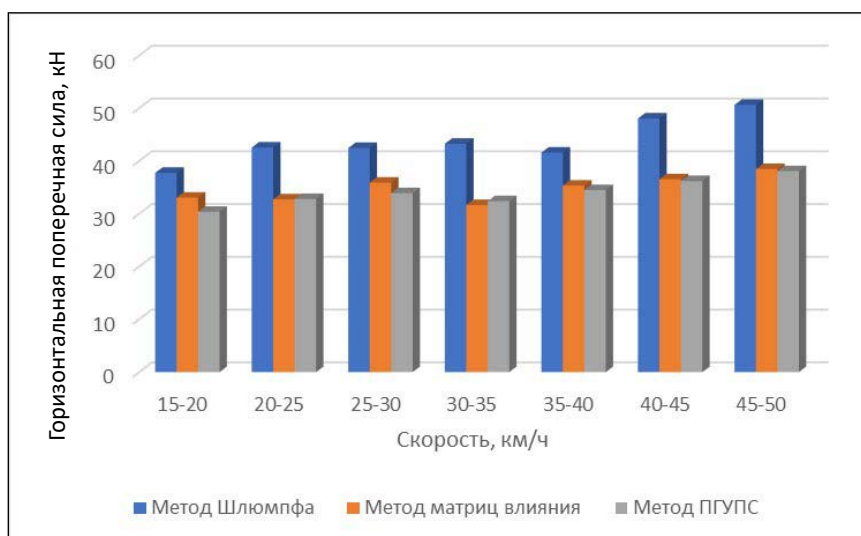


б

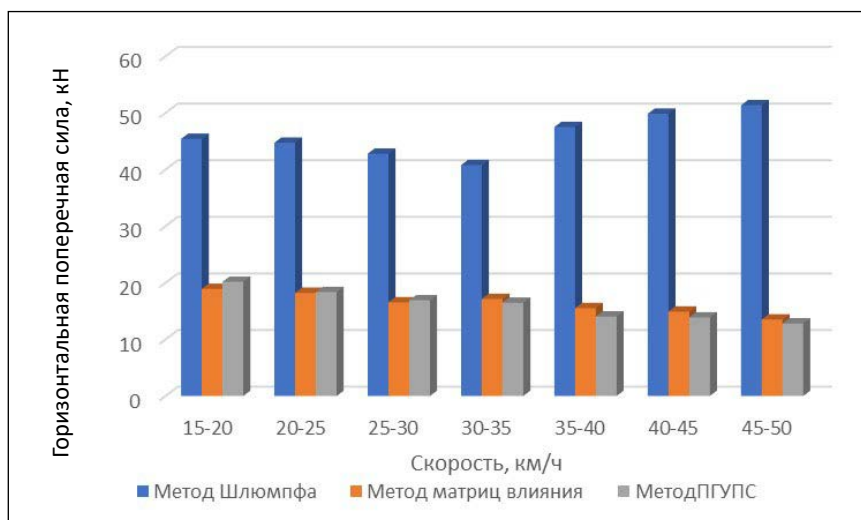


в

Рис. 5. Зарегистрированные значения горизонтальных поперечных сил от колес вагонов с осевой нагрузкой 23,5 т/ось и 25 т/ось:
а — метод Шлюмфа; *б* — метод матрицы влияния; *в* — метод двух сечений (ПГУПС)



а



б

Рис. 6. Сравнение результатов измерений горизонтальных поперечных сил, полученных различными методами: *а* — наружный рельс; *б* — внутренний рельс

Анализ результатов показывает, что метод Шлюмпфа при измерении горизонтальных сил дает завышенные результаты. Разница в измеренных средних значениях горизонтальных сил методом Шлюмпфа с методом матриц влияния достигает 73,7 %, при сравнении метода Шлюмпфа

с методом двух сечений (ПГУПС) достигает 75 %. При этом метод двух сечений (ПГУПС) и метод матриц влияния хорошо коррелируются, разница в измеренных средних значениях горизонтальных сил не превышает 9,5 %. Результаты сравнения представлены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение горизонтальных сил, измеренных различными методами от колес подвижного состава

Метод измерения	Разница в результатах, % при скорости движения, км/ч						
	15–20	20–25	25–30	30–35	35–40	40–45	45–50
Наружный рельс							
Метод Шлюмпфа / метод матриц влияния	12,42	23,07	15,44	26,82	15,05	23,94	23,99
ПГУПС / метод Шлюмпфа	19,54	22,93	20,13	25,16	17,09	24,66	24,80
ПГУПС / метод матриц влияния	8,13	0,18	5,54	2,27	2,41	0,93	1,07
Внутренний рельс							
Метод Шлюмпфа / метод матриц влияния	58,35	59,28	61,36	57,98	67,34	70,10	73,70
ПГУПС / метод Шлюмпфа	55,60	58,96	60,49	59,60	70,45	72,16	75,04
ПГУПС / метод матриц влияния	6,20	0,76	2,18	3,85	9,54	6,91	5,11

Заключение

В межгосударственный стандарт ГОСТ 34759–2021 (введенный взамен ГОСТ Р 55050–2012 [15]) был включен метод матриц влияния. При этом для выявления дефектов на поверхности катания колес действующий ГОСТ не распространяется.

По результатам работы установлено, что для измерения вертикальной силы возможно использовать методы, включенные в ГОСТ 34759-2021, а также метод двух сечений. Для измерения горизонтальной поперечной силы рекомендуется использовать метод матриц влияния и метод двух сечений (ПГУПС).

Метод двух сечений (ПГУПС) разработан с целью выявления повышенного динамического воздействия, вызванного изолированными и непрерывными неровностями на поверхности катания колес, неравномерной загрузкой вагона, а также при преодолении неровности на пути, длина которой меньше длины окружности по поверхности катания колеса. Интенсивность развития дефектов в рельсах, остаточных деформаций основной

площадки земляного полотна и, как следствие, отступлений по геометрии рельсовой колеи напрямую зависит от силового воздействия подвижного состава на путь. По нашему мнению, для оптимизации взаимодействия в системе «колесо — рельс» необходимо контролировать уровень силового воздействия колес. Данный метод может стать основой системы мониторинга подвижного состава на ходу на подходах к крупным сортировочным станциям, для измерения силового воздействия подвижного состава на путь на подходах к стрелочным переводам, искусственным сооружениям.

Библиографический список

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утвержденная Распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года № 3363-р.
2. СТО «РЖД» 1.07.002–2010 «Инфраструктура железнодорожного транспорта на участках обращения грузовых поездов повышенного веса и длины. Технические требования».

3. Инструкция по организации обращения грузовых поездов повышенной массы и длины на железнодорожных путях общего пользования ОАО «РЖД», утвержденная Распоряжением ОАО «РЖД» от 28.08.2012 № 1704 р.

4. Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Конструкция и содержание железнодорожной инфраструктуры / Пер. с англ. под ред. С. М. Захарова. М.: Интекст, 2012. 568 с.

5. Беседин И. С., Мугинштейн Л. А., Захаров С. М. Развитие тяжеловесного движения на железных дорогах мира // Железные дороги мира. 2006. № 9. С. 39–48.

6. Проблемы содержания пути при высоких осевых нагрузках // Железные дороги мира. 2005. № 2. С. 66–70.

7. ГОСТ 34759-2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний (с поправкой) // Официальное издание. М.: ФГБУ «РСТ», 2021.

8. Schlumpf G. Messungen mit Dehnungsmessstreifen bei den SBB // Technische Rundschau. Bern, 1955. No. 26. S. 35–41.

9. Weber H. H. Zurdirekten Messung der Kräfte zwischen Rad und Schiene // Elektrischen Bahnen. Bern, 1961. No. 5. S. 93–110.

10. Методика экспериментально-расчетного определения фактических значений силовых факторов, действующих на головку рельса от колес железнодорожного подвижного состава, с использованием измерения силового воздействия на путь методом «РЖД-2016» (первая редакция): утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 28.09.2016 № 1971р.

11. Методика экспериментально-расчетного определения фактических значений силовых факторов, действующих на головку рельса от колес железнодорожного подвижного состава, с использованием силового воздействия на путь методом «РЖД-2016» (аттестована ФГУП

«ВНИИМС»), свидетельство от 27 декабря 2019 г. № 103-205/RA.RU.311787-2016/2019 и зарегистрирована в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений регистрационный номер № ФР.1.28.2019.36020).

12. Коссов В. С., Лунин А. А. Определение показателей воздействия подвижного состава на железнодорожный путь методом «РЖД-2016» // Материалы XII Международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты». СПб.: ПГУПС, 2017. С. 123–126.

13. Рахимов Р. В. Нагруженность ходовых частей вагонов и пути и обоснование возможности увеличения осевых нагрузок на железных дорогах Республики Узбекистан: дис. ... докт. техн. наук. СПб., 2020. 366 с.

14. Шевченко Д. В., Савушкин Р. А., Кузьминский Я. О. и др. Разработка новых методов определения силовых факторов воздействия подвижного состава на путь // Техника железных дорог. 2018. № 1 (41). С. 38–51.

15. ГОСТ Р 55050-2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. Введ. 01.07.2013. Изм. 01.05.2020. М.: Стандартинформ, 2019.

Дата поступления: 05.05.2024

Решение о публикации: 28.05.2024

Контактная информация:

РОМАНОВ Андрей Валерьевич — канд. техн. наук, доцент; andrey.romanov@mail.ru

КИСЕЛЕВ Артем Александрович — канд. техн. наук, доцент, zhdp10@gmail.com

МИРОШНИК Александр Анатольевич — канд. техн. наук, доцент; alexmiroschnik@mail.ru

БУШУЕВ Михаил Владимирович — канд. техн. наук, доцент; 8921918@mail.ru

The results of the assessment of the force effect of heavy and long-component freight trains on the railway track by various measurement methods

A. V. Romanov, A. A. Kiselyov, A. A. Miroshnik, M. V. Bushuev

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

For citation: Romanov A. V., Kiselyov A. A., Miroshnik A. A., Bushuev M. V. The results of the assessment of the force effect of heavy and long-component freight trains on the railway track by various measurement methods // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 409–420. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-409-420

Abstract

Objective: to assess the force effect of heavy and long-component freight trains on the railway track by various measurement methods: Schlumpf, influence matrices and the two-section method (PGUPS). **Methods:** measurements of the assessment of the force effect of heavy and long-component freight trains on the railway track were carried out using the Schlumpf methods, influence matrices and the two-section method (PGUPS). **Results:** it was found that measurements of vertical dynamic forces by three methods are well correlated with each other, and the Schlumpf method gives overestimated results when measuring horizontal transverse force. **Practical importance:** the two-section method can be recommended for measuring the force effect of both new and upgraded rolling stock on the railway track, as well as for operated rolling stock in order to identify defects and deviations on the rolling surface of the wheels.

Keywords: wheel-rail contact, interaction of rolling stock with the upper structure of the track, long-component trains, increased axial loads, curved sections of small radius, heavy traffic.

References

1. Transportnaya strategiya Rossijskoj Federacii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda, utverzhennaya Rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 27 noyabrya 2021 goda № 3363-r. (In Russian)
2. STO "RZhD" 1.07.002–2010 "Infrastruktura zheleznodorozhnogo transporta na uchastkax obrashheniya gruzovy'x poezdov povy'shennogo vesa i dliny". *Texnicheskie trebovaniya*". (In Russian)
3. Instrukciya po organizacii obrashheniya gruzovy'x poezdov povy'shennoj massy' i dliny' na zheleznodorozhny'x putyax obshhego pol'zovaniya OAO "RZhD", utverzhennaya Rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 28.08.2012 № 1704 r. (In Russian)
4. Obobshhenie mirovogo opy'ta tyazhelovesnogo dvizheniya. Konstrukciya i sodержanie zheleznodorozhnoj infrastruktury' / per.s angl. pod red. S. M. Zaxarova. M.: Intekst, 2012. 568 s. (In Russian)
5. Besedin I. S., Muginshtejn L. A., Zaxarov S. M. Razvitie tyazhelovesnogo dvizheniya na zhelezny'x dorogax mira // *Zhelezny'e dorogi mira*. 2006. № 9. S. 39–48. (In Russian)
6. Problemy' sodержaniya puti pri vy'sokix osevy'x nagruzkax // *Zhelezny'e dorogi mira*. 2005. № 2. S. 66–70. (In Russian)
7. GOST 34759-2021. Zheleznodorozhny'j podvizhnoj sostav. Normy' dopustimogo vozdejstviya na zheleznodorozhny'j put' i metody' ispy'tanij (s popravkoj)// Oficial'noe izdanie. M.: FGBU "RST", 2021.7. GOST 34759-2021. Railway rolling stock. Norms of permissible impact on the railway track and test methods (as amended) // Official publication. M.: Federal State Budgetary Institution "PCT", 2021. (In Russian)
8. Schlumpf G. Messungen mit Dehnungsmesstreifen bei den SBB // *Technische Rundschau*. Bern, 1955. No. 26. S. 35–41.

9. Weber H. H. Zur direkten Messung der Kräfte zwischen Rad und Schiene // Elektrischen Bahnen. Vegp, 1961. No. 5. S. 93–110.

10. Metodika eksperimental'no-raschetnogo opredeleniya fakticheskix znachenij silovy'x faktorov, dejstvuyushhix na golovku rel'sa ot koles zhelezнодорожного подвижного состава, s ispol'zovaniem izmereniya silovogo vozdejstviya na put' metodom "RZhD-2016" (pervaya redakciya): utv. Rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 28.09.2016 № 1971r. (In Russian)

11. Metodika eksperimental'no-raschetnogo opredeleniya fakticheskix znachenij silovy'x faktorov, dejstvuyushhix na golovku rel'sa ot koles zhelezнодорожного подвижного состава s ispol'zovaniem silovogo vozdejstviya na put' metodom "RZhD-2016" (attestovana FGUP "VNIIMS", svidetel'stvo ot 27 dekabrya 2019 g. № 103-205/RA.RU.311787-2016/2019 i zaregistrovana v Federal'nom informacionnom fonde po obespecheniyu edinstva izmerenij registracionny'j nomer № FR.1.28.2019.36020). (In Russian)

12. Kossov V. S., Lunin A. A. Opredelenie pokazatelej vozdejstviya podvizhnogo sostava na zhelezнодорожный put' metodom "RZhD-2016" // Materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii "Podvizhnoj sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty". SPb.: PGUPS, 2017. S. 123–126. (In Russian)

13. Raximov R. V. Nagruzhenost' xodovy'x chastej vagonov i puti i obosnovanie vozmozhnosti uvelicheniya osevy'x nagruzok na zhelezny'x dorogax Respubliki Uzbekistan: dis. ... dokt. texn. nauk. S-Pb., 2020. 366 s. (In Russian)

14. Shevchenko D. V., Savushkin R. A., Kuz'minskij Ya. O. i dr. Razrabotka novy'x metodov opredeleniya silovy'x faktorov vozdejstviya podvizhnogo sostava na put' // Texnika zhelezny'x dorog. 2018. № 1 (41). S. 38–51. (In Russian)

15. GOST R 55050-2012. Zhelezнодорожный podvizhnoj sostav. Normy' dopustimogo vozdejstviya na zhelezнодорожный put' i metody' ispy'tanij. Vved. 01.07.2013. Izm. 01.05.2020. M.: Standartinform, 2019. (In Russian)

Received: 05.05.2024

Accepted: 28.05.2024

Author's information:

Andrey V. ROMANOV — PhD in Engineering, Associate Professor; andrey.romanov@mail.ru

Artyom A. KISELYOV — PhD in Engineering, Associate Professor; zhdp10@gmail.com

Alexander A. MIROSHNIK — PhD in Engineering, Associate Professor; alexmiroschnik@mail.ru

Mikhail V. BUSHUEV — PhD in Engineering, Associate Professor; 8921918@mail.ru

УДК 624.21

Структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге. Часть 1

А. А. Махонько¹, Ю. Г. Лазарев², А. А. Антонюк³

¹ ООО «Оператор скоростных автомагистралей — Север», Россия, 191186, Санкт-Петербург, пер. Вольинский, 3А, литера А

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, литера Б

³ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: *Махонько А. А., Лазарев Ю. Г., Антонюк А. А.* Структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в г. Санкт-Петербурге. Часть 1 // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 421–431. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-2-421-431

Аннотация

Цель: оценка работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций и текущего состояния конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге по причине возникновения нештатных ситуаций, при которых акселерометрами на пилонах фиксируются значения, превышающие предельные. **Методы:** для получения результатов используются статистические данные с баз данных действующей системы мониторинга инженерных конструкций. Поставленные в рамках исследования задачи решены посредством применения теоретических методов научного познания: аналитический метод, теория математической статистики, индукция. **Результаты:** предложен структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций и оценки текущего состояния конструкций вантового моста, по данным, полученным с акселерометров. Структурный подход включает три этапа: I — предварительный анализ; II — выборочный анализ; III — детальный анализ. **Практическая значимость:** полученный структурный подход по оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах позволяет уменьшить количество ложных срабатываний системы и оценить текущее состояние мостового сооружения. В рамках III этапа структурного подхода предложена разработка методики оценки работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций с последующей оценкой текущего состояния конструкций вантового моста.

Ключевые слова: мониторинг искусственных сооружений, управление техническим состоянием, объект транспортной инфраструктуры, вантовый мост, напряженно-деформированное состояние, акселерометр, вибрационный мониторинг.

Введение

Система мониторинга инженерных конструкций (СМИК) является инструментом информационных технологий для принятия решений по управлению параметрами состояния мостовых конструкций на всех этапах жизненного цикла, особенно в период эксплуатации, путем систематического или периодического контроля (наблюдения) за техническим состоянием мостового сооружения [1–5].

Использование СМИК является обязательным условием при реализации любого объекта транспортной инфраструктуры, относящегося к внеклассным сооружениям, к которым, в свою очередь, относятся вантовые мосты. Система мониторинга инженерных конструкций внедряется в целях обеспечения необходимого уровня безопасности, в том числе для снижения риска, связанного с возможным причинением вреда жизни и здоровью граждан, окружающей среде, близлежащей инфраструктуре и имуществу.

Основным показателем работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций является надежность системы, определяемая как ее способность поддерживать выполнение требуемых функций в течение времени в соответствии с заданными целями и условиями использования. Высокий уровень надежности системы снижает риск возникновения нештатных ситуаций, которые могут привести к появлению аварийных состояний, характеризующихся достижением предельных значений с последующим уменьшением показателя эксплуатационной безопасности [6–10].

Иными словами, система мониторинга инженерных конструкций должна обеспечивать возможность детальной оценки технического состояния сооружения в момент наступления нештатных ситуаций с последующей оценкой рисков в кратчайшие сроки

для недопущения ухудшения потребительских свойств мостового сооружения [10–13].

В данной статье авторами предложен структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста, что позволит уменьшить количество ложных срабатываний системы, а также оценить текущее состояние мостового сооружения.

Структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций

При эксплуатации действующей СМИК вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге авторами наблюдались многочисленные нештатные ситуации, связанные со срабатыванием подсистемы динамических показателей, а именно: акселерометры, расположенные на вершинах пилонов, фиксировали ускорение колебаний, превышающих предельные значения.

При анализе нештатных ситуаций авторами предлагается использовать структурный подход к оценке работоспособности СМИК. Этапы структурного подхода представлены на рис. 1.

I этап предполагает выявление закономерностей и зависимостей возникновения с последующей их группировкой. На этапе выборочного анализа важно определить закон распределения вероятностей случайных величин ускорений колебаний пилонов для понимания причин возникновения нештатных ситуаций и поиска инструментов для их количественного снижения. На III этапе предлагается методика оценки работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций с последующей валидацией всех случаев срабатывания СМИК за весь период эксплуатации вантового моста.



Рис. 1. Этапы структурного подхода

Предварительный анализ полученных ускорений колебаний показал, что все срабатывания подсистемы динамических показателей можно разделить на две группы.

К первой группе относятся нештатные ситуации, вызванные динамическим откликом сооружения.

На рис. 2 показан график — акселерограмма изменения ускорений колебаний пилона V-12 вдоль оси Y (направление, перпендикулярное оси моста), полученных с акселерометра, расположенного на вершине пилона. Горизонтальными линиями на графике показаны пороговые значения, равные $\pm 2,5 \text{ м/с}^2$, полученные

из расчетной модели при проектировании сооружения.

На представленном графике видно, что локализованные участки резкого изменения значений ускорений колебаний отсутствуют, что характеризует сигнал как наполненный. Для подтверждения обоснованности срабатывания системы в данном случае авторы используют метод анализа, основанный на теории вероятности. Для этого делается предположение, что случайные величины распределяются по стандартному нормальному закону распределения с последующим построением графика функции плотности вероятности для рассматриваемого сигнала, который представлен на рис. 3.

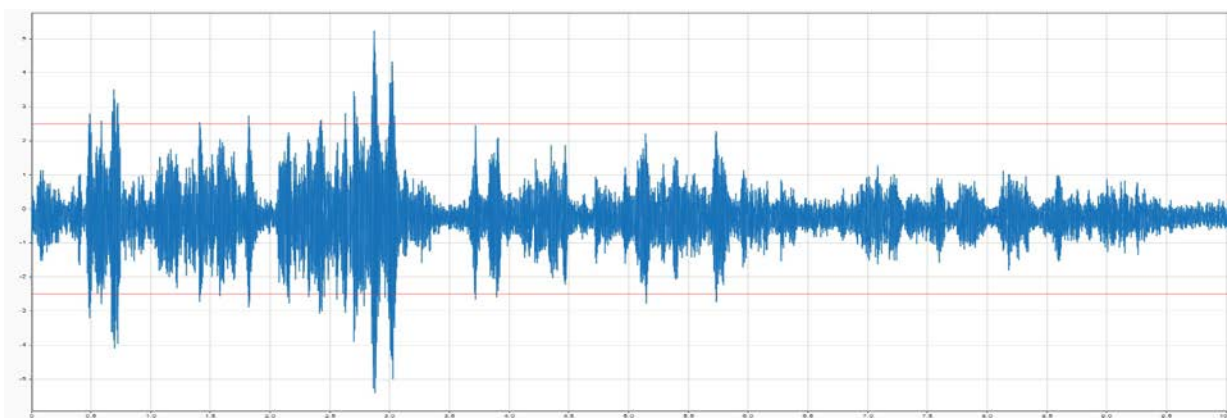


Рис. 2. График изменения ускорений колебаний на пилоне V-12

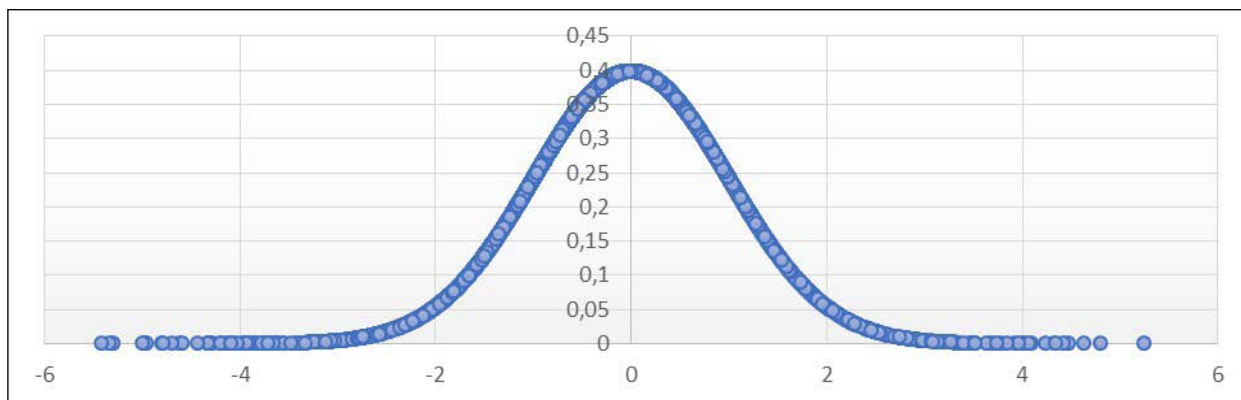


Рис. 3. Функция плотности вероятности случайных величин для сигнала с акселерометра

По графику видно, что случайные величины ускорений колебаний пилона распределяются по закону, близкому к стандартному нормальному с околонулевым значением математического ожидания. Диапазон регистрируемых значений (от -5 м/с^2 до $+5 \text{ м/с}^2$) является равномерно заполненным, что характеризуют сливающиеся синие точки на графике. В окрестностях экстремальных значений ускорений присутствует некоторое количество отдельно стоящих точек, что показывает наличие случайных ошибок

в процессе измерений или передачи сигнала с датчика на преобразователь. В данном случае срабатывание системы СМИК следует считать обоснованным, так как статистически достоверные значения экстремальных ускорений лежат за границей предельных значений.

Далее приводится еще один пример корректного срабатывания СМИК на пилоне V-13. График и функция плотности вероятности представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

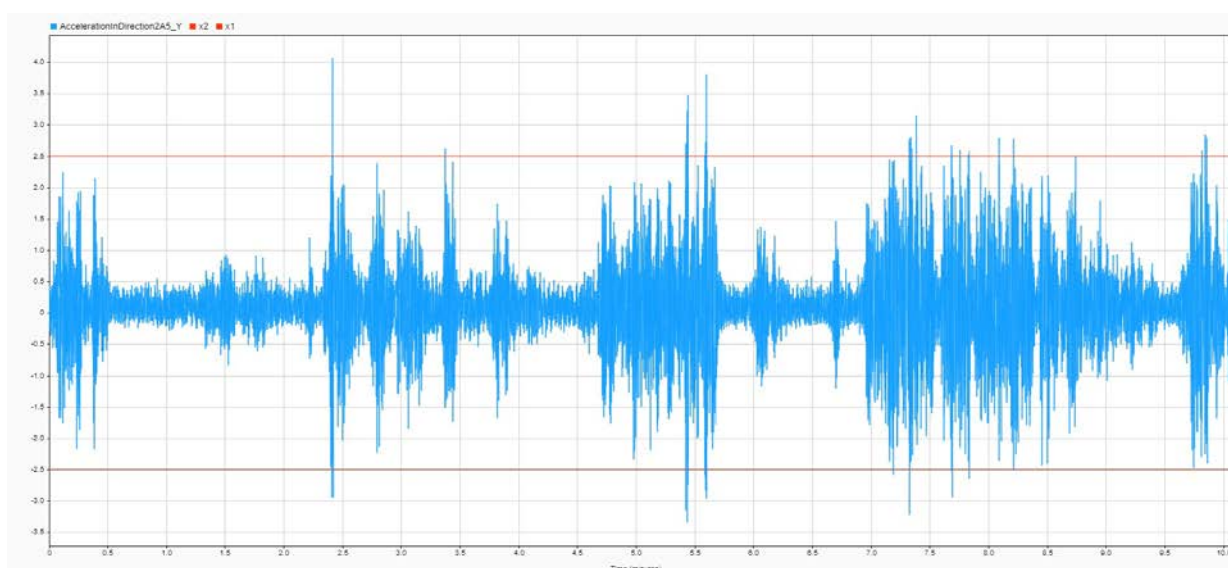


Рис. 4. График изменения ускорений колебаний на пилоне V-13

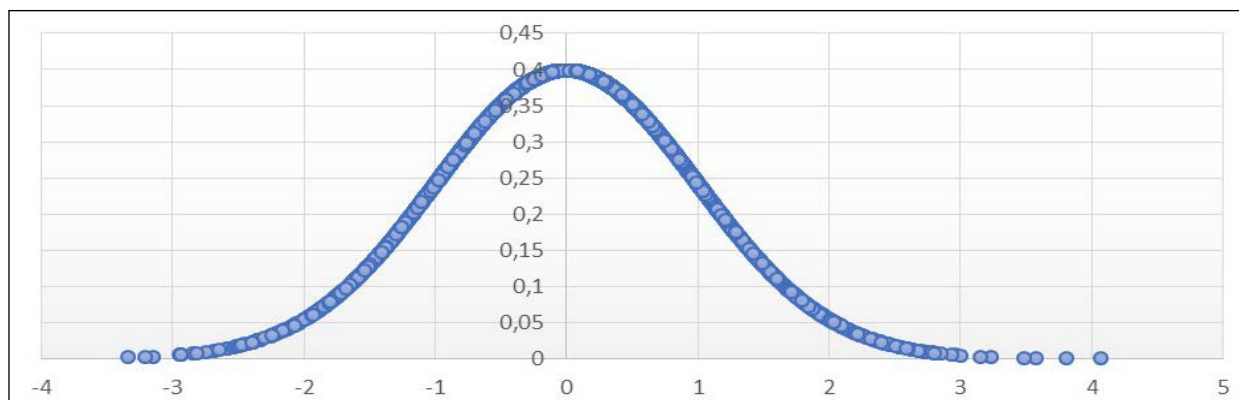


Рис. 5. Функция плотности вероятности случайных величин для сигнала с акселерометра

Из графика функции плотности вероятности видно, что количество случайных ошибок выше, чем в первом случае, однако срабатывание СМИК все еще считается обоснованным.

Ко второй группе нештатных ситуаций относятся случаи, когда срабатывание системы произошло по причине ошибок/сбоев

в работе акселерометра или преобразователя данных. Такие случаи срабатывания системы будем обозначать термином «выброс».

На рис. 6 показан график — акселерограмма фиксации выброса. На графике видно, что предельные значения превышаются единичными, сильно локализованными экстремумами значениями ускорений.

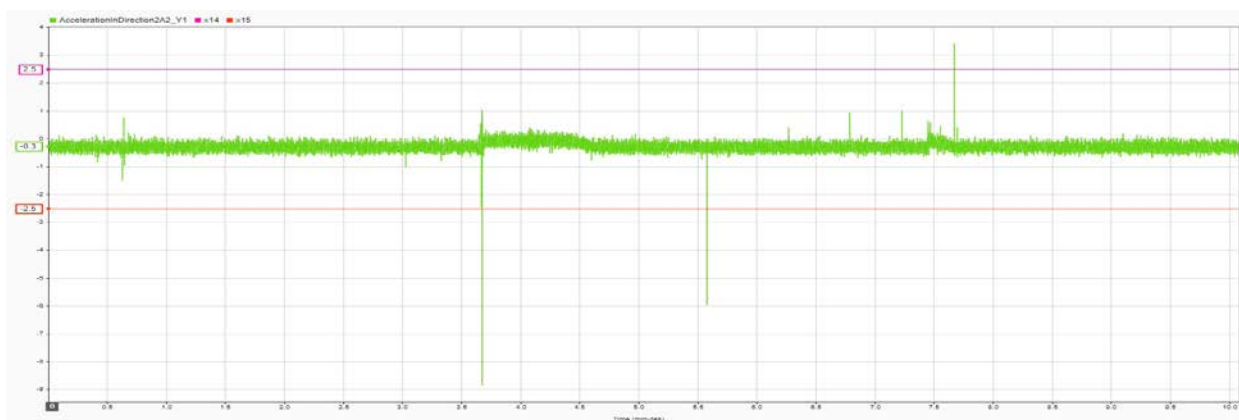


Рис. 6. График изменения ускорений колебаний на пилоне V-12

Аналогичным способом, используя теорию вероятности и математическую статистику, строится график функции плотности вероятности нормального распределения, представленный на рис. 7. Из графика видно, что функция заполнена

только в зоне околонулевого математического ожидания. Область положительных значений ускорений описывается одной точкой, область отрицательных значений — тремя точками в диапазоне от -2 до -9 м/с².

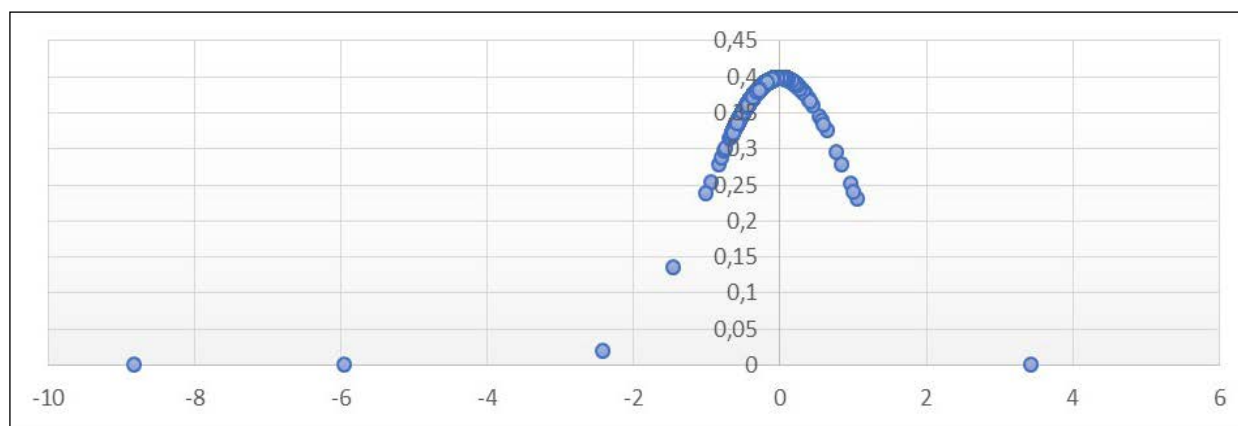


Рис. 7. Функция плотности вероятности случайных величин для сигнала с акселерометра

На II этапе структурного подхода необходимо проверить предположение о том, что случайные величины ускорений колебаний, полученные с акселерометров, распределяются по стандартному нормальному закону распределения. Распределением Гаусса принято считать закон распределения с математическим ожиданием, равным 0, и стандартным отклонением, равным 1. В данном научном исследовании авторы использовали два критерия согласия: тест Харке — Бера и критерий Колмогорова.

Принцип теста Харке — Бера заключается в сравнении асимметрии и эксцесса фактического распределения выборки из случайных величин со значениями асимметрии и эксцесса стандартного нормального распределения, равные

$$\bar{A} = 0, \quad (1)$$

$$\bar{E} = 0. \quad (2)$$

Асимметрия показывает смещение кривой относительно 0 влево или вправо и определяется по формуле (3):

$$\hat{A} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^{3/2}}. \quad (3)$$

Эксцесс характеризует скорость распределения и определяется формулой (4):

$$\hat{E} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^2} - 3, \quad (4)$$

где x_i — i -й элемент выборки;

n — объем выборки;

\bar{x} — среднее арифметическое выборки.

При статистическом анализе закона распределения возникает неопределенность относительно допустимых отклонений между оценками асимметрии и эксцесса и их теоретическими значениями. Величины асимметрии и эксцесса, показанные в формулах (1) — (2), являются идеальными для стандартного нормального закона распределения, которые недостижимы из-за возникновения случайных ошибок распределения.

В соответствии с центральной предельной теоремой с увеличением числа одинаково распределенных и независимых слагаемых закон распределения их суммы стремится

к нормальному распределению. Случайные величины, используемые в формулах (3)—(4), независимы при условии, что среднее арифметическое случайных ошибок измерений незначительно отличается от нуля.

Из этого следует, что значения асимметрии и эксцесса при увеличении числа наблюдений стремятся к нормальному закону распределения, что позволяет определить пороговые отклонения фактических значений асимметрии и эксцесса выборки случайных величин ускорений по формулам (5) — (6):

$$|\hat{A}| < t \cdot \bar{\sigma}_{\hat{A}}, \quad (5)$$

$$|\hat{E}| < t \cdot \bar{\sigma}_{\hat{E}}, \quad (6)$$

где $\bar{\sigma}_{\hat{A}}$ и $\bar{\sigma}_{\hat{E}}$ — среднеквадратические отклонения фактических коэффициентов асимметрии и эксцесса выборки случайных величин;

t — квантиль стандартного нормального распределения, равный 1,645, для уровня надежности 95 %.

Среднеквадратические отклонения фактических коэффициентов асимметрии и эксцесса рассчитываются по формулам (7) — (8):

$$\bar{\sigma}_{\hat{A}} = \sqrt{\frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}}, \quad (7)$$

$$\bar{\sigma}_{\hat{E}} = \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n-1)^2(n+3)(n+5)}}. \quad (8)$$

Для подтверждения нулевой гипотезы по тесту Харке — Бера необходимо выполнение условий (2,5) — (2,6). При выполнении только одного условия нулевая гипотеза отвергается.

При срабатывании СММК акселерометр начинает записывать измерения с максимальной частотой дискретизации, равной ~50,4 Гц, в течение 600 сек. Из полученных данных с акселерометра следует, что объем выборки равен $n = 30250$. Тогда предельные отклонения для коэффициентов асимметрии и эксцесса равны

$$t \cdot \bar{\sigma}_{\hat{A}} = 1,645 \cdot \sqrt{\frac{6(30250-1)}{(30250+1)(30250+3)}} = 0,023166, \quad (9)$$

$$t \cdot \bar{\sigma}_{\hat{E}} = 1,645 \cdot \sqrt{\frac{24 \cdot 30250(30250-2)(30250-3)}{(30250-1)^2(30250+3)(30250+5)}} = 0,046327. \quad (10)$$

Для проверки предположения по тесту Харке — Бера использовались выборки по 1-й группе, то есть величины ускорений при обоснованном срабатывании СММК. Результаты теста представлены в табл. 1.

По результатам видно, что в ряде выборов коэффициент асимметрии удовлетворяет неравенству (5), что показывает сим-

метричность графика функции плотности распределения относительно 0. Также из полученных результатов следует, что коэффициент эксцесса превышает предельные значения, полученные по формуле (10), что свидетельствует об островершинности кривой и наличии длинных хвостов, отличных от стандартного нормального распределения.

Как было описано выше, для подтверждения гипотезы по тесту Харке — Бера необходимо выполнение двух условий, из чего следует сделать вывод, что нулевая гипотеза отвергается, следовательно, случайные величи-

ны ускорений колебаний не распределены по стандартному нормальному закону распределения. Для того чтобы точно убедиться в этом, рассматривается второй критерий согласия — критерий Колмогорова.

ТАБЛИЦА 1. Результаты теста Харке — Бера и критерия Колмогорова

№ п/п	Наименование выборки	Асимметрия	Экссесс	Критерий Колмогорова	ИТОГ
1	Выборка № 1	-0,02217	10,18146	0,130552	Гипотеза отвергается
2	Выборка № 2	0,044828	15,26659	0,149097	Гипотеза отвергается
3	Выборка № 3	-0,2926	19,60222	0,109623	Гипотеза отвергается
4	Выборка № 4	0,015769	7,30373	0,108198	Гипотеза отвергается
5	Выборка № 5	0,020037	5,659714	0,072229	Гипотеза отвергается
6	Выборка № 6	0,013192	3,899082	0,142633	Гипотеза отвергается

Критерий согласия Колмогорова рассматривается в случае проверки простых гипотез о принадлежности исследуемой выборки известному закону распределения, а именно стандартному нормальному закону распределения.

Статистика критерия определяется по выражению (11):

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)|, \quad (11)$$

где \sup — точная верхняя граница функции $|F_n(x) - F(x)|$;

$F_n(x)$ — функция распределения исследуемой выборки;

$F(x)$ — функция стандартного нормального распределения.

Для подтверждения нулевой гипотезы о том, что выборка подчиняется стандартному нормальному закону распределения, необходимо выполнение условия (12):

$$D_n < D_{кр}, \quad (12)$$

где $D_{кр}$ — критическое число по критерию Колмогорова.

Данное число определяется по объему выборки n по формуле (13):

$$D_{кр} = \frac{1,36}{\sqrt{n}} = \frac{1,36}{\sqrt{30250}} = 0,007819. \quad (13)$$

При проверке по критерию Колмогорова использовались аналогичные выборки. Результаты проверки представлены в табл. 1. Полученные результаты также показывают, что нулевая гипотеза отвергается, из чего следует, что случайные величины ускорений колебаний пилонов не распределяются по стандартному нормальному закону распределения и предположение, сделанное выше, является неверным. В свою очередь, на графиках функции плотности вероятности распределения (рис. 3 и 5) отчетливо видно: кривая функции имеет колоколообразную форму и визуально выглядит симметричной относительно оси абсцисс. По тесту Харке — Бера также определяется коэффициент асимметрии, близкий к нулю. Такие заключения представляют возможность сделать предположение о том, что исследуемые случайные величины ускорений колебаний относятся к семейству нормальных

распределений с отличными от 0 и 1 значениями математического ожидания и стандартного отклонения соответственно.

Заключение

Авторами предложен структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге, включающий три этапа: I этап — предварительный анализ, II этап — выборочный анализ, III этап — детальный анализ.

На II этапе проведена проверка нулевой гипотезы о распределении случайных величин ускорений колебаний пилона по стандартному нормальному закону распределения. По результатам проверки гипотеза была отклонена.

Авторами озвучено предположение, что случайные величины ускорений колебаний относятся к семейству нормальных распределений с отличными от стандартного нормального закона распределения значениями математического ожидания и стандартного отклонения.

Библиографический список

1. Махонько А. А., Мальков А. В., Белый А. А. и др. Особенности системы мониторинга вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге // Путевой навигатор. 2023. № 56 (82). С. 68–77. EDN JEYBWL.
2. Махонько А. А., Мальков А. В., Белый А. А. и др. Опыт эксплуатации системы мониторинга вантового моста через петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9, № 2. С. 83–96. DOI: 10.17816/transsyst20239283-96. EDN NUIUJE.
3. Лазарев Ю. Г., Ермошин Н. А., Сенцов И. В. Планирование развития дорожной сети с учетом принципов многокритериальной оптимизации // Путевой Навигатор. 2019. № 38 (64). СПб.: АНП «Объединение «ДОРМОСТ», 2019. С. 24–31.
4. Белый А. А., Белов А. А., Ященко А. И. и др. Интегральный мониторинг моста Александра Невского // Путевой навигатор. 2020. № 45 (71). С. 38–45. EDN ZDBIAB.
5. Яшнов А. Н., Баранов Т. М. Некоторые результаты работы системы динамического мониторинга академического моста через р. Ангару в Иркутске // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1 (60). С. 199–209.
6. Карапетов Э. С., Белый А. А. Мониторинг мостовых сооружений Санкт-Петербурга. История. Назначение. Примеры. Перспективы // Вестник «Зодчий. 21 век» 2008. № 4 (29). СПб.: Зодчий, 2008. С. 80–83.
7. Geoffrey R. Thomas, Akbar A. Khatibi. Durability of structural health monitoring systems under impact loading. // Procedia Engineering. 2017. № 188. P. 340–347.
8. Yang Y., Q. S. Li, B. W. Yan. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China // Advances in Mechanical Engineering. 2017. Vol. 9 (1). P. 1–10. DOI: 10.1177/1687814016684272.
9. Mosbeh R. Kaloop and Jong Wan Hu. Dynamic Performance Analysis of the Towers of a Long-Span Bridge Based on GPS Monitoring Technique // Journal of Sensors. 2016. Vol. 2016. Article ID 7494817. P 14. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7494817>.
10. Lienhart W., Ehrhart M. State of the art of geodetic bridge monitoring Structural Health Monitoring 2015: System Reliability for Verification and Implementation // Proceedings of the 10th International Workshop on Structural Health Monitoring. 2015. DOI: 10.12783/SHM2015/58.
11. Li J, Hao H. Damage detection of shear connectors under moving loads with relative displacement measurements. Mech Syst Signal Pr. 2015. 60–61: 124–150.

12. Rucker W., Hille F., Rohrmann R. Guideline for structural health monitoring. Final report // SAMCO. Berlin: 2006. P. 63.

13. Sumitro S., Wang M. L. Structural Health Monitoring System Applications in Japan. S. Sumitro / In: Ansari F. (eds) Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring. Springer, Dordrecht, 2005. P. 495–504. https://doi.org/10.1007/1-4020-3661-2_49.

Дата поступления: 26.04.2024

Решение о публикации: 26.05.2024

Контактная информация:

МАХОНЬКО Андрей Андреевич —
начальник отдела

дорожного надзора;
andrey.makhonko@nch-spb.ru

ЛАЗАРЕВ Юрий Георгиевич —
докт. техн. наук, профессор;
lazarev_yug@spbstu.ru

АНТОНЮК Анатолий Анатольевич —
инженер;

aaa.12.03.1992@mail.ru

Structural approach to assessing the performance of the monitoring system of engineering structures of the cable-stayed bridge over the Petrovsky Canal in the construction of the western speed diameter highway in St. Petersburg. Part 1

A. A. Makhonko¹, Y. G. Lazarev², A. A. Antonyuk³

¹ Highway Operator Nord, LLC, 3A, lit. A, per. Volynsky, Saint Petersburg, 191186, Russia

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, lit. B, Polytechnicheskaya str., Saint Petersburg, 195251, Russia

³ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Makhonko A. A., Lazarev Y. G., Antonyuk A. A. Structural approach to assessing the performance of the monitoring system of engineering structures of the cable-stayed bridge over the Petrovsky Canal in the construction of the western speed diameter highway in St. Petersburg // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2024, vol. 21, iss. 2, pp. 421–431. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-2-421-431

Abstract

Purpose: assessing the performance of the monitoring system for engineering structures and assessing the current state of the structures of the cable-stayed bridge across the Petrovsky Canal in the alignment of the Western High-Speed Diameter highway in the city of St. Petersburg due to the occurrence of emergency situations in which accelerometers on the pylons record values exceeding the limit. **Methods:** statistical data from the databases of the existing system of monitoring engineering structures is used to obtain the results. The tasks, set within the framework of the study, are accomplished by applying the theoretical methods of scientific knowledge: the analytical method, the mathematical statistics theory, induction. **Results:** the resulting structural approach to assessing the performance of the monitoring system for engineering structures on cable-stayed bridges makes it possible to reduce the number of false alarms of the system and assess the current state of the bridge structure. Within the framework of the III stage of the structural approach, it is proposed to develop a methodology for assessing the performance of the monitoring system for engineering structures with subsequent assessment of the current state of cable-stayed bridge structures. **Practical significance:** the results of the work are important for construction as they expand the understanding of the features of the mechanism of soil freezing.

Keywords: structural artificial monitoring, technical condition management, transport infrastructure object, cable-stayed bridge, stressed-deformed condition, accelerometer, vibration monitoring.

References

1. Mahon'ko A. A., Mal'kov A. V., Belyj A. A. i dr. Osobennosti sistemy monitoringa vantovogo mosta cherez Petrovskij kanal v stvore avtomobil'noj dorogi «Zapadnyj skorostnoj diametr» v Sankt-Peterburge // *Putevoj navigator*. 2023. № 56 (82). S. 68–77. EDN JEYBWL. (In Russian)
2. Mahon'ko A. A., Mal'kov A. V., Belyj A. A. i dr. Opyt jeksploatatsii sistemy monitoringa vantovogo mosta cherez petrovskij kanal v stvore avtomobil'noj dorogi «Zapadnyj skorostnoj diametr» v Sankt-Peterburge // *Innovacionnye transportnye sistemy i tehnologii*. 2023. T. 9, № 2. S. 83–96. DOI: 10.17816/trans-syst20239283-96. EDN NUIUJE. (In Russian)
3. Lazarev Ju. G., Ermoshin N. A., Sencov I. V. Planirovanie razvitija dorozhnoj seti s uchetom principov mnogokriterial'noj optimizatsii // *Putevoj Navigator*. 2019. № 38 (64). SPb.: ANP «Ob#edinenie «DOR-MOST», 2019. S. 24–31. (In Russian)
4. Belyj A. A., Belov A. A., Jashhenko A. I. i dr. Integral'nyj monitoring mosta Aleksandra Nevskogo // *Putevoj navigator*. 2020. № 45 (71). S. 38–45. EDN ZD-BIAB. (In Russian)
5. Jashnov A. N., Baranov T. M. Nekotorye rezul'taty raboty sistemy dinamicheskogo monitoringa akademicheskogo mosta cherez r. Angaru v Irkutske // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2017. № 1 (60). S. 199–209. (In Russian)
6. Karapetov Je. S., Belyj A. A. Monitoring mostovyh sooruzhenij Sankt-Peterburga. Istorija. Naznachenie. Primery. Perspektivy // *Vestnik «Zodchij. 21 vek»* 2008. № 4 (29). SPb.: Zodchij, 2008. S. 80–83. (In Russian)
7. Geoffrey R. Thomas, Akbar A. Khatibi. Durability of structural health monitoring systems under impact loading. // *Procedia Engineering*. 2017. № 188. P. 340–347.
8. Yang Y., Q. S. Li, B. W. Yan. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China // *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 9 (1). P. 1–10. DOI: 10.1177/1687814016684272.
9. Mosbeh R. Kaloop and Jong Wan Hu. Dynamic Performance Analysis of the Towers of a Long-Span Bridge Based on GPS Monitoring Technique // *Journal of Sensors*. 2016. Vol. 2016. Article ID 7494817. P 14. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7494817>.
10. Lienhart W., Ehrhart M. State of the art of geodetic bridge monitoring Structural Health Monitoring 2015: System Reliability for Verification and Implementation // *Proceedings of the 10th International Workshop on Structural Health Monitoring*. 2015. DOI: 10.12783/SHM2015/58.
11. Li J, Hao H. Damage detection of shear connectors under moving loads with relative displacement measurements. *Mech Syst Signal Pr*. 2015. 60–61: 124–150.
12. Rucker W., Hille F., Rohrmann R. Guideline for structural health monitoring. Final report // SAMCO. Berlin: 2006. P. 63.
13. Sumitro S., Wang M. L. Structural Health Monitoring System Applications in Japan. S. Sumitro / In: Ansari F. (eds) *Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring*. Springer, Dordrecht, 2005. P. 495–504. https://doi.org/10.1007/1-4020-3661-2_49.

Received: 26.04.2024

Accepted: 26.05.2024

Author's information:

Andrey A. MAKHONKO — head of construction supervision department; andrey.makhonko@nch-spb.ru

Yurij G. LAZAREV — PhD in Engineering, Professor; lazarev_yug@spbstu.ru

Anatoly A. ANTONYUK — Engineer; aaa.12.03.1992@mail.ru

УДК 656.022.8

О грузоперевозках на существующем главном ходу Октябрьской железной дороги после ввода в эксплуатацию ВСМ Москва — Санкт-Петербург

Н. С. Бушуев, Д. О. Шульман

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

Для цитирования: Бушуев Н. С., Шульман Д. О. О грузоперевозках на существующем главном ходу Октябрьской железной дороги после ввода в эксплуатацию ВСМ Москва — Санкт-Петербург // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21., вып. 2. С. 432–439. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-432-439

Аннотация

Цель: изучить особенности перераспределения пассажирских и грузовых перевозок на полигоне Октябрьской железной дороги «главный ход — кружные маршруты» и показать необходимость продолжения исследований с учетом ввода в 2028 году выделенной высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Санкт-Петербург (далее — ВСМ). **Методы исследования:** анализ опубликованных результатов научно-исследовательских работ, изучение основных нормативных документов, отчетов, докладов и других источников в рамках представленной темы с учетом отражения ключевых задач развития железнодорожного транспорта, в том числе сети ВСМ, согласно Транспортной стратегии РФ до 2030 года с прогнозом до 2035 года. **Результаты:** установлено, что после переключения грузопотока с главного хода на кружные маршруты в России значительно выросли тарифы и увеличился срок доставки грузов железнодорожным транспортом. В условиях роста общего объема контейнерных перевозок в направлении портов Северо-Запада основная часть грузов осваивается автомобильным транспортом. На маршруте Москва — Санкт-Петербург сложилась сильнейшая конкуренция между поездами «Сапсан» и авиатранспортом в борьбе за пассажира. Модернизированный железнодорожный путь под скоростное сообщение «Сапанов» работает на пределе провозной способности. Это подтверждает актуальность строительства выделенной высокоскоростной магистрали на данном направлении и подчеркивает важность исследований в области перераспределения пассажирских и грузовых перевозок на рассматриваемом полигоне Октябрьской железной дороги «главный ход — кружные маршруты». **Практическая значимость:** использование результатов исследований позволит повысить конкурентоспособность железных дорог в сравнении с автомобильным и авиационным видами транспорта на полигоне Октябрьской железной дороги «главный ход — кружные маршруты».

Ключевые слова: главный ход Октябрьской железной дороги, Москва — Санкт-Петербург, пассажиропоток, «Сапсан», грузопоток, высокоскоростная железнодорожная магистраль, ВСМ.

Введение

До 1990 года по маршруту Санкт-Петербург — Москва обращалось порядка 50–60 пар грузовых и 40–60 пар пассажирских поездов в сутки [1–2]. Уже тогда на главном ходу магистрали курсировали ско-

ростные электропоезда. Время в пути советского электропоезда ЭР-200 составляло 4 часа 50 мин, а фирменный поезд «Аврора» преодолевал 650 км пути за 6 часов. С целью дальнейшего наращивания пропускной

способности в период 1990–2000 годов главный ход Октябрьской магистрали был дважды модернизирован.

В 2000-х годах произошли глобальные изменения в транспортной отрасли России, в том числе железнодорожной. Министерство путей сообщения было упразднено, основные управленческие функции перешли в Минтранс России, ФАЖТ и другие структуры. Владельцем инфраструктуры общего пользования стала образованная в 2003 году компания «РЖД».

В 2006 году холдинг совместно с компанией Siemens AG заключил договор на поставку скоростных поездов «Сапсан». В декабре 2009 года немецкие поезда пустили по модернизированным путям главного хода. Проект строительства выделенной высокоскоростной железнодорожной магистрали (далее — ВСМ) на данном маршруте остался в статусе обсуждаемых и перспективных.

Поезда «Сапсан» сегодня курсируют между двумя столицами как без остановок (время в пути 3 часа 47 мин), так и с остановками в Твери, Окуловке, Бологом, Чудове (время стоянки 1 мин, общее время в пути — более 4 часов). Максимальная скорость движения не превышает 250 км/ч. С лета 2023 года на маршруте появилась дополнительная остановка — станция Крюково с целью высадки пассажиров, проживающих в Зеленоградском административном округе Москвы, исключая необходимость прибытия на Ленинградский вокзал.

О грузоперевозках на полигоне Октябрьской железной дороги «главный ход — круглые маршруты»

С момента запуска «Сапанов» грузовые поезда были перекинута с главного хода на круглые маршруты (рис. 1). На линии

Санкт-Петербург — Бологое — Москва остались сборные поезда и порядка 4 пар ускоренных контейнерных поездов.

Через Вологду — Бабаево по двухпутным электрифицированным линиям проходит около 90 пар поездов, через Дно и Новосокольники по неэлектрифицированному участку — порядка 15 пар грузовых поездов. Модернизированный Сонковский ход (Дмитров — Савелово — Сонково — Мга) на тепловозной тяге пропускает до 24 пар грузовых поездов [1–2]. Ввиду растущих объемов перевозок в направлении портов Северо-Запада продолжают работы по наращиванию мощности Сонковского хода планируется увеличение пропускной способности до 38 пар поездов в сутки [3].

К 2028 году в России планируется построить двухпутную выделенную ВСМ Москва — Санкт-Петербург протяженностью 679 км с безостановочным временем в пути 2 часа 15 мин (рис. 2) [4–5]. В настоящее время проводятся инженерные изыскания, выполнена большая часть проектных работ, ведется опытно-конструкторская работа по созданию российского высокоскоростного подвижного состава с максимальной скоростью 400 км/ч [6–7].

На участке Ленинградский вокзал — ст. Алабушево в сложных стесненных условиях ведется строительство входа трассы будущей высокоскоростной магистрали в столицу. Сооружаются пятые и шестые железнодорожные пути протяженностью 43 км для движения поездов со скоростью до 200 км/ч. По вновь построенным путям планируется эксплуатировать «Сапсаны» и поезда дальнего следования до момента ввода всей новой трассы ВСМ Санкт-Петербург — Москва [8].



Рис. 1. Схема грузопотока в обход главного хода Октябрьской железной дороги [1–2]



Рис. 2. Трасса ВСМ Москва — Санкт-Петербург (источник: <http://www.hsrail.ru/>)

Скорость по выделенной магистрали в черте Санкт-Петербурга также будет ограничена 200 км/ч. На участке Санкт-Петербург — Главный ВСМ — Обухово-2 в настоящее время ведется проектирование, планировочные решения проходят градостроительные согласования. Согласно источнику [9], терминал для будущей ВСМ будет интегрирован в сеть метрополитена Северной столицы, в частности вестибюль метро «Лиговский проспект — 2» в перспективе возьмет основной поток пассажиров, следующих из Москвы.

В апреле 2024 года был утвержден перечень поручений Президента России Владимира Путина по итогам совещания по вопросу строительства ВСМ Москва — Санкт-Петербург [10]. Стало известно о том, что ООО «ВСМ «Две столицы», генеральным директором которого назначен Олег Тони, станет концессионером строительства высокоскоростной магистрали. Партнерами со стороны государства высту-

пят ОАО «РЖД», ПАО «Сбербанк» и правительства городов и регионов в зоне прохождения трассы ВСМ [11].

Ожидаемые размеры пассажиропотока эксперты прогнозируют на уровне 23 млн человек в год. В сутки планируется эксплуатация 40 пар поездов с интервалом в часы пик 10 минут. Стоимость строительства оценивается в 2 трлн руб. [12].

После запуска выделенной высокоскоростной магистрали существующая линия Москва — Санкт-Петербург может быть частично освобождена от интенсивного пассажирского сообщения «Сапсанов», которые курсируют сегодня, занимая большую часть времени в суточном графике, а значит, возможен возврат грузопотока на главный ход. Анализ результатов и перспективы грузовой работы на маршруте Санкт-Петербург — Москва требуют дополнительных исследований. Вот некоторые цифры, согласно опубликованным материалам по данной тематике.

Согласно источнику [13], эксперты прогнозируют, что после запуска ВСМ возможна перевозка 30 млн грузов в год по разгруженным путям. Основная доля перевозок придется на контейнерные поезда с товарами народного потребления. Дальность возки грузов может сократиться на 400 км в сравнении с протяженностью обходных путей. Также в перспективе треть грузопотока может перейти с контейнерного автомобильного транспорта на железнодорожный. Сегодня автографик по трассам М-10 и М-11 составляет 3 млн TEU в год, в основном это перевозка продуктов питания, товаров народного потребления, автомобилей и комплектующих [13]. Важно отметить мнение экспертов о том, что при переключении грузопотоков на железную дорогу необходимы пересмотр тарифов и внесение изменений в действующую нормативно-правовую базу в зависимости от дальности возки.

В работах авторов [1–2; 14–15] отмечены преимущества возврата грузовых поездов на существующую линию Москва — Санкт-Петербург. К ним относятся сокращение тарифов на перевозку грузов (согласно приказу Минтранса, в коридоре Москва — Санкт-Петербург тариф рассчитывается по фактическому расстоянию, а не по кратчайшему), минимизация эксплуатационных расходов холдинга, уменьшение сроков доставки грузов в направлении Северо-Запад — центр, Поволжье, юг, а также возможность освоения дополнительного перспективного грузопотока в коридоре Вологда-1 — Волховстрой-1 — Санкт-Петербург для восточного грузонаправления.

В источниках [1–2; 14–15] обозначено, что главный ход Санкт-Петербург — Бологое — Москва сможет освоить порядка 50 пар грузовых поездов (с учетом переключения грузопотоков, следующих через Дно и Новосоколь-

ники, и с направления Санкт-Петербург — Вологда — Ярославль — Александров). На Сонковский ход смогут переключиться другие грузопотоки. В свою очередь, эксперты [1–2] указывают на необходимость модернизации железнодорожного пути ввиду наличия пассажирских перевозок, в том числе скоростных, на существующей линии Москва — Санкт-Петербург после ввода в эксплуатацию ВСМ. Согласно прогнозам Института экономики и развития транспорта [1–2], на линии будут курсировать 45 пар пассажирских поездов в сутки, среди которых ночные поезда и пассажирские в сторону Поволжья и юга страны, и на маршруте Москва — Тверь около 20 пар поездов «Ласточка».

Заключение

После переключения грузопотока с главного хода на кружные маршруты выросли тарифы и увеличился срок доставки грузов железнодорожным транспортом. В направлении портов Северо-Запада большая часть контейнерных грузов осваивается автомобильным транспортом [1–2]. Наряду с этим стоит отметить, что сегодня в России наблюдается положительная динамика роста общего объема контейнерных грузоперевозок [16–18]. К 2030 году, согласно Транспортной стратегии [19], поставлена задача увеличить объем перевозок из регионов Урала и Сибири в сторону портов Северо-Западного региона с текущих 145 млн т до 220. В свою очередь, скоростные «Сапсаны» между Санкт-Петербургом и Москвой осваивают ежегодный пассажиропоток более 5 млн [20–26], дальнейший рост которого ограничен провозной способностью маршрута. Это подтверждает актуальность строительства выделенной высокоскоростной магистрали на данном направлении

и подчеркивает важность исследований в области перераспределения пассажирских и грузовых перевозок на рассматриваемом полигоне Октябрьской железной дороги «главный ход — кружные маршруты».

Библиографический список

1. Вакуленко С. П., Колин А. В., Егоров П. А. и др. Возможность возвращения грузовых перевозок на главный железнодорожный ход Санкт-Петербург — Москва // Экономика железных дорог. 2021. № 12. С. 31–42.

2. Вакуленко С. П., Колин А. В., Егоров П. А. и др. О целесообразности грузовых перевозок на главном железнодорожном ходу Санкт-Петербург — Москва // Железнодорожный транспорт. 2022. № 3. С. 16–23.

3. Грузам обновят пути // Гудок. 2021. 12 мая [Электронный ресурс]. URL: <https://gudok.ru/content/analitika/infrastructure/1563671/?sphrase=0>

4. Специальные технические условия. Проектирование, строительство и эксплуатация высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Санкт-Петербург (ВСЖМ-1). Изменение 1. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023 (утверждены О. В. Тони от 15.04.2024 № 647).

5. Kiselev I. P., Bushuev N. S., Shulman D. O. High-speed railways in the BRICS countries // BRICS Transport. 2023. Vol.2, No.4. URL: <https://10.46684/2023.1.2>

6. Техническое задание на опытно-конструкторские работы. Высокоскоростной электропоезд для ВСМ. Утв. заместителем генерального директора ОАО «РЖД». 2020. № 1821. С. 393.

7. Ключевые вопросы научного сопровождения транспортной системы: монография / под ред. В. И. Колесникова и А. С. Мишарина. М.: Прометей, 2022. С. 20–27.

8. Скорость требует средств // Гудок. № 123 от 14.07.2023.

9. ВСМ на Лиговке // Гудок. № 14 от 26.04.2024.

10. Перечень поручений по итогам совещания по вопросу строительства высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Санкт-Петербург (утв. Президентом РФ 05.04.2024 № Пр-663).

11. Владимир Путин поставил задачи по ВСМ // Гудок. 2024. 8 апреля [Электронный ресурс]. URL: <https://gudok.ru/content/obshchestvo/vlast/1665653/?sphrase=0>

12. ВСМ набирает скорость. Главные факты о проекте, который изменит страну // Гудок. 11 апреля [Электронный ресурс]. URL: <https://gudok.ru/content/analitika/infrastructure/1666322/>

13. Эксперты оценили поток грузов между Москвой и Петербургом после ввода ВСМ // Рос-бизнесконсалтинг. 2024. 5 апреля [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rbc.ru/business/05/04/2024/660f9ba09a79474d4f7819f4>

14. Вакуленко С. П., Колин А. Р., Роменский Д. Ю. и др. Санкт-Петербургский транспортный узел: перспективы развития. Часть I // Организация пригородных и пригородно-городских пассажирских перевозок железнодорожным транспортом. Монография / под ред. Вакуленко С. П. МИИТ. ВИНТИ РАН. 2020. 192 с.

15. Вакуленко С. П., Колин А. Р., Роменский Д. Ю. и др. Московский транспортный узел: перспективы развития. Часть III // Структура грузопотоков различных видов транспорта и основные сценарии развития грузовой работы. Монография / под ред. Вакуленко С. П. МИИТ. ВИНТИ РАН, 2020. 208 с.

16. Бородин А. Ф. Взаимодействие и развитие железнодорожных узлов центра и северо-запада сети ОАО «РЖД». 2023. № 8–1. С. 44–61.

17. Бушуев Н. С., Шульман Д. О. Структура грузопотока контейнерных перевозок на железнодорожном транспорте: существующее состояние и рекомендации // Сборник «Инфраструктура транспорта» под ред. В. С. Шварцфельда. № 1 (3). СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022. С. 5–15.

18. Бушуев Н. С., Шульман Д. О., Рочев Н. А. Состояние и рост потока контейнерных грузов на железнодорожном транспорте России (в период пандемии COVID-19) // *Транспорт БРИКС*. 2023. Т. 2. Вып. 1. Ст. 2. URL: <https://10.46684/2023.1.2>.
19. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (утверждена распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 года № 3363-р). 285 с.
20. Бушуев Н. С., Шульман Д. О., Сагайдак К. М. Анализ динамики пассажиропотока поездов «Сапсан» и авиационного транспорта на линии Москва — Санкт-Петербург до 2025 года / *Бюллетень результатов научных исследований*. СПб.: ПГУПС, 2019. Вып. 1. С. 5–14. URL: <http://brni.info/archive/2019/1.html>
21. Бушуев Н. С., Шульман Д. О., Рочев Н. А. Результаты освоения пассажирских перевозок на направлении Москва — Санкт-Петербург в кризисные 2020–2021 годы // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. СПб.: ПГУПС, 2023. Т. 20. Вып. 1. С. 16–27. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-16-27
22. Бушуев Н. С., Миненко Д. О. Оценка востребованности высокоскоростной железнодорожной магистрали на полигоне Санкт-Петербург — Москва // *Известия ПГУПС*. Вып. 2. СПб.: ПГУПС, 2013. С. 5–11.
23. Бушуев Н. С., Шульман Д. О. О перспективах развития высокоскоростных железнодорожных магистралей в России // *Бюллетень результатов научных исследований*. 2017. № 3. С. 7–14.
24. Алпысова В. А., Бушуев Н. С., Миненко Д. О. Моделирование и прогнозирование пассажиропотока высокоскоростной магистрали на примере поездов «Сапсан» направления Санкт-Петербург — Москва // *Транспорт Урала*. 2014. № 2 (41). С. 50–53.
25. Бушуев Н. С., Шульман Д. О., Сагайдак К. М. Modeling of container freight and passenger traffic // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, Interagromash, 2019.
26. *Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс* / И. П. Киселев, Л. С. Блажко, М. Я. Брынь и др.: учеб. пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта в 2 томах (2-е издание, переработанное и дополненное). М.: 2020. Т. 1.

Дата поступления: 25.03.2024

Решение о публикации: 25.05.2024

Контактная информация:

БУШУЕВ Николай Сергеевич — канд. техн. наук, доцент; 2009bushuev@rambler.ru

ШУЛЬМАН Дарина Олеговна — канд. техн. наук, доцент; shulman@pgups.ru

About cargo traffic on the main route of Oktyabrskaya Railway after construction high-speed railway Moscow — St. Petersburg

N. S. Bushuev, D. O. Shulman

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

For citation: Bushuev N. S., Shulman D. O. About cargo traffic on the main route of Oktyabrskaya Railway after construction high-speed railway Moscow — St. Petersburg // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024, vol. 21, iss. 2, P. 432–439. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-432-439

Abstract

Objective: to study the change of passenger and freight traffic on the Oktyabrskaya Railway “main route — the way around” and to show the need to continue research, taking into account the construction in 2028 high-speed railway Moscow — St. Petersburg (HSR). **Methods:** analysis of published research results, study of the main regulatory documents, reports and other sources taking into account the reflection of the key tasks of the development of railway transport, including the HSR network, according to the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast until 2035. **Results:** it was found that after switching cargo traffic from the main route to the way around in Russia, tariffs and the delivery time of goods by rail have increased. With the growth of the total volume of container traffic towards the ports of the North-West, the goods are transported by road. There is a strong competition between Sapsan trains and air transport in the fight for passengers on the Moscow — St. Petersburg route. The upgraded railway track for the Sapsan speed service is operating at the capacity limit. This confirms the relevance of the construction of HSR in this route and makes it important of research of passenger and freight traffic on the Oktyabrskaya Railway “main route — the way around”. **Practical importance:** the use of research results will increase the competitiveness of railways in comparison with auto and airtransport in the Oktyabrskaya Railway “main route — the way around”.

Keywords: main route of Oktyabrskaya Railway, Moscow — St. Petersburg, passenger traffic, Sapsan, cargo traffic, high-speed railway, HSR.

References

1. Vakulenko S. P., Kolin A. V., Egorov P. A. i dr. *Vozmozhnost' vozvrashheniya gruzovy'x perezovok na glavny'j zheleznodorozhny'j xod Sankt-Peterburg — Moskva / E'konomika zhelezny'x dorog*. 2021. № 12. S. 31–42. (In Russian)
2. Vakulenko S. P., Kolin A. V., Egorov P. A. i dr. *O celesoobraznosti gruzovy'x perezovok na glavnom zheleznodorozhnom xodu Sankt-Peterburg — Moskva // Zheleznodorozhny'j transport*. 2022. № 3. S. 16–23. (In Russian)
3. *Gruzam obnovyat puti // Gudok*. 2021. 12 maya [E'lektronny'j resurs]. URL: <https://gudok.ru/content/analitika/infrastructure/1563671/?sphrase=0>. (In Russian)
4. *Special'ny'e texnicheskie usloviya. Proektirovanie, stroitel'stvo i e'kspluatsiya vy'sokoskorostnoj zheleznodorozhnoj magistrali Moskva – Sankt-Peterburg (VSZhM-1). Izmenenie 1*. SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2023 (utverzhdeny` O. V. Toni ot 15.04.2024 № 647). (In Russian)
5. Kiselev I. P., Bushuev N. S., Shulman D. O. *High-speed railways in the BRICS countries // BRICS Transport*. 2023. T. 2. № 4. <https://10.46684/2023.1.2>
6. *Texnicheskoe zadanie na opy'jno-konstruktorskie raboty`. Vy'sokoskorostnoj e'lektropoezd dlya VSM. Utv. zamestitelem general'nogo direktora OAO “RZhD”*. 2020. № 1821. S. 393. (In Russian)
7. *Klyuchevy'e voprosy` nauchnogo soprovozhdeniya transportnoj sistemy`: monografiya / pod red. V. I. Kolesnikova i A. S. Misharina*. M.: Prometej, 2022. S. 20–27. (In Russian)
8. *Skorost` trebuet sredstv // Gudok*. Vy`p. № 123 ot 14.07.2023. (In Russian)
9. *VSM na Ligovke // Gudok*. Vy`p. № 14 ot 26.04.2024. (In Russian)
10. *Perechen` poruchenij po itogam soveshhaniya po voprosu stroitel'stva vy'sokoskorostnoj zheleznodorozhnoj magistrali Moskva — Sankt-Peterburg (utv. Prezidentom RF 05.04.2024 № Pr-663)*. (In Russian)
11. *Vladimir Putin postavil zadachi po VSM // Gudok*. 2024. 8 aprelya [E'lektronny'j resurs]. URL: <https://gudok.ru/content/obshchestvo/vlast/1665653/?sphrase=0> (In Russian)
12. *VSM nabiraet skorost`. Glavny'e fakty` o projekte, kotory'j izmenit stranu // Gudok*. 2024. 11 aprelya [E'lektronny'j resurs]. URL: <https://gudok.ru/content/analitika/infrastructure/1666322/> (In Russian)

13. E`ksperty` ocenili potok gruzov mezhdu Moskvoy i Peterburgom posle vvoda VSM // AO “Rosbizneskonsalting”. 2024. 5 aprelya [E`lektronny`j resurs]. URL: <https://www.rbc.ru/business/05/04/2024/660f9ba09a79474d4f7819f4> (In Russian)
14. Vakulenko S. P., Kolin A. R., Romenskij D. Yu. i dr. Sankt-Peterburgskij transportny`j uzel: perspektivy` razvitiya. Chast` I // Organizaciya prigorodny`x i prigorodnogorodskix passazhirkix perevozok zheleznodorozhny`m transportom. Monografiya / pod red. Vakulenko S. P. MIIT. VINITI RAN. 2020. 192 s. (In Russian)
15. Vakulenko S. P., Kolin A. R., Romenskij D. Yu. i dr. Moskovskij transportny`j uzel: perspektivy` razvitiya. Chast` III // Struktura gruzopotokov razlichny`x vidov transporta i osnovny`e scenarii razvitiya gruzovoj raboty`. Monografiya / pod red. Vakulenko S. P. MIIT. VINITI RAN, 2020. 208 s. (In Russian)
16. Borodin A. F. Vzaimodejstvie i razvitie zheleznodorozhny`x uzlov centra i severo-zapada seti OAO “RZhD”. 2023. № 8–1. S. 44–61. (In Russian)
17. Bushuev N. S., Shul`man D. O. Struktura gruzopotoka kontejnery`x perevozok na zheleznodorozhnom transporte: sushhestvuyushhee sostoyanie i rekomendacii // Sbornik “Infrastruktura transporta” pod red. V. S. Shvarczfel`da. №1 (3). SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2022. S. 5–15. (In Russian)
18. Bushuev N. S., Shul`man D. O., Rochev N. A. Sostoyanie i rost potoka kontejnery`x gruzov na zheleznodorozhnom transporte Rossii (v period pandemii COVID-19) // Transport BRIKS. 2023. T. 2. Vy`p. 1. St. 2. URL: <https://10.46684/2023.1.2> (In Russian)
19. Transportnaya strategiya RF na period do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda (utverzhdena rasporyazheniem Pravitel`stva RF ot 27 noyabrya 2021 g. № 3363-r). 285 s. (In Russian)
20. Bushuev N. S., Shul`man D. O., Sagajdak K. M. Analiz dinamiki passazhiropotoka poezdov “Sapsan” i aviacionnogo transporta na linii “Moskva — Sankt-Peterburg” do 2025 goda / Byulleten` rezul`tatov nauchny`x issledovaniy. SPb.: PGUPS, 2019. Vy`p. 1. S. 5–14. URL: <http://brni.info/archive/2019/1.html> (In Russian)
21. Bushuev N. S., Shul`man D. O., Rochev N. A. Rezul`taty` osvoeniya passazhirkix perevozok na napravlenii Moskva — Sankt-Peterburg v krizisny`e 2020–2021 gody` // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshheniya. SPb.: PGUPS, 2023. T. 20. Vy`p. 1. S. 16–27. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-16-27. (In Russian)
22. Bushuev N. S., Minenko D. O. Ocenka vostrebovannosti vy`sokoskorostnoj zheleznodorozhnoj magistrali na poligone Sankt-Peterburg — Moskva // Izvestiya PGUPS. Vy`p. 2. SPb.: PGUPS, 2013. S. 5–11. (In Russian)
23. Bushuev N. S., Shul`man D. O. O perspektivax razvitiya vy`sokoskorostny`x zheleznodorozhny`x magistralej v Rossii // Byulleten` rezul`tatov nauchny`x issledovaniy. 2017. № 3. S. 7–14. (In Russian)
24. Alpy`sova V. A., Bushuev N. S., Minenko D. O. Modelirovanie i prognozirovanie passazhiropotoka vy`sokoskorostnoj magistrali na primere poezdov “Sapsan” napravleniya Sankt-Peterburg — Moskva // Transport Urala. 2014. № 2 (41). S. 50–53. (In Russian)
25. Bushuev N. S., Shul`man D. O., Sagajdak K. M. Modeling of container freight and passenger traffic // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, Interagromash, 2019.
26. Vy`sokoskorostnoj zheleznodorozhny`j transport. Obshhij kurs / I. P. Kiselev, L. S. Blazhko, M. Ya. Bry`n` i dr. Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov zheleznodorozhnogo transporta v 2 tomax (2-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe). M.: 2020. T. 1. (In Russian)

Received: 25.03.2024

Accepted: 25.05.2024

Author’s information:

Nikolaj S. BUSHUEV — PhD in Engineering, Associate Professor; 2009bushuev@rambler.ru
Darina O. ShUL`MAN — PhD in Engineering, Associate Professor; shulman@pgups.ru

УДК 625.041.2

Собственные напряжения в рельсах, возникающие вследствие эксплуатации железнодорожного пути с отступлениями по его содержанию

В. А. Черняева, Е. И. Шехтман, Е. В. Черняев, А. И. Иванов

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

Для цитирования: Черняева В. А., Шехтман Е. И., Черняев Е. В., Иванов А. И. Собственные напряжения в рельсах, возникающие вследствие эксплуатации железнодорожного пути с отступлениями по его содержанию // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 440–448. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-440-448

Аннотация

Цель: в процессе эксплуатации железнодорожного пути в его элементах происходит накопление остаточных деформаций. В зоне остаточной деформации пути, в частности просадки, пучинной впадины и т. д. возникают напряжения, при которых материал рельса может приобрести необратимые деформации, а рельс — оказаться поврежденным. При переходе рельса от прямолинейного равновесного состояния к криволинейному (при просадках, перекосах, пучинах) в нем возникают собственные напряжения, которые изменяют работу пути под подвижной нагрузкой. Предлагается в практических расчетах железнодорожного пути рассматривать критическую силу, при которой происходит потеря устойчивости рельса (переход к криволинейному равновесному состоянию) в вертикальной плоскости, в качестве дополнительного критерия допустимой нагрузки. В статье рассмотрены собственные напряжения в рельсах, возникающие вследствие эксплуатации железнодорожного пути с отступлениями по его содержанию. **Методы:** статистический анализ накопления остаточных деформаций участка железнодорожного пути, обзор существующих методик оценки воздействия подвижного состава на путь, имитационное моделирование напряженно-деформированного состояния рельса. **Результаты:** проведены анализ накопления остаточных деформаций участка железнодорожного пути, обзор существующих методик оценки воздействия подвижного состава на путь, моделирование напряженно-деформированного состояния рельса под нагрузкой в двух состояниях (прямолинейная балка, криволинейная балка). **Практическая значимость:** результаты могут быть применены при решении задачи о взаимодействии подвижного состава и железнодорожного пути.

Ключевые слова: железнодорожный путь, верхнее строение пути, рельс, расчет железнодорожного пути, собственные напряжения, просадки железнодорожного пути.

Введение

Подходы к системе технического обслуживания железнодорожного пути в межремонтном цикле, величины допускаемых отклонений и отступлений от нормативов геометрических параметров рельсовой колеи существенно влияют на напряженно-деформированное состояние всей конструкции

и отдельных ее элементов и, как следствие, являются важным фактором управления долговечностью элементов верхнего и нижнего строения пути.

В процессе эксплуатации железнодорожного пути в его элементах происходит накопление остаточных деформаций,

интенсивность которого зависит от свойств материалов отдельного элемента (масса, жесткость, демпфирующая способность), взаимного расположения элементов в конструкции (плавность изменения механических свойств), среднеисполненной массы обращающегося подвижного состава, среднеисполненной скорости, степени соответствия геометрии рельсовой колеи нормативам. Эксплуатация железнодорожного пути в условиях наличия остаточных деформаций (в статье рассматриваются отклонения рельсовой нити по уровню в вертикальной плоскости, просадки, перекосы) влечет за собой появление собственных напряжений в рельсах.

Дополнение существующих в настоящее время методик расчета железнодорожного пути [1–10] в части учета влияния собственных напряжений в рельсах, возникающих вследствие эксплуатации пути в условиях наличия отклонения рельсовой нити по уровню в вертикальной плоскости, сроков их устранения, на деформируемость и долговечность как отдельных элементов, так и конструкции железнодорожного пути в целом, в том числе в различных эксплуатационных условиях, является актуальной задачей.

Учет остаточной деформации пути при решении задачи взаимодействия экипажа и пути

В конструкции железнодорожного пути в процессе эксплуатации, кроме упругих деформаций, происходит накопление остаточных деформаций (просадки, перекосы, отклонения по уровню). Как следствие, подрельсовое основание становится все более неравноупругим.

Актуальный алгоритм расчетов железнодорожного пути на прочность учитыва-

ет отклонение рельсовой нити по уровню в вертикальной плоскости, только как фактор возникновения дополнительной динамической составляющей сил, возникающих при взаимодействии колеса и рельса.

В своих исследованиях А. В. Гречаник [11] предлагает учитывать зоны люфтов, которые образуются вследствие отклонения рельса от прямолинейного положения из-за накопления остаточных деформаций в балластном слое и (или) земляном полотне (просадки, перекосы, пучинные впадины). Величина упругой осадки рельса складывается из величины люфта и упругой осадки подрельсового основания, что в свою очередь влияет на величину упругого отпора и жесткость подрельсового основания. На рис. 1 приведен фрагмент ленты нагрузочного диагностического комплекса СМ-460, иллюстрирующий изменение величин упругих осадок рельсов, шпал и промежуточных креплений. Можно предположить, что неравномерность упругих осадок связана в том числе с наличием люфтов и особенностью упругой работы промежуточных креплений (для случаев, когда в узле происходит размыкание упругой системы и сопротивляемость крепления определяется только упругими свойствами прокладок).

Собственные напряжения в пути

В развитие вопроса о необходимости учета остаточной деформации пути, отступлений по геометрии рельсовой колеи в профиле, в настоящей статье рассмотрим собственные напряжения в пути, не находящиеся под воздействием какой-либо нагрузки, возникающие вследствие эксплуатации железнодорожного пути с учетом допусков и отступлений по его содержанию.

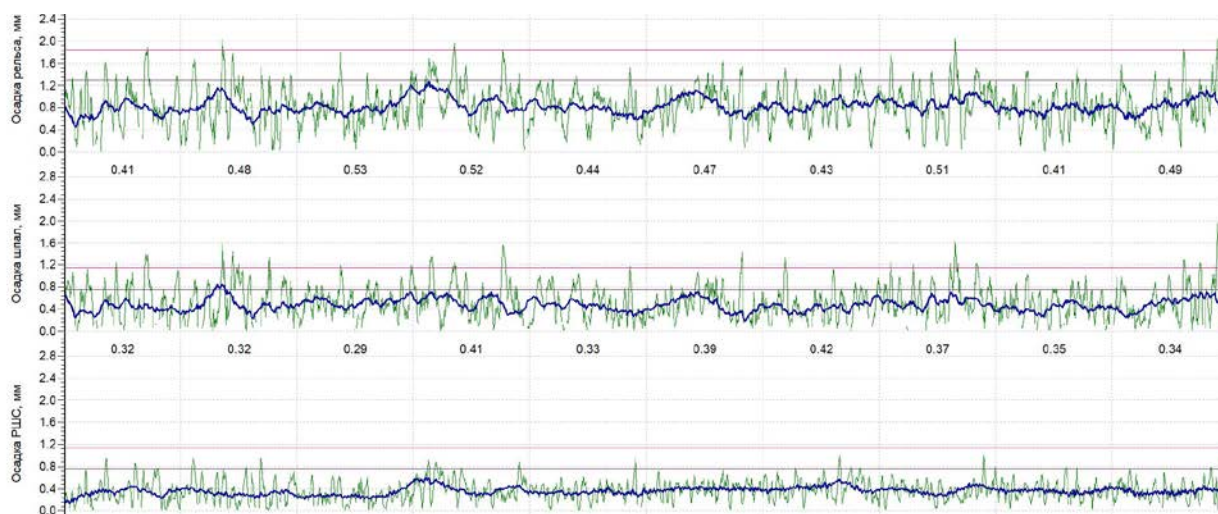


Рис. 1. Фрагмент ленты нагрузочного диагностического комплекса СМ-460

Существующий подход к текущему содержанию железнодорожного пути предусматривает, что обнаруженные просадки или перекосы первой степени устраняются при плановых видах ремонта, второй степени — в плановом порядке в рамках текущего содержания, третьей — в течение трех суток и четвертой — незамедлительно. В зависимости от допускаемой скорости движения поездов величины отклонений по уровню, перекосы и просадки второй степеней варьируется от 12 (для скорости 250 км/ч) до 25 мм (для скорости 60 км/ч).

В зоне остаточной деформации пути, в частности просадки, пучинной впадины и т. д. возникают напряжения, при которых материал рельса может приобрести необратимые деформации, а рельс — оказаться поврежденным.

Рассмотрим неровность глубиной $f = 0,02$ м и $f = 0,01$ м и длиной $l = 4$ м. Кривизна рельса посередине неровности соответствует кривизне дуги круговой кривой, имеющей хорду и стрелу изгиба $f = 0,02$ м и $f = 0,01$ м.

Напряжения изгиба (σ) в рельсах типа Р65:

$$\text{при } f = 0,02 \text{ м: } \sigma = 1707 \text{ кг/см}^2$$

$$\text{при } f = 0,01 \text{ м: } \sigma = 854 \text{ кг/см}^2$$

Необходимо учитывать, что если изогнутый книзу в вертикальной плоскости рельс, лежащий в пути, выпрямляется подъемкой в этом месте шпал на балласт с соответствующим уплотнением последнего, то выпрямленный рельс, стремясь вернуться в свое первоначально-изогнутое положение, давит на шпалы и балласт, дополнительно сжимая последний. Этого может оказаться достаточно, чтобы в совокупности с давлением от поездной нагрузки выдавливать балласт из-под шпал и дать возможность рельсу постепенно восстанавливать свою искривленную форму.

Авторами статьи проведен анализ накопления остаточных деформаций (просадки, перекосы) участка железнодорожного пути за 20 месяцев. Результаты, приведенные в табл. 1, показывают, что просадки и другие местные нарушения геометрии пути неоднократно и достаточно быстро появляются после их устранения в тех же местах.

При повышении погонной массы рельсов величина собственных напряжений от вертикальных неровностей также увеличивается. Первоначально при появлении вертикальной неровности вследствие осадки балластного слоя или земляного полотна рельсы находятся в напряженном состоянии в результате изгиба, то есть стремятся распрямиться. С течением времени происходит релаксация этих постоянно действующих напряжений, тем меньшая и тем медленнее, чем больше содержания углерода в рельсовой стали [13]. Указанную информацию необходимо учитывать при сохраняющейся тенденции повышения твердости рельсовой стали.

Следует отметить, что учет собственных напряжений в рельсах, возникающих при эксплуатации пути с отступлениями, необходим при нормировании допустимой деформации равномерного морозного пучения, определении сроков устранения отступлений второй и третьей степеней, в особенности при применении бесстыковой конструкции железнодорожного пути, в рельсовых плетях которой возникают значительные продольные температурные силы.

Моделирование напряженно-деформированного состояния рельса

При эксплуатации железнодорожного пути в условиях наличия отступлений рельсовой колеи по уровню вначале рельсы находятся в напряженном состоянии, то есть стремятся распрямиться, далее происходит релаксация напряжений.

С точки зрения теории устойчивости стержней переход рельса из устойчивого прямолинейного состояния в устойчивое криволинейное можно назвать потерей устойчивости. Величину нагрузки, при ко-

торой происходит потеря устойчивости, предлагается называть критической.

Потеря устойчивости рельса в случае наличия просадки, перекоса, пучины (остаточные деформации балластного слоя, земляного полотна) повлечет за собой перераспределение усилий во всей конструкции железнодорожного пути и изменение напряжений от подвижной нагрузки в самих рельсах, в узлах промежуточных скреплений, балластной призме и т. д. Под воздействием нагрузки от подвижного состава в сечениях рельсовой нити возникают три внутренних силовых фактора: продольная сила N , поперечная сила Q и изгибающий момент M .

Моделирование просадки рельса глубиной 16 мм на длине 6 м показывает, что максимальные напряжения, возникающие в криволинейном рельсе, на 37 % больше, чем при воздействии нагрузки на прямолинейный рельс (рис. 2).

При потере устойчивости, то есть изменении геометрического очертания рельсовой нити, в том числе изменяются характеристики сопротивляемости рельсовой стали под воздействием циклических контактных нагрузок, что снижает долговечность рельса в процессе его эксплуатации.

Поэтому с точки зрения практических расчетов критическая сила должна рассматриваться как разрушающая нагрузка. Сохранение исходного (расчетного прямолинейного) равновесного состояния рельса является важной задачей при определении подходов к текущему содержанию железнодорожного пути, сроков устранения выявленных отступлений в геометрии рельсовой колеи, в расчетах железнодорожного пути на прочность и устойчивость при установлении допустимых действующих напряжений.

ТАБЛИЦА 1. Количество выявленных отступлений от нормативов по геометрии рельсовой колеи (перекосы, просадки)

Расстояние, м	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
220–230					1	1							1							
230–240					1	1														
240–250																	1		1	
250–260			1	2	2	1	1	1		1		1	2	1	1	1	1	2		1
260–270	1	1			1	2	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1		2	1
270–280				1																
280–290	1		1	2		1	1	2	1				2	1						
290–300						1														
300–310					1					1			2							
310–320						1								2	1		1			
320–330				1									1		1					1
330–340																				
340–350															1					
350–360																				
360–370															1					

Для определения критической нагрузки, при которой произойдет потеря устойчивости рельса в вертикальной плоскости, можно применить известные теоретические методы: энергетический, интегральных уравнений, дифференциальных уравнений.

Основной задачей теории устойчивости применительно к расчету вертикальных неровностей железнодорожного пути может являться определение критического значения внешних сил и ограничение их величин таким образом, чтобы исключить возможность потери прямолинейной устойчивости рельса в различных условиях эксплуатации.

Как указывалось выше, потеря устойчивости рельса повлечет за собой перераспределение усилий во всей конструкции железнодорожного пути и может увеличить

напряжение в узлах промежуточных скреплений, балластной призме и т. д. Анализ данных видеоаналитики и лент вагонов-путеизмерителей показывает, что неудовлетворительное состояние геометрии рельсовой колеи в вертикальной плоскости интенсифицирует образование дефектов рельсов. На рис. 3 изображен фрагмент ленты вагона-путеизмерителя, явно иллюстрирующий наличие дефектов рельсов на участках с отступлениями от норм содержания рельсовой колеи:

— просадка рельсовой нити (правая), три отступления (2-я степень), 13–16 мм на длине 3–6 м;

— перекося, одно отступление (3-я степень), 20 мм на длине 20 м, три отступления (2 степени) 11–12 мм на длине 9–18 м.

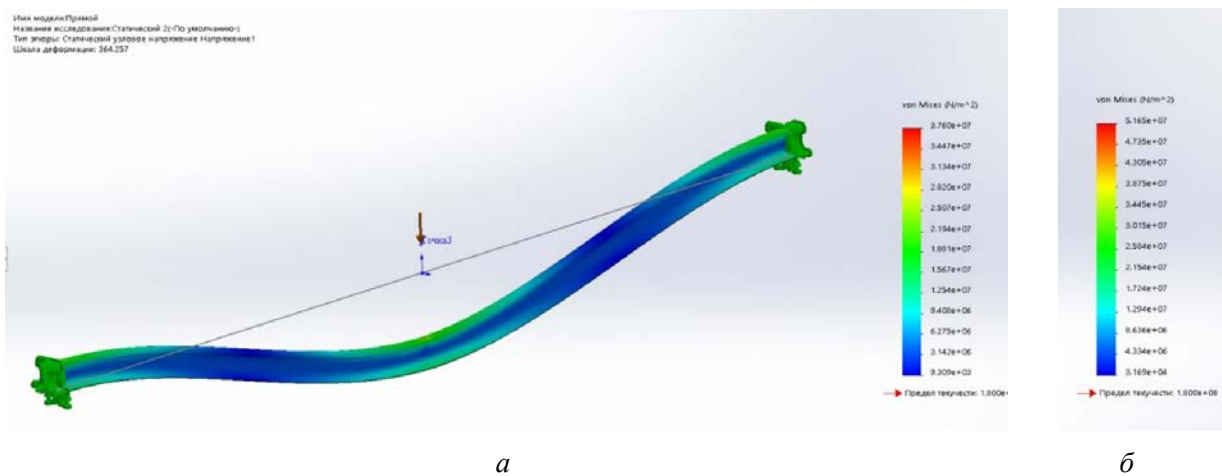


Рис. 2. Напряжения в рельсе при нагружении: отсутствие отклонений от уровня (а), отклонение от уровня (б) вследствие образования просадки глубиной 16 мм на длине 6 м

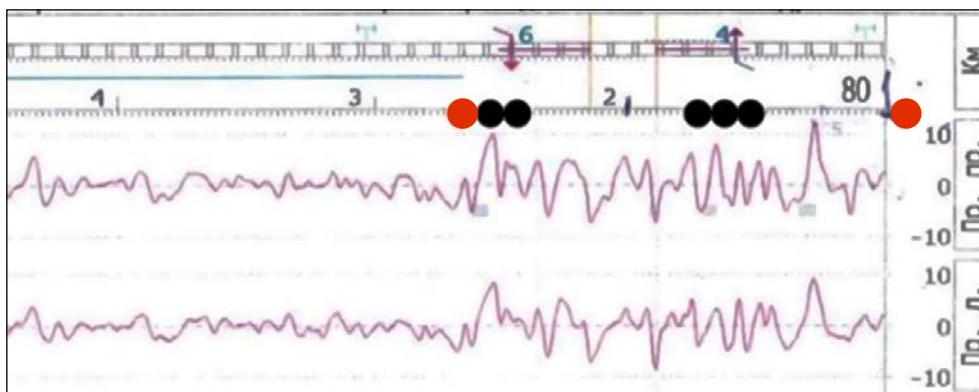


Рис. 3. Дефекты и деформации железнодорожного пути на участках с отступлениями от норм содержания по геометрии рельсовой колеи:
 ● — превышение конструктивной величины стыковых зазоров;
 ● — поверхностный дефект рельса

Заключение

На взаимодействие пути и подвижного состава оказывают немалое влияние подходы к содержанию железнодорожного пути. В зоне остаточной деформации пути, в частности просадки, пучинной впадины и т. д. возникают собственные напряжения, при которых материал рельса может приобрести необратимые деформации, а рельс — оказаться поврежденным.

Собственные напряжения существенно изменяют работу железнодорожного пути под циклической нагрузкой. Одна и та же нагрузка от воздействия подвижного состава в таких случаях вызывает различные деформации пути в зависимости от предварительного его напряжения.

При эксплуатации железнодорожного пути в условиях наличия отступлений рельсовой колеи по уровню вначале рельсы

находятся в напряженном состоянии, то есть стремятся распрявиться, далее происходит релаксация напряжений. С точки зрения теории устойчивости стержней данный переход можно назвать потерей устойчивости. Величину нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости, предлагается называть критической.

Основной задачей теории устойчивости применительно к расчету вертикальных неровностей железнодорожного пути может являться определение критического значения внешних сил и ограничение их величин таким образом, чтобы исключить возможность потери устойчивости рельсовой нити в различных эксплуатационных режимах.

Библиографический список

1. Правила производства расчетов железнодорожного пути на прочность // Литограф, издательство МПС, 1954.
2. Вериго М. Ф. Динамические исследования пути и корректировка правил расчетов железнодорожного пути на прочность // Труды ВНИИЖТ (выпуск № 466). М.: Транспорт, 1972. 192 с.
3. Гасанов А. И. О приведенной массе пути // Вестник ЦНИИ МПС (выпуск № 6). 1968. С. 52–53.
4. Медель В. Б. Взаимодействие электровоза и пути // М.: Трансжелдориздат, 1956. 335 с.
5. Попов А. А. К вопросу о динамическом воздействии колеса на рельс при прохождении неровности пути // Труды ЦНИИ МПС (выпуск № 33). 1949.
6. Шмидт К. М. Влияние массы пути на деформацию его при ударе колеса с подрессоренным грузом: сб. НИИ пути и путевого хозяйства. М.: Трансжелдориздат, 1941. С. 87–109.
7. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности, утв. МПС РФ № ЦПТ–52/14 от 16.06.2000. Москва, 2000. 40 с.
8. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности, утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2017 № 2706р.
9. Данилов В. Н. Железнодорожный путь и его взаимодействие с подвижным составом // М.: Трансжелдориздат, 1961. 70 с.
10. Данилов В. Н. Расчет рельсовой нити в зоне стыка // Труды ВНИИЖТ (выпуск 70). 1973. С. 43–59.
11. Гречаник А. В. Оценка влияния жесткости пути и рессорного подвешивания тележек на развитие остаточных деформаций пути: автореф. дисс. ... канд. техн. наук, 2011.
12. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути, утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 № 2288р.
13. Шахуняц Г. М. Железнодорожный путь. М.: Трансжелдориздат, 1961. 615 с.

Дата поступления: 05.04.2024

Решение о публикации: 13.05.2024

Контактная информация:

ЧЕРНЯЕВА Виктория Андреевна — канд. техн. наук, доцент; chernyaeva@pgups.ru

ШЕХТМАН Евгений Иосифович — докт. воен. наук, профессор; director@sptgt.ru

ЧЕРНЯЕВ Евгений Владимирович — канд. техн. наук, доцент; chernyaev@pgups.ru

ИВАНОВ Андрей Игоревич — студент; andrey.ivanov.pgups@mail.ru

Self-stresses in the rails arising as a result of the operation of the railway track with deviations in its content

V. A. Chernyaeva, E. I. Shehtman, E. V. Cherniaev, A. I. Ivanov

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

For citation: Chernyaeva V. A., Shehtman E. I., Cherniaev E. V., Ivanov A. I. Self-stresses in the rails arising as a result of the operation of the railway track with deviations in its content // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 440–448 (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-440-448

Abstract

Purpose: approaches to the maintenance of the railway track play a significant role in the interaction between the track and the rolling stock. The analysis [1–10] shows that existing methods for assessing the impact of rolling stock on the track have not completely resolved the issues of taking into account the residual deformation of the track, which does not allow us to have the most complete understanding of the ongoing interactions and processes between the railway track and the rolling stock in real operating conditions. In developing the issue of the need to take into account the residual deformation of the track, deviations in the geometry of the rail track in the profile, the article considers the “intrinsic” stresses in the track that are not under the influence of any load, arising as a result of the operation of a railway track with deviations in its contents. **Methods:** statistical analysis of the accumulation of residual deformations of a section of the railway track, review of existing methods for assessing the impact of rolling stock on the track, simulation modeling of the stress-strain state of the rail. **Results:** an analysis of the accumulation of residual deformations of a section of the railway track, a review of existing methods for assessing the impact of rolling stock on the track, modeling of the stress-strain state of a rail under load in two states (straight beam, curved beam) were carried out. **Practical significance:** the results can be applied when solving the problem of interaction between rolling stock and the railway track.

Keywords: railway track, superstructure of the track, rail, calculation of the railway track, own stresses, subsidence of the railway track.

References

1. Pravila proizvodstva raschetov zheleznodorozhnogo puti na prochnost' // Litograf, izdatel'stvo MPS, 1954. (In Russian)
2. Verigo M. F. Dinamicheskie issledovaniya puti i korrktirovka pravil raschetov zheleznodorozhnogo puti na prochnost' // Trudy VNIIZHT (vypusk № 466). M.: Transport, 1972. 192 s. (In Russian)
3. Gasanov A. I. O privedennoj masse puti // Vestnik CNII MPS (vypusk № 6). 1968. S. 52–53. (In Russian)
4. Medel' V. B. Vzaimodejstvie elektrovoza i puti // M.: Transzheldorizdat, 1956. 335 s. (In Russian)
5. Popov A. A. K voprosu o dinamicheskom vozdejstvii koleasa na rel's pri prohozhdenii nerovnosti puti // Trudy CNII MPS (vypusk № 33). 1949. (In Russian)
6. Shmidt K. M. Vliyanie massy puti na deformatsiyu ego pri udare koleasa s podressorennym gruzom: sb. NII puti i putevogo hozyajstva. M.: Transzheldorizdat, 1941. S. 87–109. (In Russian)
7. Metodika ocenki vozdejstviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti, utv. MPS RF № CPT–52/14 ot 16.06.2000. Moskva, 2000. 40 s. (In Russian)

8. Metodika ocenki vozdejstviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti, utv. rasporyazheniem OAO "RZHD" ot 22.12.2017 № 2706r. (In Russian)

9. Danilov V. N. Zheleznodorozhnyj put' i ego vzaimodejstvie s podvizhnym sostavom // M.: Transzheldorizdat, 1961. 70 s. (In Russian)

10. Danilov V. N. Raschet rel'sovoj niti v zone styka // Trudy VNIIZHT (vypusk 70). 1973. S. 43–59. (In Russian)

11. Grechanik A.V. Ocenka vliyaniya zhestkosti puti i resornogo podveshivaniya telezhek na razvitie ostatochnyh deformacij puti: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk, 2011. (In Russian)

12. Instrukciya po tekushchemu sodержaniyu zheleznodorozhnogo puti, utverzhennaya rasporyazheniem OAO "RZHD" ot 14.11.2016 № 2288r. (In Russian)

13. Shahunyanc G. M. Zheleznodorozhnyj put'. M.: Transzheldorizdat, 1961. 615 s. (In Russian)

Received: 05.04.2024

Accepted: 13.05.2024

Author's information:

Victoria A. CHERNYAEVA — PhD in Engineering, Associate Professor;

chernyaeva@pgups.ru

Evgenii I. SHEHTMAN — Dr. Sci. of Military, Professor; director@sptgt.ru

Evgenii V. CHERNYAEV — PhD in Engineering, Associate Professor;

chernyaev@pgups.ru

Andrei I. IVANOV — student;

andrey.ivanov.pgups@mail.ru

УДК 624.021

Влияние параметров мостовых сооружений высокоскоростных железнодорожных магистралей на динамические свойства системы «мост — бесстыковой путь»

В. Н. Смирнов, Е. Е. Луковников

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

Для цитирования: Смирнов В. Н., Луковников Е. Е. Влияние параметров мостовых сооружений высокоскоростных железнодорожных магистралей на динамические свойства системы «мост-бесстыковой путь» // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 449–456. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-449-456

Аннотация

Цель: определить влияние на частоты и формы свободных колебаний многопролетных мостовых сооружений высокоскоростных железнодорожных магистралей таких факторов, как продольный модуль упругости связи рельса с подрельсовым основанием, жесткость опор в направлении вдоль моста и массивность промежуточных опор. **Методы:** в статье рассматривается четырехпролетный мост с бесстыковым путем, моделируемым в виде упругого бруса на упругом основании, для которого определены формы колебаний и соответствующие им собственные частоты при различных параметрах системы «мост — бесстыковой путь». **Результаты:** приведенные в статье данные позволяют учитывать при проектировании мостовых сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралах наличие бесстыкового пути на мосту и его участие в работе мостового сооружения, чем достигается возможность более обоснованно принимать конструктивные решения элементов объекта. **Практическая значимость:** поскольку динамическая реакция сооружения целиком определяется его динамическими свойствами, то чрезвычайно важным становится выявление спектра собственных частот и форм колебаний мостового сооружения при учете работы бесстыкового пути на мосту, который объединяет сооружение в единую систему, обеспечивая совместность работы элементов системы «мост — бесстыковой путь» при продольных поездных и температурных воздействиях, что дает возможность отразить фактическую работу сооружения и в конечном счете позволяет возводить более экономичные опоры мостового сооружения.

Ключевые слова: собственные частоты и формы свободных колебаний, бесстыковой путь, мостовое сооружение, высокоскоростные железнодорожные магистрали (ВСМ).

Введение

Исследование динамических свойств мостовых сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралах необходимо при изучении процессов взаимодействия высокоскоростной подвижной нагрузки и мостового сооружения в системе «мост — поезд», а также при анализе динамической реакции мостового сооружения на различ-

ного рода возмущения типа сейсмических или воздействий временной подвижной нагрузки в режиме торможения или троганья с места [1]. Динамический ответ сооружения целиком определяется свойствами системы, и чем достовернее они определены, тем большая гарантия в получении достоверной информации о поведении сооружения

в реальных условиях [2]. Применительно к мостовым сооружениям на ВСМ особенно важно точное знание динамических свойств системы «мост — бесстыковой путь» (МБП) для виадуков, мостов с высокими опорами, эстакад. Широкому внедрению на ВСМ промежуточных опор немассивной экономичной конструкции в определенной мере может препятствовать недостаточная изученность их динамической работы, особенно при продольных (вдоль моста) воздействиях [3]. Сложность решения задачи динамического расчета моста заключается в том, что железнодорожный мост на ВСМ представляет собой систему, динамические свойства которой определяются не только инерционными, жесткостными и диссипативными параметрами опор и пролетных строений, но и работой рельсового бесстыкового пути на мосту [4–5]. Необходим учет указанной особенности сооружения как системы МБП и анализ ее влияния на динамические свойства мостового объекта.

Расчетная схема и математическая модель для анализа свободных колебаний многопролетного мостового сооружения в виде эстакады

Собственные частоты и соответствующие им формы свободных колебаний многопролетного мостового сооружения определяются при учете ряда допущений:

1. Мостовое многопролетное сооружение (мост, виадук, эстакада) моделируется в виде системы с конечным числом степеней свободы [5], равным n .

2. Основания мостовых опор принимаются упругими.

3. Бесстыковой рельсовый путь на мосту с ездой на балласте представляется в виде упругого бруса, уложенного на упругое в на-

правлении вдоль оси пути подрельсовое основание и упруго закрепленного по концам моста (жесткость упругого закрепления характеризуется величиной R). Это допущение возможно для балластного мостового полотна на бесстыковом пути [6], поскольку, как показывают исследования, при укатанном щебеночном балласте с клеммными промежуточными скреплениями сопротивление основания продольному сдвигу носит линейный характер при значительных относительных перемещениях рельса и подрельсового основания (от 5 до 25 мм). Однако надо иметь в виду, что в общем случае функция погонного сопротивления основания сдвигу имеет нелинейный вид диаграммы Прандтля [7], определяясь конкретными условиями, в частности типом мостового полотна и его конструктивным решением.

Расчетная схема многопролетного моста при принятых выше допущениях имеет вид, показанный на рис. 1. Уравнения колебаний такой системы можно получить, составив уравнения Лагранжа второго рода [8], которые имеют вид:

$$d/dt (dk/dq_j^*) + dn/dq_j = 0 \quad (1)$$

где q_j — перемещение точки сооружения по направлению j -й обобщенной координаты;

n — потенциальная энергия деформации мостового сооружения, которая включает потенциальную энергию деформации рельсового пути, упругих связей между рельсами и балками пролетных строений, а также балок пролетных строений и мостовых опор;

k — кинетическая энергия колебаний моста, состоящая из кинетической энергии балок пролетных строений и мостовых опор.

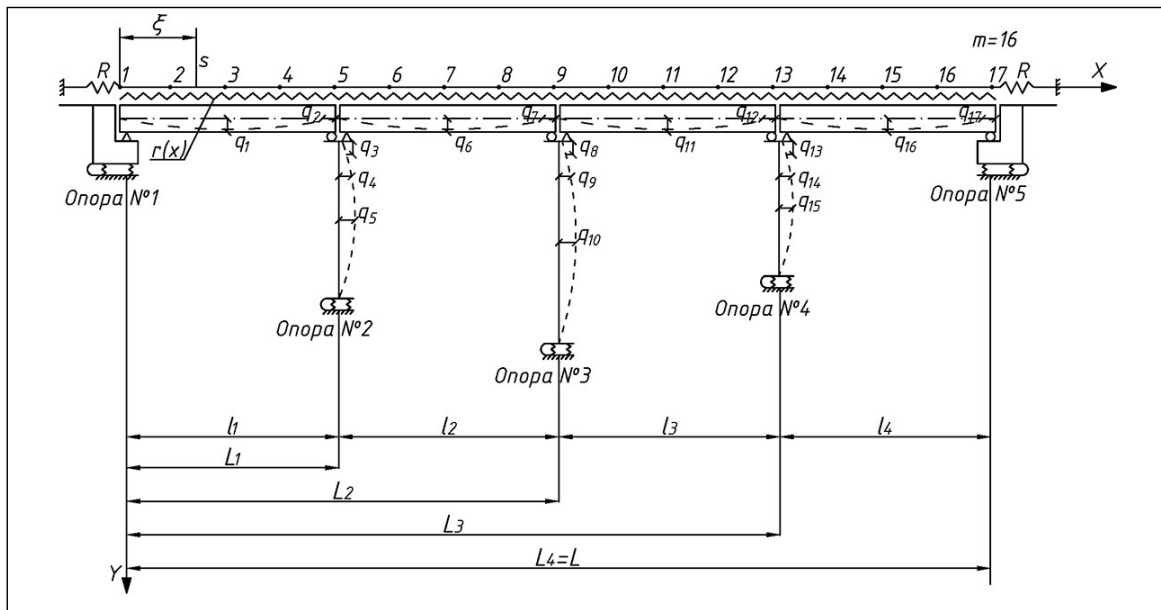


Рис. 1. Расчетная схема моста

Чтобы определить потенциальную и кинетическую энергии, необходимо выявить зависимости смещения сечений рельсового пути $u(x)$ от смещений сооружения по направлениям обобщенных координат q (рис. 1). Выражения для перемещения точек бесстыкового пути в системе с n степенями свободы можно представить в виде:

$$u = \Phi q, \tag{2}$$

где Φ — матрица $m+1$ -го порядка коэффициентов влияния смещений верха пролетного строения на смещения точек рельсового пути на мосту, где m — количество участков разбиения рельсовой плети на всей длине моста (на рис. 1 $m = 15$);

q — вектор обобщенных координат.

Если подставить полученные выражения для потенциальной энергии деформаций и кинетической энергии колебаний в уравнения Лагранжа второго рода, получаем систе-

му обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$Tq'' + Pq = 0, \tag{3}$$

где T — матрица коэффициентов при векторе q'' ;

P — матрица коэффициентов при обобщенных координатах q .

Решение уравнений (3) выполняется общеизвестными методами [8–9]. В результате достигается возможность исследовать свободные колебания моста с учетом влияния бесстыкового рельсового пути для конкретных сооружений.

Анализ форм и частот свободных колебаний балочного моста с бесстыковым путем при езде на балласте

Анализ динамических свойств мостового сооружения выполнен на примере четырехпролетного виадука балочно-разрезной системы с высотой бетонных опор 17,85 м

и с пролетными строениями из железобетона длиной по 26,9 м при езде на балласте (рис. 1). Виадук рассматривается как система с n степенями свободы. Устои приняты жесткими. Непрерывная рельсовая плеть уложена на упругое подрельсовое основание. Связь между рельсом и подрельсовым основани-

ем характеризуется величиной продольного модуля упругости U , который представляет собой коэффициент пропорциональности между равномерно распределенной продольной нагрузкой и смещением точек рельса. По концам рельсовой плети предполагается упругое закрепление с жесткостью R .

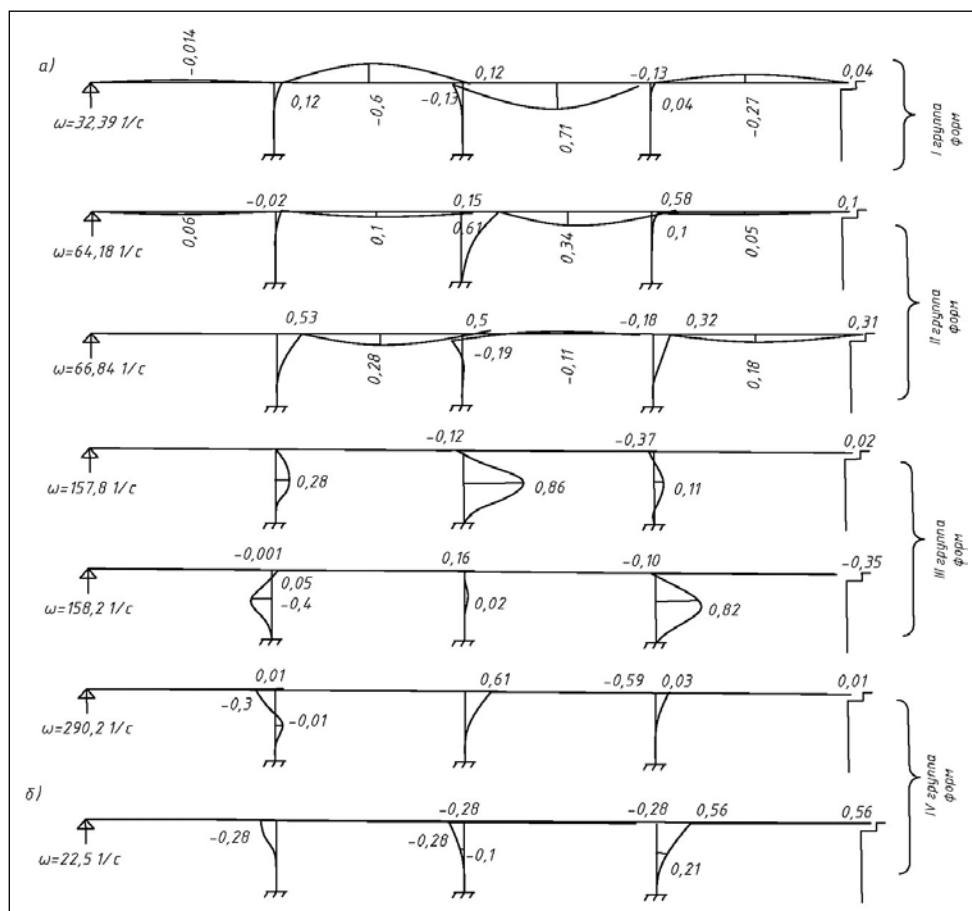


Рис. 2. Формы свободных колебаний четырехпролетного моста и соответствующие им собственные частоты

На рис. 2 показаны формы свободных колебаний виадукa и соответствующие им частоты при $U = 4500 \text{ кН/м}^2$ (рис. 2, а) и при $U = 0$ (рис. 2, б). Во втором случае рельсовый путь на мосту при продольных колебаниях сооружения не учитывается (опоры колеблются как одиночные стойки). В расчетах

для приведенного примера принято $R = 0$, то есть предполагается устройство в рельсах бесстыкового пути над устоями уравнивательных приборов или разрушение подходов (при сейсмических воздействиях). Из рис. 2 видно, что подобные формы свободных колебаний виадукa, объединенного бесстыковым

путем в единую систему, объединяются по группам, существенно различающимся величинами собственных частот. Можно также видеть, что собственные частоты, соответствующие определенным формам колебаний сооружения с бесстыковым путем, существенно отличаются по величине от собственной частоты опоры, моделируемой в виде консольного, изолированно стоящего стержня (без учета работы рельсового пути на мосту, как это предписывается действующими

нормами) — в этом случае $U = 0$ (рис. 2, б). Даже в случае разрыва рельсовой плиты по концам виадука (именно здесь обычно возникают наибольшие по величине усилия в рельсах бесстыкового пути при действии поездной или температурной нагрузки) в системе не реализуется низшая (основная) частота опоры.

Представляет интерес оценка влияния на собственные частоты виадука величины продольного модуля упругости U (рис. 3).

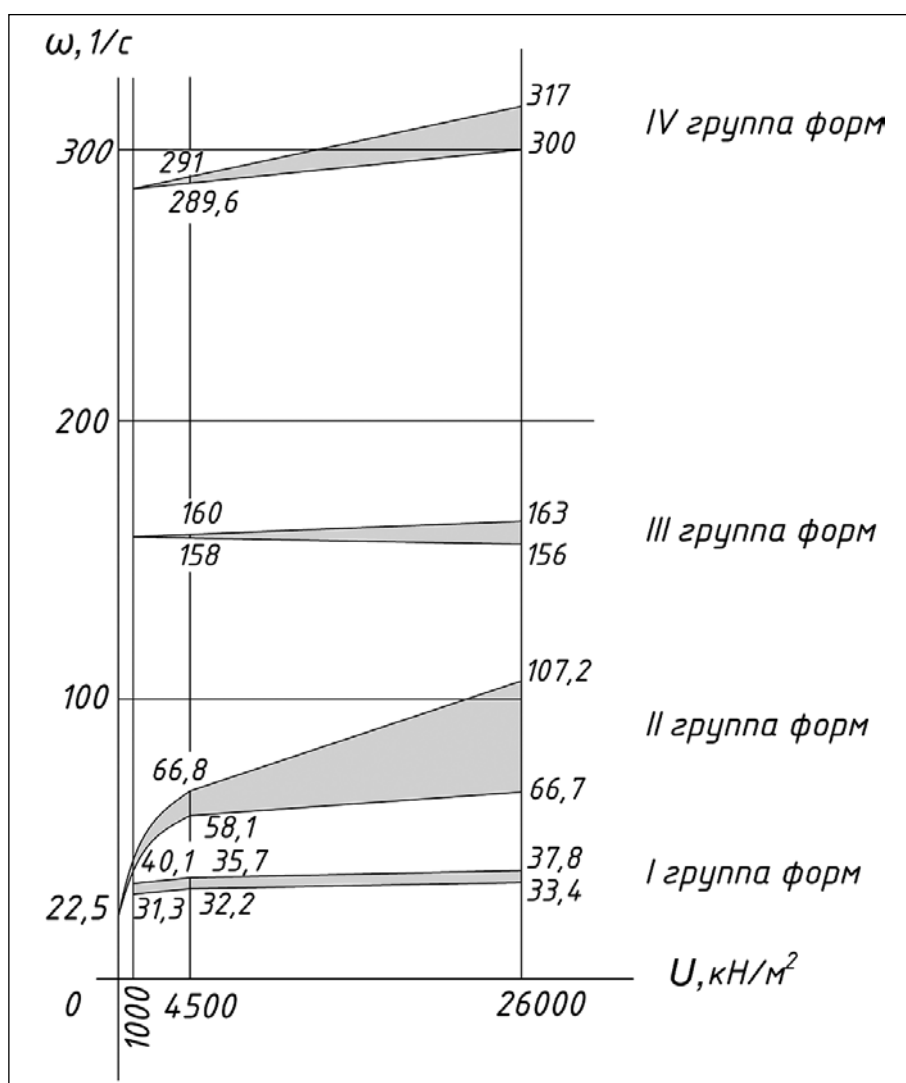


Рис. 3. Влияние продольного модуля упругости пути на собственные частоты моста

Из рис. 3 следует, что собственные частоты образуют некие «зоны сгущения», которым соответствуют группы подобных форм колебаний сооружения. Примечательно, что уже при сравнительно небольших значениях величины U величины собственных частот колебаний виадука по второй группе форм значительно выше аналогичных частот, получаемых без учета рельсового пути на виадуке. Видно, что весьма значительное увеличение величины U в 6 раз приводит к повышению собственных частот всего в 1,1–1,6 раза. Следовательно, при исследовании колебаний виадука для получения результатов первого приближения не требуется высокой точности в определении величины продольного модуля упругости подрельсового основания.

Интересно отметить, что наличие на виадуке рельсового пути не столь существенно влияет на собственные частоты свободных колебаний балок пролетных строений в вертикальном направлении: при повышении продольного модуля упругости U от нуля до $U = 26\,000$ кН/м² собственная частота пролетного строения возросла всего на 12% (см. рис. 2). Тем не менее при жестком мостовом полотне (безбалластном, например) и жестких связях между рельсом и подрельсовым основанием в динамических расчетах повышение собственных частот балок целесообразно учитывать.

При анализе свободных колебаний моста с промежуточными опорами высотой от 17 до 54 м оказалось, что весьма значительное уменьшение продольной жесткости промежуточных опор при этом (с 228 460 до 26 310 кН/м, в 8,6 раза) приводит к снижению собственных частот сооружения по второй группе форм колебаний (рис. 2), характерных наибольшими

отклонениями верха опор, всего на 13%. Это объясняется наличием рельсового пути на мосту. Более заметное влияние на снижение величины собственных частот наблюдается при третьей группе форм колебаний, характерных изгибными колебаниями опор в средней части по ее высоте (рис. 2). На основании расчетов установлено, что даже весьма значительное гипотетическое увеличение массивности опор втрое при учете работы бесстыкового пути на мосту приводит в рассматриваемом примере к уменьшению собственной частоты по второй форме колебаний всего на 23%. Таким образом, можно сделать вывод, что бесстыковой путь на мосту, объединяя сооружение в единую систему, позволяет в конечном счете применять менее материалоемкие немассивные конструкции опор [10].

Заключение

1. Рассмотрена методика определения собственных частот и отвечающих им форм свободных колебаний мостового сооружения балочной разрезной системы с ездой поверху на балласте на высокоскоростной железнодорожной магистрали при учете работы бесстыкового пути на мосту.

2. Получены формы и соответствующие им частоты свободных колебаний четырехпролетного виадука на высокоскоростной железнодорожной магистрали с учетом работы сооружения как единой связанной системы благодаря уложенному бесстыковому пути на сооружении.

3. Дана оценка влияния на динамические свойства мостового сооружения с бесстыковым путем таких факторов, как продольный модуль упругости подрельсового основания, характеризующий продольную жесткость упругих связей между рельсами

бесстыкового пути и балками пролетных строений, массивность и жесткость промежуточных опор вдоль оси пути.

4. Сделан вывод, что наличие бесстыкового пути приводит к существенному изменению динамических свойств мостового сооружения по сравнению с традиционным подходом, когда мостовая опора моделируется отдельно стоящей стойкой. Это создает предпосылки для проектирования более экономичных конструкций.

Библиографический список

1. Смирнов В. Н., Барановский А. А. Мосты на высокоскоростных железнодорожных магистралях // СПб.: ПГУПС. 2015. С. 274.

2. Смирнов В. Н. Собственные частоты и формы продольных колебаний балочного железнодорожного виадука // Вопросы проектирования и эксплуатации искусственных сооружений: сборник трудов ЛИИЖТ / под ред. д. т. н., профессора Ю. Г. Козьмина. Ленинград, 1983. С. 56–62.

3. Смирнов В. Н. Исследование работы мостов с бесстыковым путем // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 4. С. 15–17.

4. Бесстыковой путь / Под ред. В. Г. Альбрехта и Е. М. Бромберга. М.: Транспорт, 1982. 205 с.

5. Альбрехт В. Г., Бромберг Е. М., Иванов К. Е. и др. Бесстыковой путь и длинные рельсы. М.: Транспорт, 1967. 260 с.

6. Prommersberger G., Rojek R., Hommel D. Grundsatzuntersuchung zur Abtragung der Langkraft auf Nalbrücken/Eisenbahningenieur, 1981. 32. No. 9.

7. Крюков Е. П. Брус в упругой среде, сопротивляющейся продольным смещениям. М.: ЦНИИС, № 137, 1958, 86 с.

8. Матвеев Н. М. Методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Высшая школа. 1967. 564 с.

9. Бабаков И. М. Теория колебаний. М.: Наука. 1968. 559 с.

10. Смирнов В. Н. Опоры мостовых сооружений (проектирование, строительство, ремонт и реконструкция). Учебное пособие. СПб.: Издательство ДНК. 2013. 568 с.

Дата поступления: 28.03.2024

Решение о публикации: 07.05.2024

Контактная информация:

ЛУКОВНИКОВ Егор Евгеньевич — аспирант кафедры «Мосты» ФГБОУ ВО ПГУПС; lee0202@vk.com

СМИРНОВ Владимир Николаевич — докт. техн. наук, проф. кафедры «Мосты» ФГБОУ ВО ПГУПС; svn193921@rambler.ru

The influence of the parameters of bridge structures of high-speed railways on the dynamic properties of the bridge-freeways system

V. N. Smirnov, E. E. Lukovnikov

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

For citation: Smirnov V. N., Lukovnikov E. E. The influence of the parameters of bridge structures of high-speed railways on the dynamic properties of the bridge-freeways system // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 449–456. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-449-456

Abstract

Objective: to determine the influence on the frequencies and shapes of free vibrations of multi-span bridge structures of high-speed railways of such factors as the longitudinal modulus of elasticity of the connection of the rail with the sub-rail base, the stiffness of the supports in the direction along the bridge and the massiveness of the intermediate supports. **Methods:** the article considers a four-span bridge with a jointless path modeled as an elastic beam on an elastic base, for which the oscillation forms and their corresponding natural frequencies are determined for various parameters of the bridge-jointless path system. **Results:** the data presented in the article make it possible to take into account the presence of a jointless track on the bridge and its participation in the work of the bridge structure when designing bridge structures on high-speed railways, which makes it possible to make constructive decisions of the elements of the object more reasonably. **Practical significance:** since the dynamic reaction of a structure is entirely determined by its dynamic properties, it becomes extremely important to identify the spectrum of natural frequencies and oscillation patterns of a bridge structure when taking into account the operation of a jointless track on a bridge, which unites the structure into a single system, ensuring the compatibility of the elements of the bridge-jointless track system under longitudinal train and temperature influences, which It makes it possible to reflect the actual operation of the structure and, ultimately, allows you to build more economical bridge supports.

Keywords: natural frequencies and forms of free oscillations, jointless track, bridge structure, high-speed railway lines (HSR).

References

1. Smirnov V. N., Baranovskij A. A. Mosty` na vy`sokoskorostny`x zheleznodorozhny`x magistralyax // SPb.: PGUPS. 2015. S. 274. (In Russian)
2. Smirnov V. N. Sobstvenny`e chastoty` i formy` prodol`ny`x kolebanij balochnogo zheleznodorozhnogo viaduka. // Voprosy` proektirovaniya i e`kspluatacii iskusstvenny`x sooruzhenij: sbornik trudov LIIZhT / pod red. d. t. n., professora Yu.G. Koz`mina. Leningrad, 1983. S. 56–62. (In Russian)
3. Smirnov V. N. Issledovanie raboty` mostov s bessty`kovy`m putem // Put` i putevoe xozyajstvo. 2018. № 4. S. 15–17. (In Russian)
4. Bessty`kovej put` / Pod red. V.G. Al`brexta i E. M. Bromberga. M.: Transport, 1982. 205 s. (In Russian)
5. Al`brext V. G., Bromberg E. M., Ivanov K. E. et. al. Bessty`kovej put` i dlinny`e rel`sy`. M.: Transport, 1967. 260 s. (In Russian)
6. Prommersberger G., Rojek R., Hommel D. Grundsatzuntersuchung zur Abtragungder Langskrafte auf Nalbrucken / Eisenbahningenieur, 1981. 32. No. 9.
7. Kryukov E. P. Brus v uprugoj srede, soprotivlyayushhejsya prodol`ny`m smeshheniyam. / M.: CzNIIS, № 137, 1958, 86 s. (In Russian)
8. Matveev N. M. Metody` integrirovaniya oby`knovenny`x differencial`ny`x uravnenij. M.: Vy`s-shaya shkola. 1967. 564 s. (In Russian)
9. Babakov I. M. Teoriya kolebanij. M.: Nauka. 1968. 559 s. (In Russian)
10. Smirnov V. N. Opory` mostovy`x sooruzhenij (proektirovanie, stroitel`stvo, remont i rekonstrukciya). Uchebnoe posobie. SPb.: Izdatel`stvo DNK. 2013. 568 s. (In Russian)

Received: 28.03.2024

Accepted: 07.05.2024

Author's information:

Egor E. LUKOVNIKOV —
postgraduate student department of Bridges,
Emperor Alexander I St. Petersburg State
Transport University;
lee0202@vk.com

Vladimir N. SMIRNOV —
Dr. Sci. in Engineering, Professor department
of Bridges, Emperor Alexander I St. Petersburg State
Transport University;
svn193921@rambler.ru

УДК 624.042.5

Математическое моделирование термодинамических процессов в вентиляционных шахтах метрополитена

А. А. Сокорнов¹, А. Н. Коньков¹, Ю. А. Филонов¹, Е. Г. Козин²

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

² ГУП «Петербургский метрополитен», Россия, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 28

Для цитирования: Сокорнов А. А., Коньков А. Н., Филонов Ю. А., Козин Е. Г. Математическое моделирование термодинамических процессов в вентиляционных шахтах метрополитена // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 457–469. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-457-469

Аннотация

Цель: разработать рекомендации для выполнения теплотехнических расчетов при капитальном ремонте вентиляционных шахт с созданием внутренних теплоизоляционно-конструкционных рубашек из пеностеклобетона. **Методы:** математическое моделирование методом Метрогипротранса обделки шахтного ствола в упругой среде на заданные перемещения от расширяющегося льда; математическое моделирование методом конечных элементов системы, включающей в себя грунтовый массив, обделку шахтного ствола и нагрузку от конвекции (потока холодного воздуха). **Результаты.** Установлены критерии риска разрушения обделки вентиляционных стволов при промерзании водонасыщенного грунта в заобделочном пространстве. Установлено, что разрушение чугунной обделки от расширения льда зависит от величины отпора грунта и размеров пустот в заобделочном пространстве, но не от глубины расположения рассматриваемого сечения. Выполнена оценка влияния термодинамических характеристик среды заобделочного пространства при работе вентиляционных шахт в условиях знакопеременных температур. Установлено, что в результате весьма широкого изменения теплотехнических характеристик среды температура в заобделочном пространстве в ходе термодинамических расчетов меняется незначительно — в пределах 1 °С, и решающее значение в распределении тепла играют теплотехнические характеристики пеностеклобетонной рубашки. **Практическая значимость:** результаты исследования могут применяться во время обследования вентиляционных шахт метрополитена, а также служить алгоритмом проведения термодинамического расчета при составлении проекта капитального ремонта шахт с рубашкой из пеностеклобетона.

Ключевые слова: вентиляционные стволы, метрополитен, давление, напряжения, конвекция, грунтовый массив, метод Метрогипротранса, метод конечных элементов, пеностеклобетон.

Введение

Одна из самых острых проблем, связанная с эксплуатационной надежностью вентиляционных шахт Петербургского метрополитена — промерзание обделки. Температура воздуха в зимний период может опускаться до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже, что приводит (в режиме приточной вен-

тиляции) к промерзанию как обделки, так и грунтов по ее контуру. При замерзании грунтов и воды в заобделочном пространстве обделка испытывает существенные дополнительные нагрузки. Это приводит к значительному износу конструкций вентстволов, деформациям и повреждению

тубингов, вплоть до их разрушения и выпуска в ствол воды и грунтовых масс, то есть к аварийным ситуациям.

За последние годы коллективом кафедры «Тоннели и метрополитены» при участии кафедр «Инженерная химия и естествознание», «Высшая математика» ГУП «Петербургский метрополитен» были выполнены инновационные исследования в области создания конструктивно-теплоизоляционных рубашек из пеностеклобетона при капитальном ремонте вентиляционных шахт метрополитена [1–3].

При этом на данный момент не установлены критерии риска разрушения обделки, то есть не получен ответ на вопрос влияния величины пустот в заобделочном пространстве на напряженно-деформированное состояние обделки при заполнении их водой с последующим промерзанием. Также актуальным вопросом является отсутствие единого алгоритма теплотехнических расчетов при обосновании проекта капитального ремонта вентиляционных стволов.

Настоящая работа посвящена разработке рекомендаций для выполнения теплотехнических расчетов при капитальном ремонте вентиляционных шахт с созданием внутренних теплоизоляционно-конструкционных рубашек из пеностеклобетона. В процессе исследования были поставлены следующие задачи:

1) установить критерии риска разрушения обделки вентиляционных стволов при промерзании водонасыщенного грунта в заобделочном пространстве;

2) оценить влияние термодинамических характеристик среды заобделочного пространства при работе вентиляционных шахт в условиях знакопеременных температур.

Моделирование процесса превращения воды в заобделочном пространстве в лед и последующее силовое взаимодействие льда с обделкой является сложным многофакторным процессом. С учетом того, что в настоящее время не разработано стандартизированной методики моделирования деформации и разрушения льда [4, 5], учет его совместной работы с обделкой и грунтом является серьезным научным вопросом, открывающим простор для разработки гипотез и теорий. Вместе с тем можно попытаться выполнить моделирование не столько силового взаимодействия льда с обделкой, сколько последствий этого взаимодействия через совместные деформации льда и обделки. Из термодинамики известно, что при переходе в твердое состояние объем воды увеличивается примерно на 10 % (за счет образования кристаллической структуры льда). Из наблюдений установлено, что водяные линзы способны создавать давление, приводящее к смещению обделки внутрь ствола (рис. 1).



Рис. 1. Разрушение обделок стволов вследствие замерзания воды за обделкой

Математическая модель, позволяющая описать этот процесс, была создана в программном комплексе РК-6 (учебная версия) [6], основанном на методе Метрогипротранса (другие названия: Hyperstatic Reaction Method, HRM). Этот метод относится к классу численных методов анализа, в которых напряженное состояние конструкции, представляемой в виде одномерных стержневых элементов, может быть определено через интегральные показатели. Сплошная нейтральная ось обделки заменяется системой стержней, соединенных между собой в узлах. Граничные условия и нагрузки сосредотачиваются в узлах системы, таким образом каждый узел находится в равновесии под воздействием усилий, возникающих в нем от узловых смещений Δx_i , Δy_i , $\Delta \varphi_i$ и узловых нагрузок p_i и q_i . В матричной форме уравнения метода принимают вид:

$$RV + P = 0,$$

где R — матрица реакций на единичные смещения узлов;

V — вектор узловых перемещений;

P — вектор реакций на заданные активные нагрузки.

В результате решения системы уравнений находят неизвестные перемещения узлов Δx_i , Δy_i , $\Delta \varphi_i$. Зная перемещения концов стержней, определяют внутренние усилия в стержнях: изгибающий момент в начале и в конце стержня, нормальные и поперечные силы. Подробно суть метода изложена в [7, 8]. Метод Метрогипротранса доказал свою эффективность при расчете обделок тоннелей кругового очертания, в том числе и шахт метрополитена.

В исследовании была построена стержневая модель тубинговой обделки шахт-

ного ствола наружным диаметром 6 м. Поперечные сечения обделки задавались приведенными прямоугольными, согласно методике, изложенной в [9]. Обделка шахтного ствола находится в условиях равностороннего горизонтального горного давления. Для создания несимметричного нагружения (максимально невыгодного расчетного случая) в обделке задавалось смещение одного из узлов модели (рис. 2). В модели была выполнена серия расчетов на разную величину смещения: 5, 10, 15 и 20 мм для линз льда толщиной 50, 100, 150 и 200 мм соответственно. Эти расчеты были выполнены при трех значениях коэффициента упругого отпора грунта в заобделочном пространстве: 20 000, 10 000 и 5000 т/м³, что соответствует характеристикам твердых протерозойских глин, моренных отложений и слабых водонасыщенных ледниковых отложений.

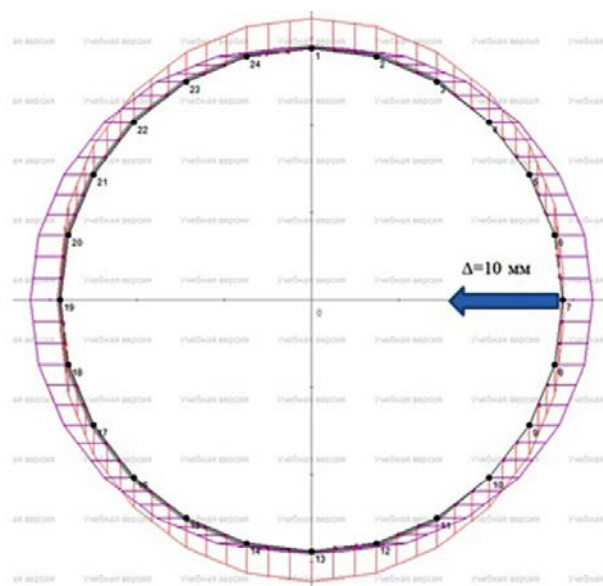
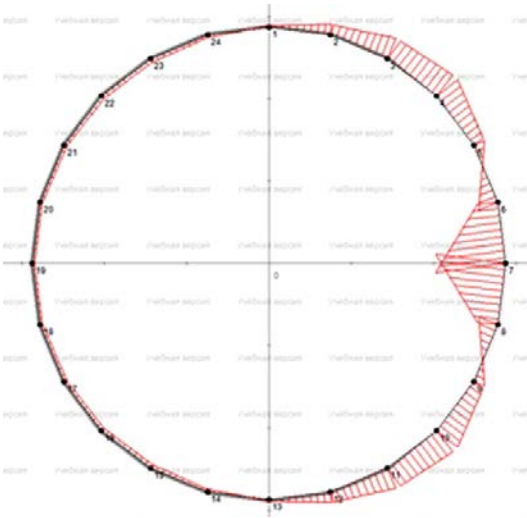
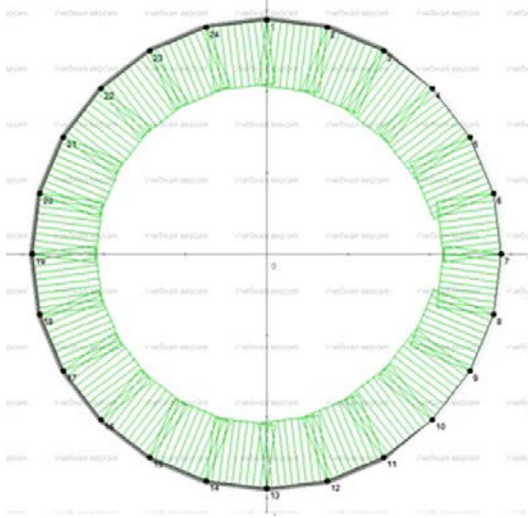
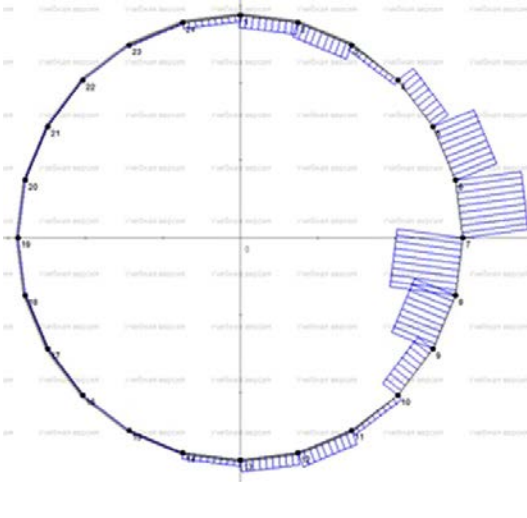
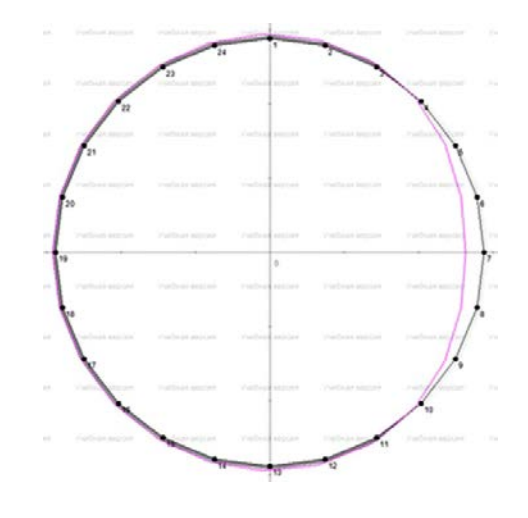


Рис. 2. Расчетная схема обделки шахтного ствола в программном комплексе РК-6 (учебная версия)

В качестве примера в таблице 1 представлены результаты расчета в программе РК-6 «Учебная версия» на смещение 10 мм (от линзы льда за обделкой толщиной 100 мм) при коэффициенте упругого отпора грунта 20 000 т/м³.

ТАБЛИЦА 1. Эпюры внутренних усилий и перемещений

	
<p>Изгибающие моменты; $M_{\max} = 84,39 \text{ тм}$</p>	<p>Нормальные силы; $N_{\max} = 175,65 \text{ т}$</p>
	
<p>Поперечные силы; $Q_{\max} = 78,66 \text{ т}$</p>	<p>Перемещения; $U_{\max} = 0,010 \text{ м}$</p>

В результате каждого расчета были определены максимальные значения, возникающих в обделке напряжений по следующей формуле:

$$\sigma = \left(\frac{M}{W} + \frac{N}{A} \right) \cdot k_k,$$

где σ — максимальные напряжения в тюбинговой обделке;

M и N — максимальный изгибающий момент и максимальная нормальная сила в приведенном сечении соответственно;

W и A — момент сопротивления и площадь поперечного сечения приведенного сечения соответственно;

k_k — коэффициент концентрации напряжений в тюбинговой обделке, принимаемый равным 2 [9].

Диаграмма зависимости максимальных напряжений в обделке от толщины линзы воды за обделкой представлены на рисунке 3. На этом же рисунке горизонтальными линиями показаны предельные значения напряжений для серого чугуна марок СЧ20, СЧ25 и СЧ30 (в соответствии с ГОСТ 1412-85).

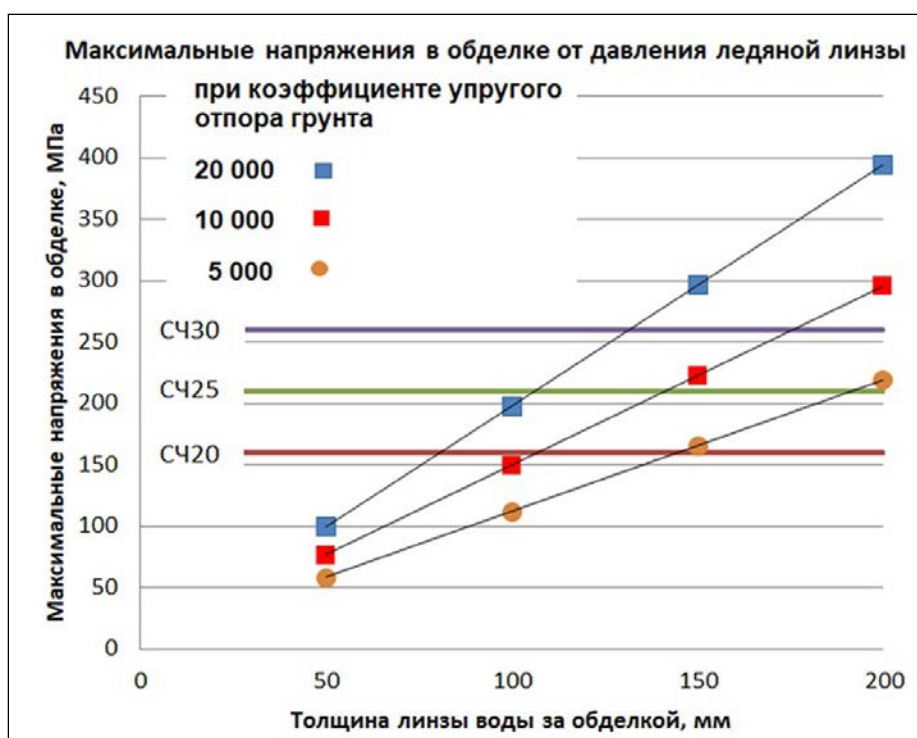


Рис. 3. Диаграмма зависимости максимальных напряжений в обделке от толщины линзы воды за обделкой

На диаграмме хорошо видны линейные зависимости между напряжениями и толщинами водяных линз. Также можно сделать вывод, что при уменьшении упругого отпора грунта также уменьшаются и максимальные напряжения в месте заданного перемещения обдел-

ки. И если в условиях протерозойских глин линзы воды толщиной 150 мм в заобделочном пространстве представляют опасность даже для чугуна марки СЧ30, то в слабых грунтах четвертичных отложений образование льда из водяной линзы толщиной 200 мм не вызовет

разрушения обделки из чугуна этой же марки. Представленные результаты могут служить критериями для анализа риска при обнаружении пустот в заобделочном пространстве и указывать на необходимость выполнения ремонтных работ с нагнетанием цементных составов за обделку либо с устройством теплоизоляционной рубашки.

Важно отметить, что расчеты на данной модели были выполнены и при разных величинах горизонтального горного давления: 30, 50 и 70 т/м², соответствующих заложению рассматриваемого сечения обделки на глубине 30, 50 и 70 м при коэффициенте бокового давления 0,5 и усредненном объемном весе грунта 2 т/м³. При этом вклад такого существенного изменения равностороннего обжатия обделки на ее максимальные напряжения, вызванные воздействием льда, оказался в пределах 2 %. Это означает, что разрушения обделки от давления льда в заобделочном пространстве могут проявляться на любой глубине и будут зависеть в первую очередь от величины отпора грунта.

Для оценки влияния термодинамических характеристик среды заобделочного пространства при работе вентиляционных шахт в условиях знакопеременных температур была построена конечноэлементная модель в расчетном комплексе MIDAS GTS NX. Данный комплекс широко распространен в научной среде и применяется в расчетах сложных систем, таких как «фундамент — грунт» или «обделка — грунт», причем результаты математического моделирования в ряде исследований имели высокую сходимость с натурой [10–14].

Грунтовый массив и расположенная в нем конструкция были разбиты на сеть объемных конечных элементов, соединенных между собой в узлах. На боковых границах массива были установлены ограничения в виде запрета горизонтальных перемещений, на нижней границе — в виде запрета вертикальных перемещений. На рисунках 4 и 5 представлены элементы модели: чугунная тубинговая обделка шахтного ствола и рубашка из пеностеклобетона.

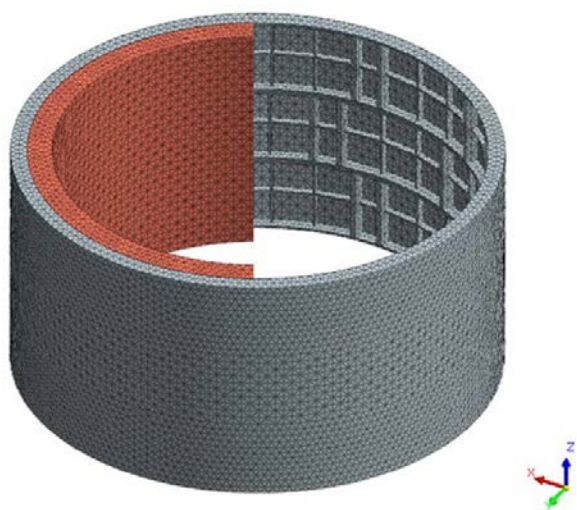


Рис. 4. Общий вид конечно-элементной модели чугунной тубинговой обделки шахтного ствола с рубашкой из пеностеклобетона

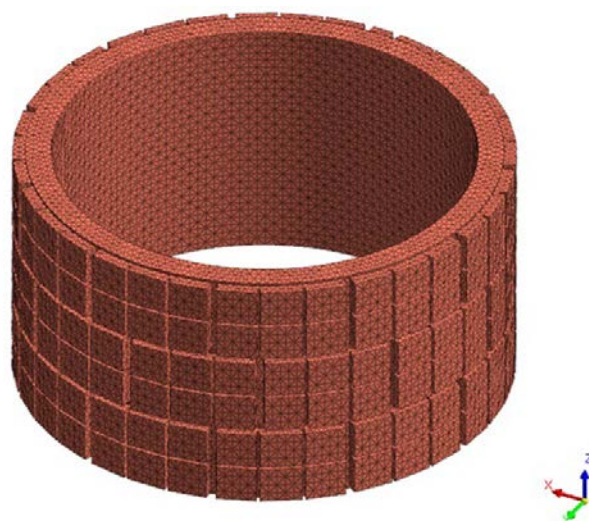


Рис. 5. Общий вид конечно-элементной модели рубашки из пеностеклобетона

Стадийность расчета задавалась включением в работу температурных нагрузок. На первом этапе расчета всем элементам системы присваивалось начальное значение температуры $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответствующее температуре обводненного грунта в заобделочном пространстве. На втором этапе по внутренней грани пеностеклобетонной обделки активировалась конвекционная нагрузка (обдув), которая характеризуется суммарным коэффициентом теплоотдачи на границе «воздух — поверхность тела» в соответствии с СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» и принимается равным $\alpha = 23\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$.

Интенсивность конвекционной нагрузки задавалась переменной во времени,

для чего был построен график перепадов температуры воздуха. Анализ температур воздуха в Санкт-Петербурге за период с 2005 по 2017 год [15] показал, что в течении зимних месяцев температура может понизиться до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ на период до одной недели, а в весенний период до 3–4 раз иметь знакопеременный режим. Поэтому на графике (рисунок 6) был смоделирован следующий перепад температуры:

- 1–4-е сутки: повышение температуры от $+7$ до $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 4–10-е сутки: плавное, а затем резкое похолодание до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 10–17-е сутки: продолжительные заморозки при температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 17–20-е сутки: оттепель до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

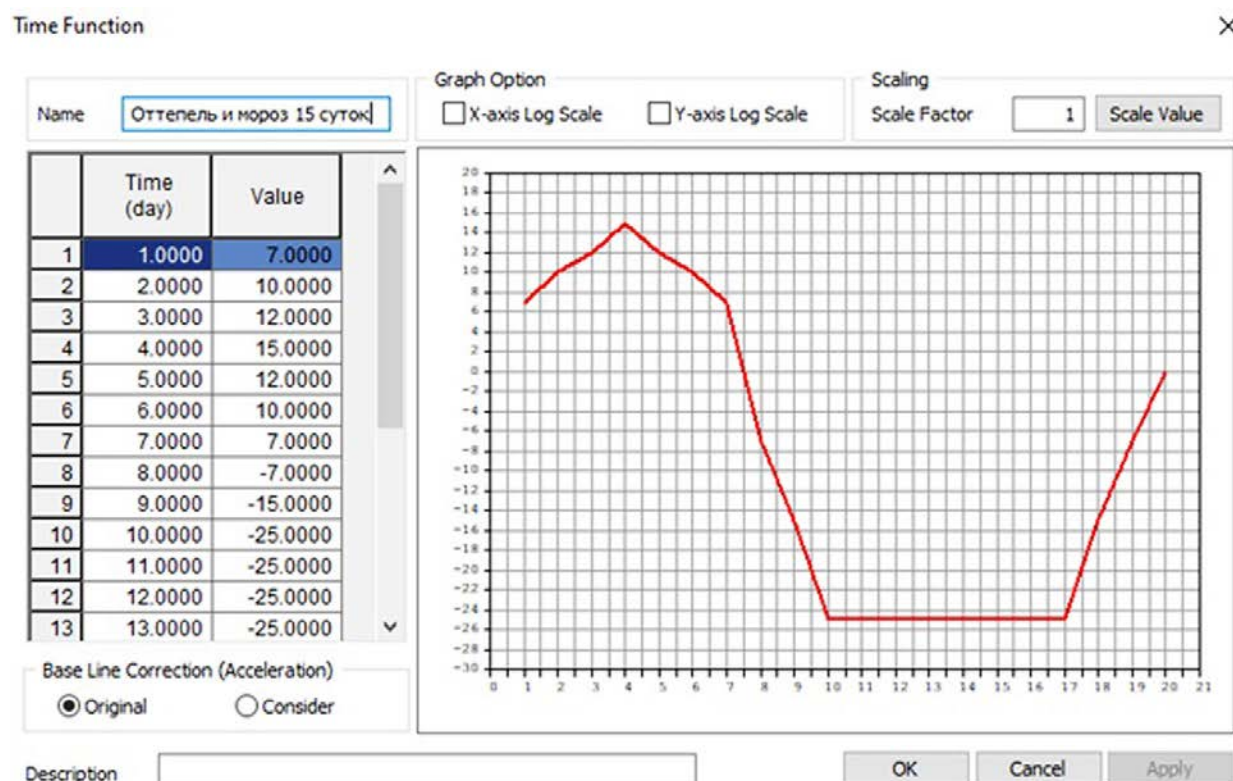


Рис. 6. График перепада температуры воздуха

Для выполнения термодинамических расчетов конечным элементам системы присваивались две характеристики: коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С), и удельная теплоемкость C , Дж/(т·°С).

Теплотехнические характеристики чугуна:

— коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = 70 \text{ Вт/(м·°С)};$$

— удельная теплоемкость,

$$C = 540\,000 \text{ Дж/(т·°С)}.$$

Теплотехнические характеристики модифицированного пеностеклобетона (принимались для двух составов):

— коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = 0,15 \text{ Вт/(м·°С)} \text{ и } \lambda = 0,2 \text{ Вт/(м·°С)};$$

— удельная теплоемкость,

$$C = 840\,000 \text{ Дж/(т·°С)}.$$

Теплотехнические характеристики грунта принимались разными. Всего было выполнено три эксперимента с разными значениями коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости заобделочной среды.

В эксперименте № 1 материалу за обделкой ствола присваивались теплотехнические характеристики воды в соответствии с ОДМ 218.2.061-2015 «Рекомендации по определению теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов». Таким образом, рассматривался случай, при котором за обделкой образуются

пустоты, заполненные водой. Вода обладает низкой теплопроводностью, но большой теплоемкостью. Минимальная температура на контакте «обделка — грунт» была зафиксирована на 18-е сутки эксперимента (табл. 2) и составила от +1,51 до –0,07 °С в зависимости от теплопроводности пеностеклобетона. Можно сделать вывод, что промерзания среды заобделочного пространства не наступило, поскольку критическая температура среды составляет –1 °С [15].

В эксперименте № 2 материалу за обделкой ствола присваивались теплотехнические характеристики влажного суглинка в соответствии с СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». В сравнении с водой теплопроводность влажного грунта так же высока, как и низка его теплоемкость. Минимальная температура на контакте «обделка — грунт» на 18-е сутки эксперимента (табл. 2) составила от +2,19 до +0,78 °С. Результаты экспериментов № 1 и 2 при разных значениях коэффициента теплопроводности пеностеклобетона отличаются между собой на схожую величину ~0,7 °С, что можно считать несущественным. Допустимо сделать вывод, что для проведения термодинамических расчетов принципиальная разница в выборе материала (грунт или вода) отсутствует.

ТАБЛИЦА 2. Результаты термодинамических экспериментов

№	Материал заобделочной среды	Коэффициент теплопроводности среды λ , Вт/(м·°С)	Удельная теплоемкость среды C , Дж/(т·°С)	Температура в среде на контакте с обделкой (°С) при коэффициенте $\lambda_{п}$ теплопроводности пеностеклобетона $\lambda_{п}$, Вт/(м·°С)	
				$\lambda_{п} = 0,15$	$\lambda_{п} = 0,2$
1	Вода	0,57	4 190 000	+1,51	–0,07
2	Влажный суглинок	1,57	1 760 000	+2,19	+0,78
3	Средние значения	1,00	3 000 000	+2,06	+0,61

В эксперименте № 3 выбор средних значений привел к увеличению температуры в заобделочном пространстве примерно на 0,5 °С по сравнению с экспериментом № 1.

Эксперименты показали, что в результате весьма широкого изменения теплотехнических характеристик среды температура в заобделочном пространстве меняется несущественно, в пределах 1 °С. Таким образом, решающее значение в распределении тепла играют теплотехнические характеристики пеностеклобетонной рубашки.

На рисунках 7–9 представлены типовые изополя распределения температур в пеностеклобетонной рубашке, обделке и грунтовом массиве на 17–18-е сутки эксперимента. Следует отметить тот факт, что наибольшие потери тепла из массива происходят на контакте с бортами обделки, где имеется наибольшая концентрация чугуна, который очень хорошо проводит тепло. Вместе с тем интенсивность такой теплопотери составляет всего 0,3 °С (рис. 9).

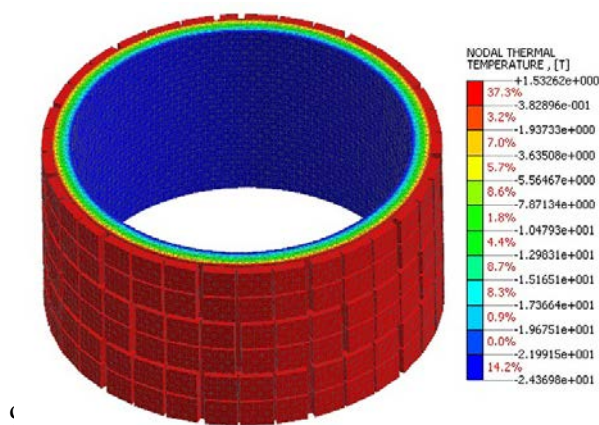


Рис. 7. Изополя распределения температуры в пеностеклобетонной рубашке на 17-е сутки эксперимента (от -24,37 до +1,53 °С)

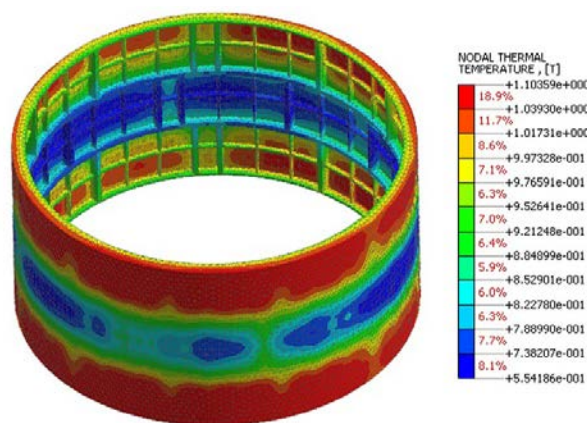


Рис. 8. Изополя распределения температуры в чугунной обделке на 18-е сутки эксперимента (от +0,55 до +1,10 °С)

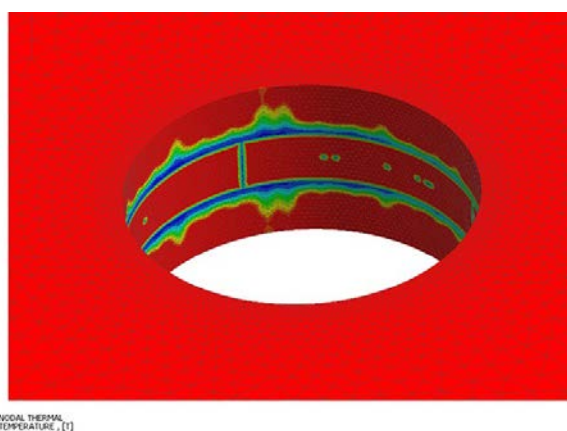


Рис. 9. Изополя распределения температуры в грунтовом массиве на 18-е сутки эксперимента (от -0,78 до > +1,0 °С)

В результате выполненного исследования были установлены критерии риска разрушения обделки вентиляционных стволов при промерзании водонасыщенного грунта в заобделочном пространстве. Было установлено, что разрушение чугунной обделки от расширения льда зависит от величины отпора грунта и размеров пустот в заобделочном пространстве, но не от глубины расположения рассматриваемого сечения.

Также была выполнена оценка влияния термодинамических характеристик среды заобделочного пространства при работе вентиляционных шахт в условиях знакопеременных температур. Было установлено, что в результате весьма широкого изменения теплотехнических характеристик среды температура в заобделочном пространстве в ходе термодинамических расчетов меняется несущественно, в пределах 1 °С, и решающее значение в распределении тепла играют теплотехнические характеристики пеностеклобетонной рубашки.

Библиографический список

1. Kozin E. G., Burin D. L., Ledyayev A. P., et al. Ventilation shafts freezing protection under the influence of negative temperatures // *Transportation soil engineering in cold regions. Proceedings of transoilcold 2019*. 2020. P. 509–519. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_53.
2. Коньков А. Н., Филонов Ю. А., Новиков А. Л. и др. Реновация вентиляционных стволов с устройством конструктивно-теплоизоляционной рубашки из пеностеклобетона // *Подземные горизонты*. 2019. № 22. С. 56–58.
3. Бурин Д. Л., Новиков А. Л., Филонов Ю. А. Защита от промерзания вентиляционных стволов метрополитена с устройством конструктивно-теплоизоляционной рубашки из пеностеклобетона // *Метро и тоннели*. 2021. № 4. С. 21–23.
4. Гриневич Д. В., Бузник В. М., Нужный Г. А. Обзор применения численных методов для моделирования деформации и разрушения льда // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (90). [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-primeneniya-chislennyh-metodov-dlya-modelirovaniya-deformatsii-i-razrusheniya-lda>.
5. Сорокин К. Э., Бывальцев П. М., Аксенов А. А. и др. Численное моделирование обледенения в программном комплексе FlowVision // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2020. Т. 12, вып. 1. С. 83–96. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-1-83-96
6. Лянда А. А. Мичурина Т. А., Назарова Т. В. Программа РК-6 (учебная версия), раздел «Справка» [Программа для ЭВМ]. СПб.: Ленметрогипротранс, 2000.
7. Oreste P. A numerical approach to the hyperstatic reaction method for the dimensioning of tunnel supports // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2007. Vol. 22, iss. 2. P. 185–205. DOI: 10.1016/j.tust.2006.05.002
8. Do N. A., Dias D., Oreste P., et al. The behaviour of the segmental tunnel lining studied by the hyperstatic reaction method // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2014. Vol. 18, iss. 4. P. 489–510. DOI: 10.1080/19648189.2013.872583
9. Konkov A., Sokornov A., Korolev K. The results analysis of the tubing tunnel facing mathematical modeling using the reduced sections // *International scientific siberian transport forum TransSiberia 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham. 2022. Vol. 402, iss. 1. P. 568–576.
10. Ledyayev A., Kavkazskiy V., Davidenko E. Examination of the stress-strain state of service tunnels at the airport Domodedovo // *International scientific siberian transport forum TransSiberia 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham. 2022. Vol. 402, iss. 1. P. 28–37.
11. Osvaldo P. M. Vitali, Tarcisio B. Celestino, Antonio Bobet. Construction strategies for a NATM

tunnel in São Paulo, Brazil, in residual soil // *Underground Space*. 2022. Vol. 7, iss. 1. P. 1–18. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.04.002

12. Shaposhnikov E. A., Frolov Yu. S. Substantiation of rational design factors of a metropolitan railway station without side railway platforms // *Russian Journal of Transport Engineering*. 2023. Vol. 10, no. 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS123.pdf>. DOI: 10.15862/05SATS123

13. Mohyla M., Hrubesova E., Martinkauppi B. et al. Numerical simulation of the thermal response of seabed sediments to geothermal cycles in Suvilahdi, Finland // *Renewable Energy*. 2024. Vol. 221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119770>

14. Gang Wei, Feifan Feng, Chengbao Hu, et al. Mechanical performances of shield tunnel segments under asymmetric unloading induced by pit excavation // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023. Vol. 15, iss. 6. P. 1547–1564. DOI: doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.08.010

15. Ледяев А. П., Филонов Ю. А., Коньков А. Н. и др. Подготовка и проведение научно-исследовательских работ по технологии реновации обделок вентстволов с применением пеностеклобетона: технический отчет, СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017.

Дата поступления: 13.04.2024

Решение о публикации: 13.05.2024

Контактная информация:

СОКОРНОВ Антон Александрович — старший преподаватель; scarlunch@mail.ru

КОНЬКОВ Александр Николаевич — канд. техн. наук, доцент; ankonkov@yandex.ru

ФИЛОНОВ Юрий Александрович — канд. техн. наук, заведующий лабораторией кафедры «Тоннели и метрополитены»; parad11@mail.ru

КОЗИН Евгений Германович — канд. техн. наук, начальник ГУП «Петербургский метрополитен»; kegleeev@gmail.ru

Mathematical modeling of thermodynamic processes in subway ventilation shafts

A. A. Sokornov¹, A. N. Konkov¹, Yu. A. Filonov¹, E. G. Kozin²

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

² St. Petersburg Metro SUE, 28, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190013, Russia

For citation: Sokornov A. A., Konkov A. N., Filonov Yu. A., Kozin E. G. Mathematical modeling of thermodynamic processes in subway ventilation shafts // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2, P. 457–469. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-457-469

Abstract

Objective: To develop recommendations for performing thermal engineering calculations during the ventilation shafts renovation with the creation of internal thermal insulation made of foam glass concrete. **Methods:** Mathematical modeling by the Metrogiprotrans method of the shaft lining in an elastic medium for specified movements from expanding ice; mathematical modeling by the finite elements method of a system including a ground massive, shaft lining and a load from convection (cold air flow). **Results:** The criteria for the risk of the ventilation shafts lining destruction during freezing of water-saturated soil behind the lining have been established. It has been established that the destruction of cast-iron lining from the ice expansion depends on the amount of soil resistance and the size of voids behind the lining, but not on the depth of the location of the section under consideration.

An influence assessment of the soil thermodynamic characteristics during the ventilation shafts operation in conditions of alternating temperatures has been performed. It was found that as a result of a very wide change in the thermal characteristics of the medium, the temperature behind the lining during thermodynamic calculations changes insignificantly — within 1 °C, and the thermal characteristics of the foam glass concrete layer play a decisive role in heat distribution. **Practical importance:** The results of the study can be used during the inspection of subway ventilation shafts, as well as an algorithm for conducting thermodynamic calculations for projecting shafts renovation with an insulation made of foam glass concrete.

Keywords: ventilation shafts, subway, pressure, stresses, convection, ground massive, Metrogiprotrans method, finite element method, foam glass concrete.

References

1. Kozin E. G., Burin D. L., Ledyayev A. P., et al. Ventilation shafts freezing protection under the influence of negative temperatures // *Transportation soil engineering in cold regions. Proceedings of transoilcold 2019*. 2020. P. 509–519. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_53.
2. Kon'kov A. N., Filonov Ju. A., Novikov A. L. i dr. Renovacija ventiljacionnyh stvolov s ustrojstvom konstruktivno-teploizoljacionnoj rubashki iz penosteklobetona // *Podzemnye gorizonty*. 2019. № 22. S. 56–58. (In Russian)
3. Burin D. L., Novikov A. L., Filonov Ju. A. Zashchita ot promerzaniya ventiljacionnyh stvolov metropolitena s ustrojstvom konstrukcionno-teploizoljacionnoj rubashki iz penosteklobetona // *Metro i tonneli*. 2021. № 4. S. 21–23. (In Russian)
4. Grinevich D. V., Buznik V. M., Nuzhnyj G. A. Obzor primeneniya chislennyh metodov dlja modelirovaniya deformacii i razrusheniya l'da // *Trudy VIAM*. 2020. № 8 (90). [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-primeneniya-chislennyh-metodov-dlya-modelirovaniya-deformatsii-i-razrusheniya-lda>. (In Russian)
5. Sorokin K. Je., Byval'cev P. M., Aksenov A. A. i dr. Chislennoe modelirovanie obledeneniya v programmnom komplekse FlowVision // *Komp'yuternye issledovanija i modelirovanie*. 2020. T. 12, vyp. 1. S. 83–96. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-1-83-96 (In Russian)
6. Ljanda A. A. Michurina T. A., Nazarova T. V. Programma RK-6 (uchebnaja versija), razdel «Spravka» [Programma dlja JeVM]. SPb.: Lenmetrogioprotrans, 2000. (In Russian)
7. Oreste P. A numerical approach to the hyperstatic reaction method for the dimensioning of tunnel supports // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2007. Vol. 22, iss. 2. P. 185–205. DOI: 10.1016/j.tust.2006.05.002
8. Do N. A., Dias D., Oreste P., et al. The behaviour of the segmental tunnel lining studied by the hyperstatic reaction method // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2014. Vol. 18, iss. 4. P. 489–510. DOI: 10.1080/19648189.2013.872583
9. Konkov A., Sokornov A., Korolev K. The results analysis of the tubing tunnel facing mathematical modeling using the reduced sections // *International scientific siberian transport forum TransSiberia 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham. 2022. Vol. 402, iss. 1. P. 568–576.
10. Ledyayev A., Kavkazskiy V., Davidenko E. Examination of the stress-strain state of service tunnels at the airport Domodedovo // *International scientific siberian transport forum TransSiberia 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham. 2022. Vol. 402, iss. 1. P. 28–37.
11. Osvaldo P. M. Vitali, Tarcisio B. Celestino, Antonio Bobet. Construction strategies for a NATM tunnel in São Paulo, Brazil, in residual soil // *Underground Space*. 2022. Vol. 7, iss. 1. P. 1–18. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.04.002
12. Shaposhnikov E. A., Frolov Yu. S. Substantiation of rational design factors of a metropolitan railway station without side railway platforms // *Russian Journal of Transport Engineering*. 2023. Vol. 10, no. 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS123.pdf>. DOI: 10.15862/05SATS123

13. Mohyla M., Hrubesova E., Martinkauppi B. et al. Numerical simulation of the thermal response of seabed sediments to geothermal cycles in Suvilahti, Finland // *Renewable Energy*. 2024. Vol. 221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119770>

14. Gang Wei, Feifan Feng, Chengbao Hu, et al. Mechanical performances of shield tunnel segments under asymmetric unloading induced by pit excavation // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023. Vol. 15, iss. 6. P. 1547–1564. DOI: doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.08.010

15. Ledjaev A. P., Filonov Ju. A., Kon'kov A. N. i dr. Podgotovka i provedenie nauchno-issledovatel'skih rabot po tehnologii renovacii obdelok ventstvolov s primeneniem penosteklobetona: tehničeskij otčet, SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2017. (In Russian)

Received: 13.04.2024

Accepted: 13.05.2024

Author's information:

Anton A. SOKORNOV — Senior Lecturer;
scarlunch@mail.ru

Alexandr N. KONKOV — PhD in Engineering,
Associate Professor;
ankonkov@yandex.ru

Yury A. FILONOV — PhD in Engineering,
Head of “Tunnels and Subways”
department laboratory;

parad11@mail.ru

Evgeniy G. KOZIN — PhD in Engineering,
Head of St. Petersburg Metro SUE;

kegleev@gmail.ru

УДК 614.7, 004.4

Программный комплекс для дифференциальной оценки риска здоровью населения от воздействия шума железнодорожного и автомобильного транспорта

Д. И. Фесак, Н. В. Давыдов, Д. А. Колобов, А. А. Федосеенко

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

Для цитирования: Фесак Д. И., Давыдов Н. В., Колобов Д. А., Федосеенко А. А. Программный комплекс для дифференциальной оценки риска здоровью населения от воздействия шума железнодорожного и автомобильного транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 470–479. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-470-479

Аннотация

Цель: в современном мире количество транспорта на дорогах растет в геометрической прогрессии, а инфраструктура или остается неизменной, или меняется, но происходит это не так быстро, как хотелось [1]. Долгосрочные последствия воздействия шума, такие как нарушения в работе сердечно-сосудистой системы (повышение артериального давления, инфаркты миокарда, ишемическая болезнь сердца и др.), нервной системы (расстройство сна, когнитивные нарушения, вегетососудистая дистония), болезни уха и сосцевидного отростка (кондуктивная и нейросенсорная потеря слуха), депрессии и другие психические расстройства [2–4], в большей степени связаны с показателями, которые суммируют шумовое воздействие в течение длительного времени. Как при проведении испытаний аккредитованными специалистами, так и при выборе жилья покупателями, приходится полагаться на аналитический или практический способ оценки шумовой загрязненности помещения. С целью обеспечения человека простым и объективным способом оценки шумовой загрязненности был разработан программный комплекс, позволяющий оценить воздействие шумового загрязнения от транспорта на здоровье населения. **Методы:** количественная оценка риска выполнена в соответствии с методическими рекомендациями МР 2.1.10.0059-12 «Оценка риска здоровью населения от воздействия транспортного шума». **Результаты:** с целью автоматизации расчетов, унификации оценки результатов и снижения затрат времени авторами предлагается программный комплекс для дифференциальной оценки риска здоровью населения от воздействия железнодорожного и автомобильного транспорта. Конечным продуктом является удобное, кросс-платформенное приложение для оперативной оценки риска в полевых условиях для сотрудников испытательных центров, проводящих измерения шума от известных источников автомобильного, железнодорожного или комбинированного транспортных потоков. **Практическая значимость:** удобство и оптимизация обработки рисков по замерам шума сотрудниками шумометрических лабораторий при помощи приложения.

Ключевые слова: шум, шумовое загрязнение, риски развития заболеваний, экология, охрана здоровья.

Введение

Транспорт является одним из основных элементов современного общества. Без транспорта человечество не смогло бы обеспечить себе удобное и безопасное передвижение. Однако количество транспортных средств на дорогах растет из года в год, что приводит к проблемам, связанным с загрязнением воздуха химическими веществами и акустическим шумом. С каждым годом вопрос охраны окружающей среды и обеспечения комфортной городской среды становится все более актуальным. Одним из решений является создание эффективной системы управления движением, перевозками и логистикой, что может включать в себя разработку и внедрение новых технологий, создание новых материалов для дорожного покрытия, размещение системы велосипедных дорожек, развитие общественного транспорта и многое другое. Для комплексной оценки шумового загрязнения необходимо проводить регулярный мониторинг шума и принимать меры по его снижению [5]. Акустическое загрязнение, превышающее предельно установленные значения, может вызвать бессонницу, ухудшить самочувствие, привести к психическим расстройствам, нарушениям слуха, повреждению головного мозга и снижению концентрации и внимания [6]. Это особенно актуально для детей и подростков, которые постоянно контактируют с шумом и вынуждены учиться в условиях повышенной психоэмоциональной нагрузки [7]. Для снижения такой стрессовой нагрузки необходимо применять комплексные меры. Прежде всего, необходимо усиливать контроль шума, внедрять новые технологии и разработки, которые могут уменьшить уро-

вень шума в городах и снизить риски для здоровья жителей. Кроме того, необходимо проводить просветительские мероприятия среди населения о важности контроля шума и необходимости соблюдения норм и правил безопасности, связанных с шумовым загрязнением. Это позволит защитить жизнь и здоровье людей и сохранить комфортную городскую среду [8].

Выявление рисков для здоровья населения, связанных с транспортом, является одной из основных задач современного общества. Для эффективного и точного определения уровня угрозы здоровью и благополучия населения необходимо использовать данные, поступающие из разных источников, — инструментальные измерения, карта распространения шумового загрязнения, уровень заболеваемости, жалобы населения. Одним из основных источников информации акустического загрязнения являются данные измерений уровня шума от автомобильного и железнодорожного транспорта [9, 10]. Данные могут собираться с помощью специального оборудования (шумомера) и передаваться в лабораторию для обработки результатов. Данные автоматизированных измерений шума от автомобильного и железнодорожного транспорта могут быть использованы для расчета и определения уровня опасности и оценки риска для здоровья населения. Важно отметить, что выявление транспортных рисков является многофакторной задачей, требующей комплексного подхода и учета различных параметров [11]. Среди них — выбор точки и времени проведения измерений, компетентность проводящего измерения сотрудника, точность и воспроизводимость полученных результатов, а также правильность расчета рисков

здоровья населения. Проведение правильных и независимых интерпретаций и анализа проведенных исследований помогают не только определить уровень опасности, но и предложить меры для предотвращения возможных нарушений здоровья населения.

Оценка риска для здоровья населения при воздействии транспортного шума выполняется с целью [12, 13]:

1) выявления факторов, опасных для жизни и здоровья человека;

2) прогноза изменения санитарно-гигиенической ситуации.

Оценка риска может производиться при:

1) проведении гигиенических оценок, исследований и экспертиз;

2) проектировании путей сообщения и транспортных предприятий, размещаемых на территории населенных мест;

3) обосновании управленческих решений, направленных на снижения уровней риска здоровью населения.

ТАБЛИЦА 1. Эффекты для здоровья населения при воздействии ночного шума

Поражаемые органы и системы	Нарушения здоровья	Данные о пороговых уровнях шума, дБ
Нервная система	Нервозность (нервное напряжение, раздражение)	35
	Расстройство сна	40
	Когнитивные нарушения	42
	Вегетососудистая дистония	60
Система кровообращения	Повышение кровяного давления неспецифическое, без диагноза гипертензии	65
	Гипертензивная болезнь сердца	70
	Ишемическая болезнь сердца	70
	Стенокардия	70
	Инфаркт миокарда	70
Болезни уха и сосцевидного отростка	Шум в ушах (субъективный)	45
	Кондуктивная и нейросенсорная потеря слуха	80
	Потеря слуха, вызванная шумом	80

Для упрощения работы служб санитарно-эпидемиологического надзора в сфере оценки рисков населения от воздействия транспортного шума авторами работы представлена разработка — приложение для автоматической обработки полученного при инструментальных замерах результата прямо «в поле».

Методика работы: для математического аппарата предлагаемого приложения были использованы методические рекомендации МР — 2.1.10.0059-12 «Оценка риска здоро-

вья населения от воздействия транспортного шума». Конечным продуктом является удобное в использовании, интуитивно понятное приложение, с помощью которого можно сразу после замеров произвести расчет требуемых параметров.

При детальном рассмотрении представленных в табл. 2 формул можно сделать вывод о необходимых высоких компетенциях сотрудника, который должен выполнить этот расчет.

ТАБЛИЦА 2. Расчетные формулы, представленные в МР — 2.1.10.0059-12 «Оценка риска здоровью населения от воздействия транспортного шума»

3.1	Заболевания органов системы кровообращения	$OR = 1.63 - 6.13 \cdot 10^{-4} \cdot L_{day,16}^2 + 7.36 \cdot 10^{-6} \cdot L_{day,16}^3$ (для диапазона 55–80 дБ)
3.2	Доля лиц, раздраженных ночным шумом (НА), %	$HA = 0.5118 \cdot (L_{den} - 42) - 1.436 \cdot 10^{-2} \cdot (L_{den} - 42)^2 + 9.868 \cdot 10^{-4} \cdot (L_{den} - 42)^3$
3.3	Раздражение на шум	$R = 100/1 + exp \cdot (10.4 - 0.132 \cdot L_{den})$
3.4	Доля лиц с устойчивым нарушением сна, при авиационном шуме (HSD), %	$HSD = 18.147 - 0.956L_{night} + 0.0149 \cdot L_{night}^2$
3.5	Доля лиц с устойчивым нарушением сна, при шуме железной дороги (HSD), %	$HSD = 11.3 - 0.55L_{night} + 0.00759 \cdot L_{night}^2$
3.6	Доля лиц с устойчивым нарушением сна, при автомобильном шуме (HSD), %	$HSD = 20.8 - 1.05L_{night} + 0.0149 \cdot L_{night}^2$
3.7	Развитие неспецифических эффектов	$Risk^{NSP} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-00}^{Pr^{NSP}} e^{\frac{x}{2}} dx, \text{ где } Pr^{NSP} = -4.551 + 0.8531lg\left(\frac{Dt}{0,511}\right)$
3.8	Жалобы населения на шум	$Risk^{SOC} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-00}^{Pr^{SOC}} e^{\frac{x}{2}} dx, \text{ где } Pr^{SOC} = -6.5027 + 0.8891lg\left(\frac{D}{4.8 \cdot 10^{-4}}\right)$
3.9	Развитие специфических эффектов	$Risk^{SP} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-00}^{Pr^{SP}} e^{\frac{x}{2}} dx, \text{ где } Pr^{SP} = -6.6771 + 0.7041lg\left(\frac{Dt}{0,511}\right)$

В настоящее время приведенные выше расчеты выполняются вручную, что приводит к таким последствиям как:

1. Ошибки в расчетах.
2. Ошибки при заполнении документов.
3. Увеличение необходимого времени для проведения оценки рисков.

Авторы представленной работы предлагают оптимизировать (автоматизировать) процесс оценки и расчета рисков с помощью программного продукта.

С целью наработки базы данных для дальнейшей проверки работоспособности программного продукта были произведены инструментальные измерения в двух

местах: оживленной автомобильной дороге (рис. 1), а также в нагруженном железнодорожном узле (рис. 2).

Измерения проводились с помощью шумомера Октава 110А — цифровой интегрирующий шумомер 1 класса (ГОСТ Р 53188.1), а также анализатор спектра (1/1- и 1/3-октавные фильтры, класс 1 по ГОСТ 17168 и МЭК 61260). Он используется для измерения уровня шума в окружающей среде и широко применяется в промышленности, науке и технике.

Основные характеристики шумомера Октава 110А:

1. Диапазон измерения уровня звука: от 22 до 139 дБ.

2. Точность измерения: ± 1 дБ.
3. Время отклика: менее 1 сек.
4. Питание: от четырех батареек типа АА.
5. Габариты: $354 \times 86 \times 36$ мм.
6. Масса: 605 г.

Октава 110А используется как профессионалами, так и любителями для контроля уровня шума на рабочих местах, в жилых помещениях, на концертах и других мероприятиях. Прибор также может использоваться для научных исследований и мониторинга окружающей среды.

Для измерений были выбраны несколько временных промежутков:

1. Ночь в будний день (01:00).
2. Ночь в выходной день (01:00).
3. Рабочий день (13:00).

Измерения проводились в соответствии с вышеуказанными методическими рекомендациями.

По результатам замеров на первом участке (оживленной автомобильной улице) было получено превышение предельно допустимых норм во всех частотных диапазонах в точках и времени измерения.

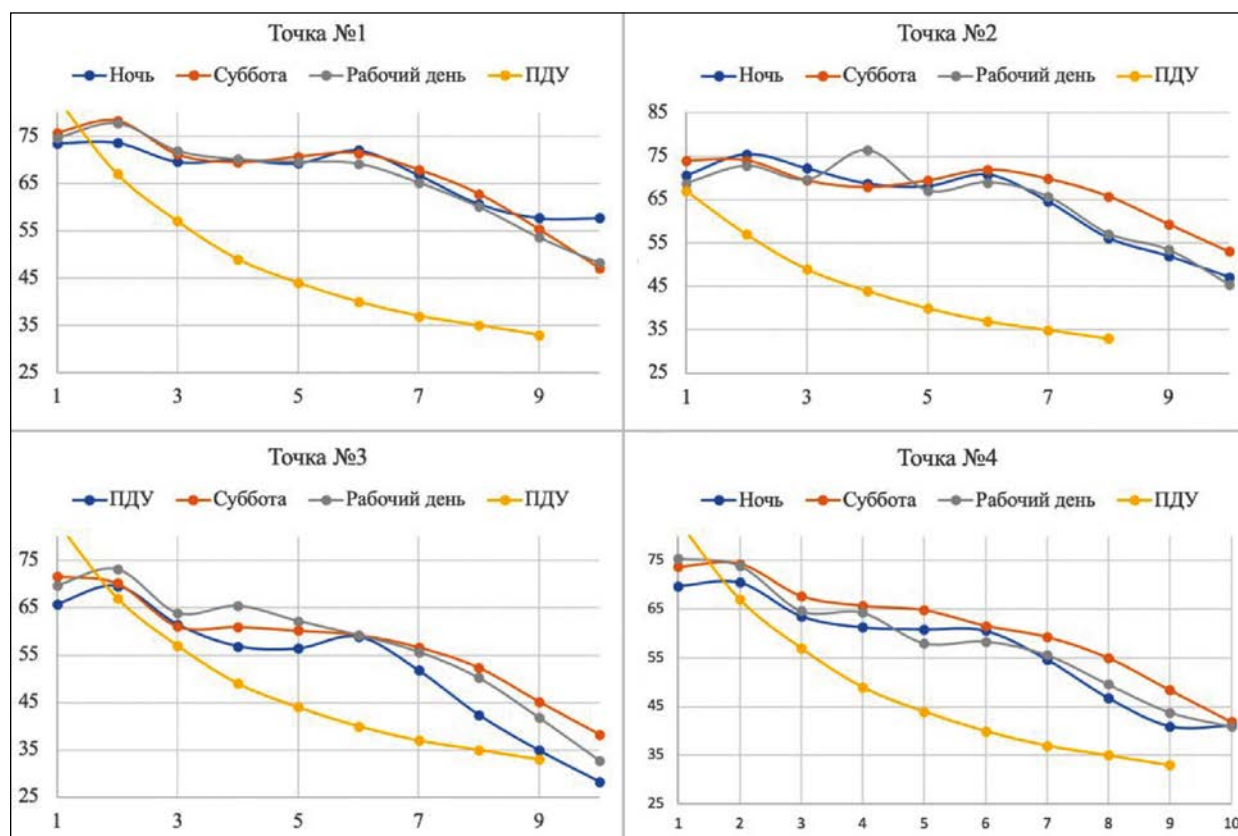


Рис. 1. Результаты измерений шума в четырех точках на Московском проспекте

Также были произведены измерения в районе сортировочной горки Ивановского муниципального округа. Данные замеры также имеют превышения по предельно допустимым нормам во многих частотных

диапазонах (рис. 1). На графиках (точка 2, точка 3) можно увидеть присущий данной местности характерный пик на 1000–4000 Гц. Данный звук исходит от колесных пар при их роспуске по сортировочной горке.

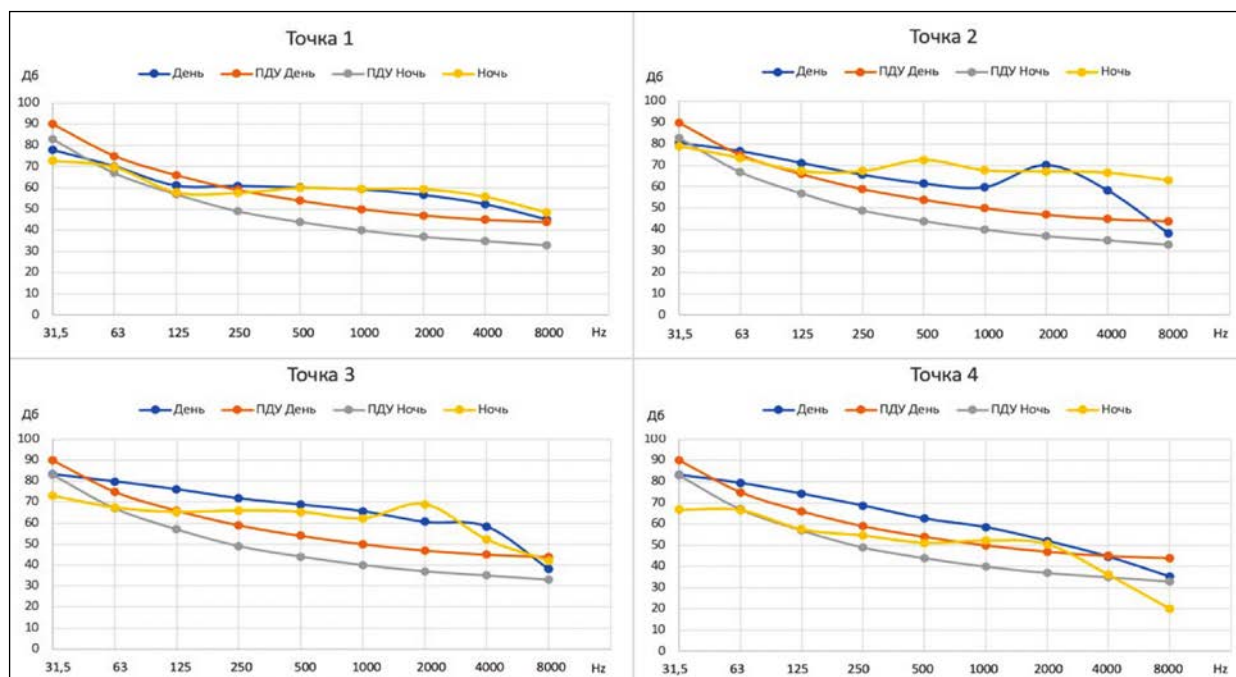


Рис. 2. Результаты измерений шума в четырех точках в районе Сортировочной

После накопления достаточной базы данных для отладки программы был составлен программный код. Результатом работы явилось приложение для опе-

рационной системы Windows, его можно использовать как на персональном компьютере, так и в полевых условиях, на ноутбуке.

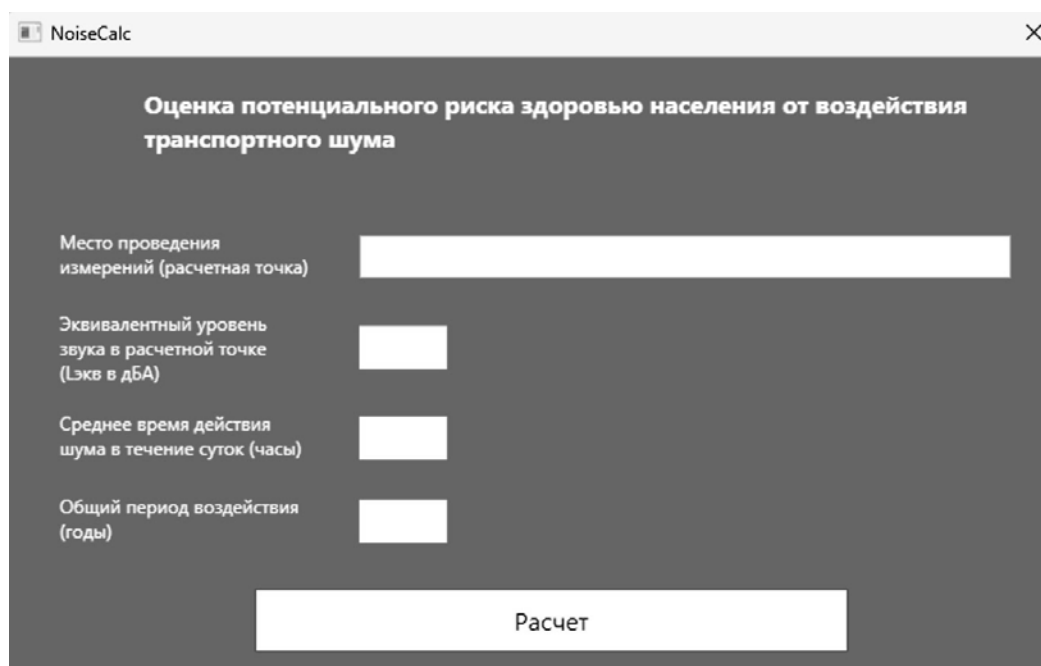


Рис. 3. Заглавный экран приложения

Использование приложения в рабочих, полевых, условиях предоставляет возможность произвести расчет сразу после измерения уровня шума в различном частотном диапазоне. Его мобильность позволяет быстро рассчитать большой объем данных, что увеличивает его полезность и область применения.

Программная часть приложения написана на актуальном в наше время языке программирования С#, соответственно, в будущем программу можно будет дорабатывать и оптимизировать под текущие потребности.

На рис. 3 и 4 представлен интерфейс приложения, интуитивно понятный сотруднику, проводящему измерения шумовой загрязненности.



Рис. 4. Пример сформированного отчета

Заключение

Была проделана работа по замеру шума в различном частотном диапазоне, составлена база данных и написано итоговое приложение для оценки рисков. Программный комплекс прошел государственную регистрацию программы для ЭВМ и получил свидетельство № 2023682445 (правообладатель ФГБОУ ВО Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

Благодарности

Настоящая статья опубликована при поддержке Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» инициативных научных работ, выполняемых студенческими научными коллективами.

Библиографический список

1. Копытенкова О. И., Леванчук А. В., Еремин Г. Б. Гигиеническая характеристика воздушного бассейна в районе интенсивной эксплуатации дорожно-автомобильного комплекса // Гигиена и санитария. 2019. 98 (6). С. 613–618. DOI: 10.47470/0016-9900-2019-98-6-613-618.
2. Garg N. Effects of Noise on Health // Environmental Noise Control. Springer, Cham. 2022. P. 397–445. DOI: 10.1007/978-3-030-87828-3_9.
3. Park J., Chung S., Lee J., et al. Noise sensitivity rather than noise level predicts the non-auditory effects of noise in community samples: a population-based survey // BMC Public Health. 2017. Apr 12 17(1). P. 315. DOI: 10.1186/s12889-017-4244-5.
4. Weuve J., D'Souza J., Beck T., et al. Long-term community noise exposure in relation to dementia, cognition, and cognitive decline in older adults // Alzheimers Dement. 2021. Mar. 17 (3). P. 525–533. DOI: 10.1002/alz.12191.

5. Semeikin A. Yu. Risk Assessment for Public Health from Transportation Noise (on the example of the city of Belgorod) // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. 115 (2018). P. 012–019. DOI: 10.1088/1755-1315/115/1/012019
6. Копытенкова О. И., Афанасьева Т. А., Бурнашов Л. Б. и др. Гигиеническая оценка мер снижения сверхнормативного акустического воздействия на жилые территории // Гигиена и санитария. 2019. 98 (6). С. 671–676. DOI: 10.47470/0016-9900-2019-98-6-671-676.
7. Леванчук А. В., Копытенкова О. И., Афанасьева Т. А. Гигиеническое обоснование методов снижения акустической нагрузки в жилых помещениях // Здоровье населения и среда обитания. 2020. № 10. С. 46–51. DOI: 10.35627/2219-5238/2020-331-10-46-51.
8. Копытенкова О. И., Леванчук А. В., Рябец В. В. Гигиенические аспекты оценки процесса формирования комфортной городской среды // Гигиена и санитария. 2020. № 99 (6). С. 551–556. DOI: 10.47470/0016-9900-2020-99-6-551-556.
9. Kopytenkova O., Ryabets V., Kopytenkova O. Al Saud Saleh Yacoub Comparative Analysis of Methods for Assessing the Environmental Security of Territories // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia. 2021. Vol. 2. Springer Nature, 2022. P. 1523–1531. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_170.
10. Kalinichenko E. A., Pirumova I. V., Akhtyamov R. G., et al. Comparative Analysis of Noise Reduction Methods in Car Braking Process on Classification Hump Yards // Transportation Research Procedia. 2022. № 12. Irkutsk, Krasnoyarsk. P. 526–531. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.01.085.
11. Hahad O., Prochaska J. H., Daiber A. et al. Environmental noise-induced effects on stress hormones, oxidative stress, and vascular dysfunction: key factors in the relationship between cerebrocardiovascular and psychological disorders // Oxid Med Cell Longev. 2019. DOI: 10.1155/2019/4623109.
12. Fink D., Mayes J. Too loud non-occupational noise exposure causes hearing loss // Proc Mtgs Acoust. 2021. Vol. 43, iss. 1. P. 04000 DOI: 10.1121/2.0001436.
13. Raska A. Best practices for the assessment of the public health effects of noise from proposed development projects // University of British Columbia. 2018. DOI: 10.14288/1.0365774.
- Дата поступления: 18.03.2024
Решение о публикации: 30.05.2024
- Контактная информация:**
ФЕСАК Данил Ильич — студент; danilfesak@gmail.com
ДАВЫДОВ Никита Васильевич — студент; nikitadavydov919@gmail.com
КОЛОБОВ Дмитрий Алексеевич. — студент; blackpirramida@gmail.com
ФЕДОСЕЕНКО Анастасия Алексеевна — канд. хим. наук, доцент; aa.fedoseenko@mail.ru

A software package for differential assessment of the public health risk from exposure to noise from rail and road transport

D. I. Fesak, N. V. Davydov, D. A. Kolobov, A. A. Fedoseenko

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

For citation: Fesak D. I., Davydov N. V., Kolobov D. A., Fedoseenko A. A. A software package for differential assessment of the public health risk from exposure to noise from rail and road transport // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 470–479. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-470-479

Abstract

Objective: in the modern world, the number of vehicles on the roads is growing exponentially, and the infrastructure either remains unchanged or is changing, but it is not happening as fast as we would like [1]. Long-term effects of noise exposure, such as disorders of the cardiovascular system (high blood pressure, myocardial infarction, coronary heart disease, etc.), the nervous system (sleep disorder, cognitive impairment, vegetative vascular dystonia), diseases of the ear and mastoid process (conductive and sensorineural hearing loss), depression and other mental disorders [2, 3, 4], are more related to indicators that sum up the noise exposure over a long time. Both when conducting tests by accredited specialists and when choosing housing for buyers, you have to rely on an analytical or practical way to assess the noise pollution of a room. In order to provide a person with a simple and objective way to assess noise pollution, a software package has been developed that allows assessing the impact of noise pollution from transport on public health. **Methods:** quantitative risk assessment was carried out in accordance with the methodological recommendations of MP 2.1.10.0059-12 “Assessment of public health risk from exposure to traffic noise”. **Results:** in order to automate calculations, unify the evaluation of results and reduce time costs, the authors propose a software package for differential assessment of public health risks from exposure to rail and road transport. The end product is a user-friendly, cross-platform application for operational risk assessment in the field for employees of test centers who measure noise from known sources of automobile, railway or combined traffic flows. **Practical importance:** convenience and optimization of risk processing by noise measurements by employees of noise measurement laboratories using the application.

Keywords: noise, noise pollution, disease risks, ecology, health protection.

References

1. Kopy'tenkova O. I., Levanchuk A. V., Eremin G. B. Gigienicheskaya xarakteristika vozdušnogo bassejna v rajone intensivnoj e'kspluatacii dorozhno-avtomobil'nogo kompleksa // *Gigiena i sanitariya*. 2019. 98 (6). S. 613–618. DOI: 10.47470/0016-9900-2019-98-6-613-618. (In Russian)
2. Garg N. Effects of Noise on Health // *Environmental Noise Control*. Springer, Cham. 2022. P. 397–445. DOI: 10.1007/978-3-030-87828-3_9.
3. Park J., Chung S., Lee J., et al. Noise sensitivity rather than noise level predicts the non-auditory effects of noise in community samples: a population-based survey // *BMC Public Health*. 2017. Apr 12 17(1). P. 315. DOI: 10.1186/s12889-017-4244-5.
4. Weuve J., D'Souza J., Beck T., et al. Long-term community noise exposure in relation to dementia, cognition, and cognitive decline in older adults // *Alzheimers Dement*. 2021. Mar. 17 (3). P. 525–533. DOI: 10.1002/alz.12191.

5. Semyekin A. Yu. Risk Assessment for Public Health from Transportation Noise (on the example of the city of Belgorod) // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. 115 (2018). P. 012–019. DOI: 10.1088/1755-1315/115/1/012019.
6. Kopytenkova O. I., Afanas'eva T. A., Burnashov L. B. i dr. Gigienicheskaja ocenka mer snizhenija sverhnormativnogo akusticheskogo vozdejstviya na zhilye territorii // Gigiena i sanitarija. 2019. 98 (6). S. 671–676. DOI: 10.47470/0016-9900-2019-98-6-671-676. (In Russian)
7. Levanchuk A. V., Kopytenkova O. I., Afanas'eva T. A. Gigienicheskoe obosnovanie metodov snizhenija akusticheskoy nagruzki v zhilyh pomeshhenijah // Zdorov'e naselenija i sreda obitanija. 2020. № 10. S. 46–51. DOI: 10.35627/2219-5238/2020-331-10-46-51. (In Russian)
8. Kopytenkova O. I., Levanchuk A. V., Rjabec V. V. Gigienicheskie aspekty ocenki processa formirovaniya komfortnoj gorodskoj sredy // Gigiena i sanitarija. 2020. № 99 (6). S. 551–556. DOI: 10.47470/0016-9900-2020-99-6-551-556. (In Russian)
9. Kopytenkova O., Ryabets V., Kopytenkova O. Al Saud Saleh Yacoub Comparative Analysis of Methods for Assessing the Environmental Security of Territories // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia. 2021. Vol. 2. Springer Nature, 2022. P. 1523–1531. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_170.
10. Kalinichenko E. A., Pirumova I. V., Akhtyamov R. G., et al. Comparative Analysis of Noise Reduction Methods in Car Braking Process on Classification Hump Yards // Transportation Research Procedia. 2022. № 12. Irkutsk, Krasnoyarsk. P. 526–531. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.01.085.
11. Hahad O., Prochaska J. H., Daiber A. et al. Environmental noise-induced effects on stress hormones, oxidative stress, and vascular dysfunction: key factors in the relationship between cerebrocardiovascular and psychological disorders // Oxid Med Cell Longev. 2019. DOI: 10.1155/2019/4623109.
12. Fink D., Mayes J. Too loud non-occupational noise exposure causes hearing loss // Proc Mtgs Acoust. 2021. Vol. 43, iss. 1. P. 04000. DOI: 10.1121/2.0001436.
13. Raska A. Best practices for the assessment of the public health effects of noise from proposed development projects // University of British Columbia. 2018. DOI: 10.14288/1.0365774.

Received: 18.03.2024

Accepted: 30.05.2024

Author's information:

Danil I. FESAK — student;

danilfesak@gmail.com

Nikita V. DAVYDOV — student;

nikitadavydov919@gmail.com

Dmitrij A. KOLOBOV — student;

blackpirramida@gmail.com

Anastasiya A. FEDOSEENKO — PhD, Associate

Professor; aa.fedoseenko@mail.ru

УДК 625.71.8

Оценка ущерба, наносимого загрязняющими веществами от выхлопных газов транспортных средств при реконструкции автомобильной дороги

А. Ф. Колос, В. А. Черняева, О. В. Максимов

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

Для цитирования: Колос А. Ф., Черняева В. А., Максимов О. В. Оценка ущерба, наносимого загрязняющими веществами от выхлопных газов транспортных средств при реконструкции автомобильной дороги // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 480–488. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-480-488

Аннотация

Цель: оценка наносимого ущерба загрязняющими веществами от выхлопных газов транспортных средств при строительстве автомобильных дорог. Земляное полотно — один из важнейших элементов конструкции автомобильной дороги, представленный в виде массива грунта и воспринимающий статические и динамические нагрузки от транспортных средств. Рост интенсивности автомобильных перевозок негативно влияет на окружающую среду. Недостатки организации дорожного движения, в том числе при проведении ремонтных работ, приводят к экологическим ущербам. Объем выбросов вредных веществ определяется пробегом автомобилей, зависит от различных факторов и связан с общим расходом топлива. Актуальной является задача дополнения Методических рекомендаций по выбору рациональных конструкций земляного полотна и их технико-экономическому обоснованию показателем, учитывающим загрязнение окружающей среды, в том числе выбросами парниковых газов за время простоя автомобилей в заторах при реконструкции или капитальном (текущем) ремонте автомобильных дорог, как это требуется в соответствии с [1]. **Методы:** предложена методика расчета ущерба, наносимого загрязняющими веществами от выхлопных газов транспортных средств при строительстве (реконструкции, ремонте) автомобильной дороги. **Результаты:** произведена оценка ущерба, наносимого загрязняющими веществами от выхлопных газов транспортных средств при реконструкции автомобильной дороги при рассмотрении нескольких вариантов конструктивных решений земляного полотна, возводимого на слабых грунтах. **Практическая значимость:** расчеты могут быть включены в основу практических рекомендаций по технико-экономическому обоснованию конструктивных решений земляного полотна автомобильных дорог на слабых основаниях.

Ключевые слова: автомобильная дорога, земляное полотно, технико-экономическое обоснование, загрязняющее вещество, реконструкция, капитальные затраты, эксплуатационные затраты.

Введение

Индивидуальное проектирование земляного полотна в соответствии с действующими нормативно-техническими документами является случаем, когда необходимо обоснование принятых конструктивных, технологических и организационных решений. Частичная или полная замена грунта слабого естественного основа-

ния, осушение болот, устройство вертикальных свай-дрен, устройство легких и облегченных насыпей, использование различных геосинтетических материалов и многие другие методы требуют расчетного обоснования по предельным состояниям, а также соответствующего технико-экономического сравнения [1].

В данный момент обоснование принятых конструктивных, технологических и организационных решений при проектировании конструкций земляного полотна автомобильных дорог проводят на основании разработанной и утвержденной методики, изложенной в [3]. Методология данного документа может быть применена к другим случаям, в которых необходимо проведение технико-экономического обоснования. Все сравниваемые конструктивные решения должны соответствовать требованиям [2] в части обеспечения безопасного и бесперебойного движения транспортных средств. За критерий экономического сравнения принимают минимальное значение затрат на сооружение и эксплуатацию земляного полотна. Дополнительно учитываются социально-экономические потери и эффекты пользователей инфраструктуры и других заинтересованных сторон.

Учет загрязнения окружающей среды при обосновании проектных решений

Необходимо отметить, что в соответствии с требованиями [2] при разработке проектных решений необходимо предусматривать сокращение загрязнения окружающей среды, в частности, за счет сокращения выбросов парниковых газов и снижения вынужденного простоя автомобилей в заторах.

В действующем отраслевом методическом документе [3] не предусмотрена методика расчета ущерба, наносимого пользователям автомобильной дороги или другим заинтересованным сторонам от воздействия выбросов парниковых газов за период строительства, реконструкции автомобильной дороги или проведения других ремонтных работ.

Разработка методики расчета экономической оценки выбросов парниковых газов

при проектировании автомобильных дорог является актуальным направлением развития отраслевых методических документов в области технико-экономического обоснования подходов к проектированию земляного полотна [4].

Предлагается следующая методика расчета:

1. Определение дополнительного времени движения транспортного потока с учетом количества дней проведения работ и количества захваток для конструкции земляного полотна (1):

$$t_{\text{доп}} = t_{\text{пер.}} - t_{\text{св.}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{доп}}$ — дополнительное время движения транспортного потока, с;

$t_{\text{пер.}}$ — время движения транспортного потока при перекрытии полосы;

$t_{\text{св.}}$ — время движения транспортного потока при свободном движении.

2. Расчет выбросов загрязняющих веществ от движущегося автотранспорта.

В соответствии с [4] выброс i -го загрязняющего вещества, г/с, движущимся потоком автотранспортных средств на автомобильной дороге (или ее участке) фиксированной протяженности L км вычисляют по формуле (2):

$$M_{Li} = \frac{0,2}{1200 \sum_1^k M_{k,i}^L} \cdot G_k \cdot r_{V_{k,i}}, \quad (2)$$

где L — протяженность автомобильной дороги (или ее участка), км;

$M_{k,i}$ — удельный пробеговый выброс i -го загрязняющего вещества автомобилями k -й группы, г/км;

k — число групп автомобилей;

G_k — фактическая наибольшая интенсивность движения;

$r_{vk,i}$ — поправочный коэффициент, учитывающий среднюю скорость движения потока автотранспортных средств на выбранной автомобильной дороге (или ее участке).

3. Расчет ущерба, наносимого загрязняющими веществами от выхлопных газов транспортных средств при строительстве (реконструкции, ремонте) автомобильной дороги в денежном эквиваленте по формуле (3):

$$Y_{з.в.} = t_{\text{доп}} \cdot M_{Li} \cdot C_{\text{у.е.}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{доп}}$ — дополнительное время движения транспортного потока, с;

M_{Li} — выброс i -го загрязняющего вещества, г/с;

$C_{\text{у.е.}}$ — условная единица, выражающая размер ущерба, наносимого окружающей среде различными компонентами автомобильных выбросов, руб.

Расчет экономической оценки выбросов парниковых газов

Для примера рассмотрим насыпи на слабых основаниях:

I вариант — свайное основание, безосадочное;

II вариант — облегченная насыпь из пенополистирольных блоков.

Протяженность автомобильной дороги — 1 км.

Количество полос движения — 4.

Срок строительства земляного полотна

I вариант — 6 месяцев;

II вариант — 4 месяца.

Проводимые мероприятия — реконструкция с перекрытием одной полосы движения на протяжении 200 м на первой захватке, по окончании работ — переход на вторую захватку и далее.

После окончания производства работ на одной полосе осуществляется переход на вторую полосу и проводятся такие же мероприятия.

Реконструкция осуществляется за счет уширения проезжей части автомобильной дороги с 4 до 6 полос движения.

Средняя скорость движения на свободном участке — 80 км/ч.

Средняя скорость движения на участке производства работ — 40 км/ч.

Тогда в соответствии с [2, 4] дополнительное время движения транспортного потока при производстве работ на всем протяжении с учетом сроков производства работ составит:

— для конструкции земляного полотна в виде облегченной насыпи — 17,08 часа;

— для конструкции земляного полотна в виде свайного основания — 25,62 часа.

Выброс i -го загрязняющего вещества M_{Li} , г/с, движущимся потоком автотранспортных средств на автомобильной дороге (или ее участке) составит (табл. 1):

ТАБЛИЦА 1. Количество выделяемых вредных веществ

При скорости 40 км/ч, г/с			При скорости 80 км/ч, г/с		
CO	NO (в пересчете на NO ₂)	SO ₂	CO	NO (в пересчете на NO ₂)	SO ₂
1,14	0,42	0,008	0,76	0,28	0,006

В Финляндии и Швеции разработана условная единица, которая выражает размер причиненного окружающей среде вреда

вследствие выброса автомобилями загрязняющих веществ. Ниже произведен расчет стоимости нанесенного вреда (при переводе

финских марок в российские рубли) окружающей среде вследствие выброса в воздух 1 кг загрязняющих веществ. За 122 дня

производства работ при устройстве облегченной насыпи выбросы загрязняющих веществ и ущерб от них составят (табл. 2):

ТАБЛИЦА 2. Экономическая оценка конструктивных решений

Свайное основание, безосадочное, млн руб.			Облегченная насыпь из пенополистирольных блоков, млн руб.		
По ОДМ 218.2.067-2016	Ущерб загрязняющими веществами	Итого	По ОДМ 218.2.067-2016	Ущерб загрязняющими веществами	Итого
269,5	133,0	402,5	1170,6	88,7	1259,3

Доля ущерба загрязняющими веществами в общих затратах составила (рис. 1):

— свайное основание, безосадочное — 33 %;

— облегченная насыпь из пенополистирольных блоков — 7 %.



Рис. 1. Доля ущерба загрязняющими веществами в общих затратах

Факторы, влияющие на размер ущерба, наносимого окружающей среде автомобильным транспортом при проведении строительного-монтажных работ

При сопоставимых капитальных затратах на строительство земляного полотна оценка ущерба загрязняющими веществами может иметь решающее значение при выборе конструктивного решения. Следовательно, необходимо рассмотреть факторы, которые позволят управлять (планировать, проводить мониторинг, анализировать, оптимизировать) объемом выделяемых вредных веществ в процессе выполнения строительного-монтажных работ.

Количество выделяемых вредных веществ зависит от пробега транспортных средств, который, в свою очередь, зависит от веса отдельного автомобиля, скорости, режима и условий движения, характеристик двигателя, состояния, в котором он находится, напрямую зависящего от расхода топлива.

В частности, загрязнение воздуха от автотранспорта возникает по следующим причинам:

— неудовлетворительное состояние технического обслуживания транспортного средства;

- низкое качество используемого топлива;
- наличие в бензине свинцовых добавок;
- недостаточное развитие системы управления транспортными потоками;
- год выпуска транспортного средства;
- экологический класс транспортного средства;
- экологический класс мотора.

Увеличение срока производства строительно-монтажных работ усугубляет негативное воздействие на окружающую среду от перечисленных выше факторов. На рис. 2–6 приведены графики, которые иллюстрируют влияние срока производства работ, дополнительного времени в пути при различных конструктивных решениях земляного полотна, скорости движения транспортного потока

на размер ущерба, наносимого окружающей среде автомобильным транспортом при проведении строительно-монтажных работ.

Проведенные расчеты показывают, что выбор в пользу облегченной насыпи позволяет снизить время в пути, связанное со снижением скорости и другими ограничениями в период производства работ в рамках реконструкции или ремонтов более чем на 30 %. С увеличением срока строительства скорость движения потока становится более весомым фактором. При одной и той же скорости, например 40 км/ч, затраченное время пользователей в пути по ремонтируемому участку составит для случая с облегченной насыпью ≈ 1500 мин., для случая со свайным основанием — более 2200 мин.

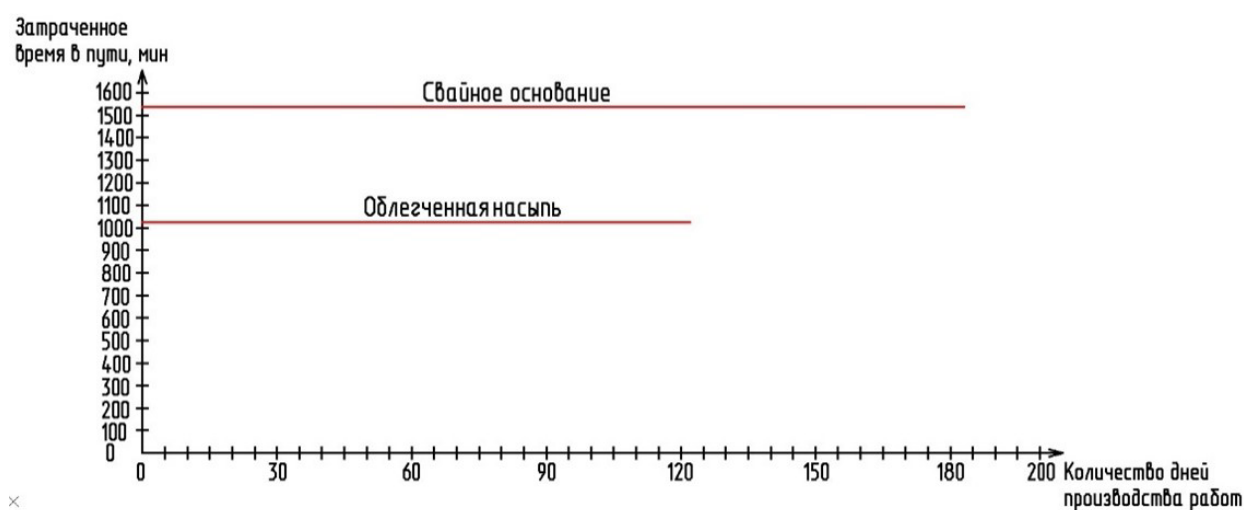


Рис. 2. График зависимости дополнительного времени движения транспортного потока от сроков производства работ

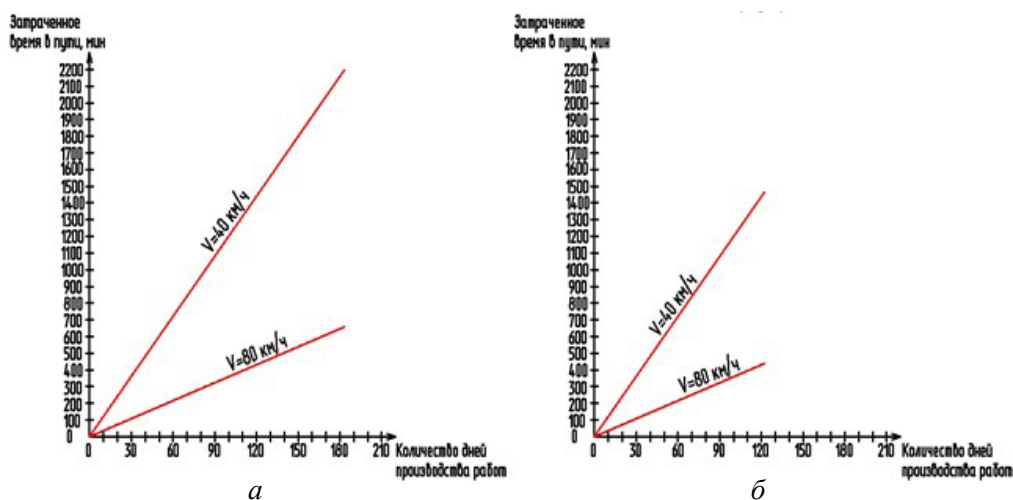


Рис. 3. График зависимости затраченного времени в пути от скорости движения потока при различных конструктивных решениях: *а* – облегченная насыпь; *б* – свайное основание

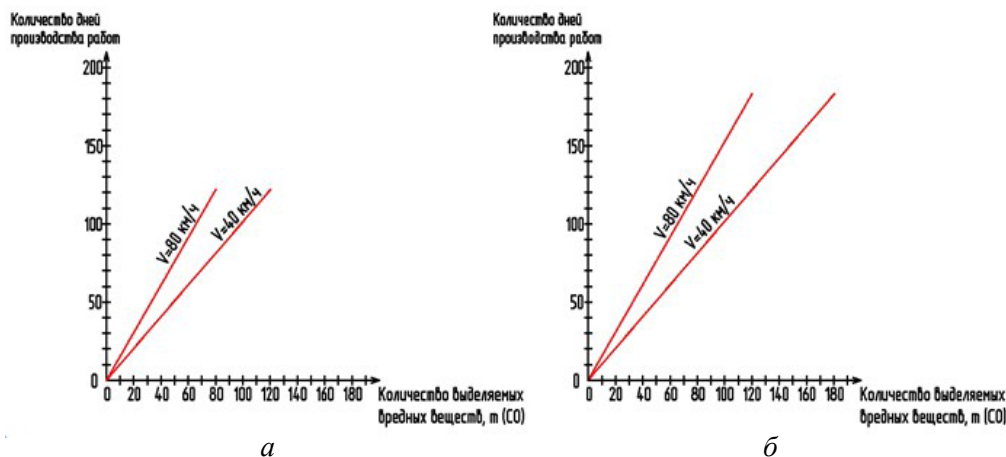


Рис. 4. График зависимости выброса вредных веществ в виде CO₂ от количества дней производства работ при различных конструктивных решениях: *а* – облегченная насыпь; *б* – свайное основание

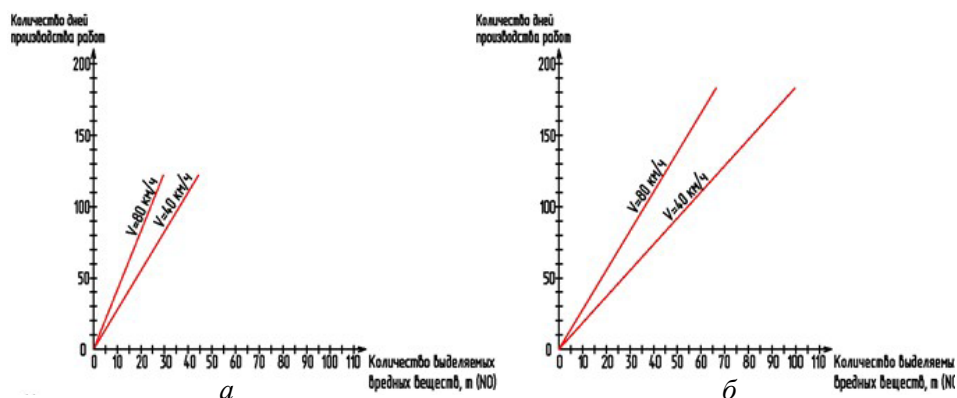


Рис. 5. График зависимости выброса вредных веществ в виде NO от количества дней производства работ при различных конструктивных решениях: *а* – облегченная насыпь; *б* – свайное основание

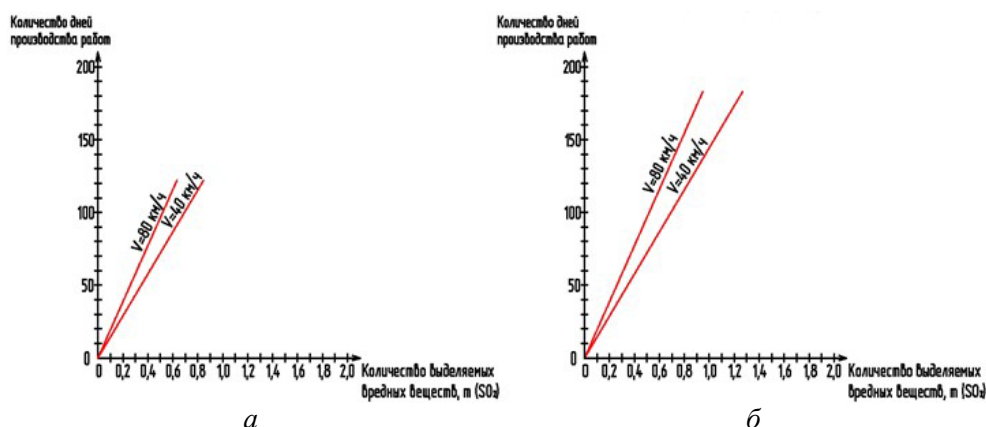


Рис. 6. График зависимости выброса вредных веществ в виде SO_2 от количества дней производства работ при различных конструктивных решениях:
a – облегченная насыпь; *б* – свайное основание

Заключение

Приведенные в статье исследования и расчеты позволяют сделать следующие выводы.

Внедрение методики расчета экономической оценки выбросов парниковых газов при проектировании автомобильных дорог является одним из актуальных направлений развития отраслевых методических документов в области технико-экономического обоснования подходов к проектированию земляного полотна с целью обеспечения требований [2].

Основными факторами, влияющими на размер ущерба, наносимого окружающей среде автомобильным транспортом при строительстве или реконструкции его инфраструктуры, являются:

- затрата дополнительного времени движения транспортного потока при сооружении земляного полотна;
- срок производства работ;
- скорость движения транспортного потока;
- тип транспортного средства.

При производстве работ снижается скорость автомобильного потока, следовательно, выделяется большее количество вредных веществ.

Сравнение двух вариантов конструктивных решений земляного полотна в части оценки ущерба, наносимого окружающей среде, показало, что наименьший ущерб оказывает конструкция с меньшим сроком строительства (для рассмотренного случая — облегченная насыпь из пенополистирольных блоков).

Доля ущерба загрязняющими веществами в общих затратах составила:

- для свайного основания, безосадочного — 33 %;
- для облегченной насыпи из пенополистирольных блоков — 7 %.

При сопоставимых капитальных затратах на строительство земляного полотна оценка ущерба загрязняющими веществами может иметь решающее значение при выборе конструктивного решения.

Библиографический список

1. Колос А. Ф., Ганчиц В. В., Черняева В. А. Новые принципы и подходы планирования организации транспортного строительства // Транспортное строительство. 2017. № 1. С. 6–9.
2. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 014/2011 «Безопасность автомобильных дорог».

3. ОДМ 218.2.067-2016 «Методические рекомендации по выбору рациональных конструкций земляного полотна на слабых основаниях и их технико-экономическому обоснованию».
4. ГОСТ Р 56162-2019 «Метод расчета количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу потоками автотранспортных средств на автомобильных дорогах разной категории».
5. Седюкевич В. Н., Капский Д. В. Исследования экологичности автомобильных перевозок.
6. Трофименко Ю. В. Оценка сокращения выбросов парниковых газов от автомобильного транспорта — показатель эффективности проектов транспортного планирования.
7. Шмаль А. Г. Факторы экологической опасности & экологические риски. Бронницы: МП «ИКЦ БНТВ», 2010. 191 с.
8. Сафронов Э. А. Транспортные системы городов и регионов. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2005. 266 с.
9. Вукан Р. Вучик. Транспорт в городах, удобных для жизни. М.: Территория будущего, 2011. 576 с.
10. Суровцева О. Б., Тишкина М. В. Экологическое обоснование проектных решений. М.: Изд-во УМЦ ЖДТ («Маршрут»), 2006.
11. ОДМ 218.6.019-2016 «Рекомендации по организации движения и ограждению мест производства дорожных работ».

Дата поступления: 05.04.2024

Решение о публикации: 13.05.2024

Контактная информация:

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

ЧЕРНЯЕВА Виктория Андреевна — канд. техн. наук, доцент;

chernyaeva@pgups.ru

МАКСИМОВ Олег Владимирович — магистрант; olegmaximov2000@mail.ru

Assessment of damage caused by pollutants from vehicle exhaust gases during highway reconstruction

A. F. Kolos, V. A. Chernyaeva, O. V. Maksimov

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

For citation: Kolos A. F., Chernyaeva V. A., Maksimov O. V. Assessment of damage caused by pollutants from vehicle exhaust gases during highway reconstruction // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 480–488. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-480-488

Abstract

Purpose: assessment of damage caused by pollutants from vehicle exhaust gases during highway construction. The roadbed is one of the most important elements of a highway structure, presented in the form of a mass of soil and receiving static and dynamic loads from vehicles. The increasing intensity of road transport has a negative impact on the environment. The main causes of environmental damage are overloads at intersections, and their effects are delayed in time. For example, when a city highway is laid through an uninhabited area, the damage incurred is less than when the highway passes through densely populated residential areas and is adjacent to urban areas. Poor traffic management leads to environmental damage. The volume of emissions of harmful substances is determined by the mileage of vehicles, depends on various factors and is related to the total fuel consumption. An urgent task is to supplement the Methodological Recommendations for the selection of rational roadbed structures and their feasibility study with an indicator that takes into account environmental pollution, including greenhouse gas emissions,

sions, during vehicle downtime in traffic jams during reconstruction or major (current) repairs of highways, such as this is required in accordance with [1]. **Methods:** Taking as a basis the existing methodological recommendations for the selection of rational subgrade structures on weak foundations and their feasibility study [2], calculations were made on the basis of which it is possible to draw a conclusion about the amount of exhaust gases emitted by reducing the flow rate during activities for the reconstruction of the highway. The main concept underlying the methodological document is the optimization of design solutions based on their comprehensive technical and economic assessment, carried out in terms of capital and operating costs, significant socio-economic effects and the duration of the construction period. **Results:** a feasibility study and a technical and economic comparison of design solutions for the reconstruction of the highway were carried out in terms of widening the roadbed built on soft soils. **Practical significance:** Calculations are included in the basis of practical recommendations for the use of design solutions for the construction of roadbeds on soft soils, which gives a clear idea of the technical and economic feasibility of their use in various operating conditions.

Keywords: highway, roadbed, feasibility study, pollutant, reconstruction, capital costs, operating costs.

References

1. Kolos A. F., Ganchicz V. V., Chernyaeva V. A. *Novy`e principy` i podxody` planirovaniya organizacii transportnogo stroitel`stva // Transportnoe stroitel`stvo*. 2017. № 1. S. 6–9. (In Russian)
2. *Texnicheskij reglament Tamozhennogo soyuza TR TS 014/2011 “Bezopasnost` avtomobil`ny`x dorog”*.
3. ODM 218.2.067-2016 “Metodicheskie rekomendacii po vy`boru racional`ny`x konstrukcij zemlyanogo polotna na slaby`x osnovaniyax i ix tekhnicheskomy` ekonomicheskomu obosnovaniyu”. (In Russian)
4. GOST R 56162-2019 “Metod rascheta kolichestva vy`brosov zagryaznyayushhix veshhestv v atmosferu potokami avtotransportny`x sredstv na avtomobil`ny`x dorogax raznoj kategorii”. (In Russian)
5. Sedyukevich V. N., Kapskij D. V. *Issledovaniya e`kologichnosti avtomobil`ny`x perevozok*. (In Russian)
6. Trofimenko Yu. V. *Ocenka sokrashheniya vy`brosov parnikovyx gazov ot avtomobil`nogo transporta — pokazatel` e`ffektivnosti proektov transportnogo planirovaniya*. (In Russian)
7. Shmal` A. G. *Faktoiry` e`kologicheskoy opasnosti & e`kologicheskie riski*. Bronnicy: MP “IKCz BNTV”, 2010. 191 s. (In Russian)
8. Safronov E`. A. *Transportny`e sistemy` gorodov i regionov*. M.: Izd-vo Associacii stroitel`ny`x vuzov, 2005. 266 s. (In Russian)
9. Vukan R. Vuchik. *Transport v gorodax, udobny`x dlya zhizni*. M.: Territoriya budushhego, 2011. 576 s.
10. Surovceva O. B., Tishkina M. V. *E`kologicheskoe obosnovanie proektny`x reshenij*. M.: Izd-vo UMCz ZhDT (“Marshrut”), 2006. (In Russian)
11. ODM 218.6.019-2016 “Rekomendacii po organizacii dvizheniya i ograzhdeniyu mest proizvodstva dorozhny`x rabot”. (In Russian)

Received: 05.04.2024

Accepted: 13.05.2024

Author’s information:

Alexey F. KOLOS — PhD tech. Sciences,
Associate Professor;
kolos2004@inbox.ru
Victoria A. CHERNYAEVA — PhD tech. Sciences,
Associate Professor;
chernyaeva@pgups.ru
Oleg V. MAKSIMOV — master’s student;
olegmaximov2000@mail.ru

УДК 624.15

Об элементных фундаментах опор высоковольтных линий

В. Е. Козловский, И. М. Смирнов

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

Для цитирования: Козловский В. Е., Смирнов И. М. Об элементных фундаментах опор высоковольтных линий // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 489–497. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-489-497

Аннотация

Цель: обосновать возможность применения фундаментов опор высоковольтных линий в виде рассредоточенных горизонтальных элементов, объединенных в единую конструкцию для восприятия знакопеременной нагрузки. Определить экспериментальным и расчетным методами эффект от взаимного смещения элементов в виде повышения несущей способности фундаментов и снижения их деформаций при воздействии вдавливающих и выдергивающих нагрузок. Показать возможность замены плитных фундаментов опор высоковольтных линий конструкциями из сборных элементов для снижения объема и веса перевозимых с завода изделий. **Методы:** применение фотограмметрического метода муаров для оценки развития зон уплотнения грунтов и угловых деформаций грунтового основания в лотке со стеклянной стенкой под моделями плитного и элементного фундаментов. Использование метода граничных интегральных уравнений для получения зависимости осадок от шага элементов для гибкого и жесткого фундаментов. **Результаты:** проиллюстрирован эффект взаимного влияния элементов фундамента при их сближении и рассредоточении в виде изменения напряженно-деформированного состояния в их основании. Выявлены различия в глубинах распространения зон уплотнения и областей развития угловых деформаций. Получены количественные данные по осадкам плитных и элементных фундаментов и влияние на них глубины залегания кровли прочного подстилающего слоя. Представлены графические зависимости связи осадок элементов с дистанцией (шагом) между ними. Показано влияние членения фундамента на скорость угасания краевых касательных напряжений в основании. Произведена иллюстрация увеличения объема и площади поверхности тела выпирания элементного фундамента, приводящего к увеличению его несущей способности по сравнению с плитным при расчете на выдергивание. **Практическая значимость:** показана эффективность применения элементного фундамента по сравнению с плитным вариантом в снижении параметров напряженно-деформированного состояния основания и облегчении логистических задач при строительстве. Используемые экспериментальная и расчетная методики могут быть рекомендованы для дальнейшего уточнения параметров элементных фундаментов.

Ключевые слова: сборные фундаменты, элементные фундаменты, метод фотограмметрии, метод муаров, метод граничных элементов, напряжения, деформации, осадки.

Введение

Инновации в энергетическом строительстве неразрывно связаны с новыми конструктивными решениями фундаментов опор высоковольтных линий (ВЛ). Эффективность новых конструкций фундаментов определяется снижением нагрузок на основание и экономией материалов при обеспечении эксплуатационной надежности сооружения. Важным также является облегчение логистических задач, снижение затрат на транспортировку крупногабаритных грузов и на использование тяжелой грузоподъемной техники.

В настоящее время широкое применение в качестве фундаментов опор ВЛ имеют железобетонные грибовидные конструкции заводского изготовления, обладающие большими объемом и весом [1]. Имеются технические решения по разделению таких фундаментов на две составляющие: стоечную и плитную части с одним монтажным стыком [2]. Располагаясь в наиболее напряженной части фундамента, стык является «слабым звеном» в конструкции, и надежность ее может оказаться сниженной, что не соответствует требованиям [3, 4]. При этом два стыкуемых элемента остались крупными по массе и объему.

Вопросом, заслуживающим рассмотрения, является замена плитной части фундамента на систему

рассредоточенных горизонтальных элементов, передающих нагрузку на выше либо ниже расположенное грунтовое основание в зависимости от характера работы фундамента (рис. 1).

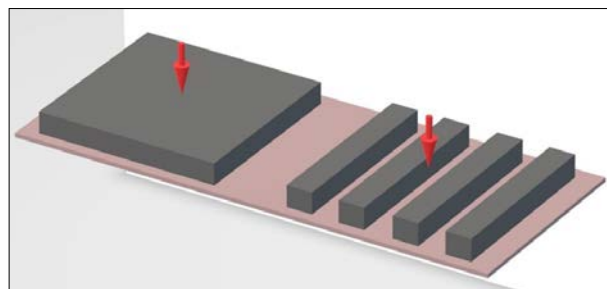


Рис. 1. Плитная и элементная схемы фундаментов

Эффект от членения фундамента на элементы с их взаимной раздвижкой иллюстрируется на рис. 2, на котором изображены участки эпюр влияния давлений от боковых элементов на напряженное состояние грунта под центральным элементом. Эпюры влияния представляют собой убывающие от зоны передачи давления функции.

При рассматривании точки основания под центральным элементом со сближенными (слева) и рассредоточенными (справа) боковыми элементами очевидно различие в ее напряженном состоянии.

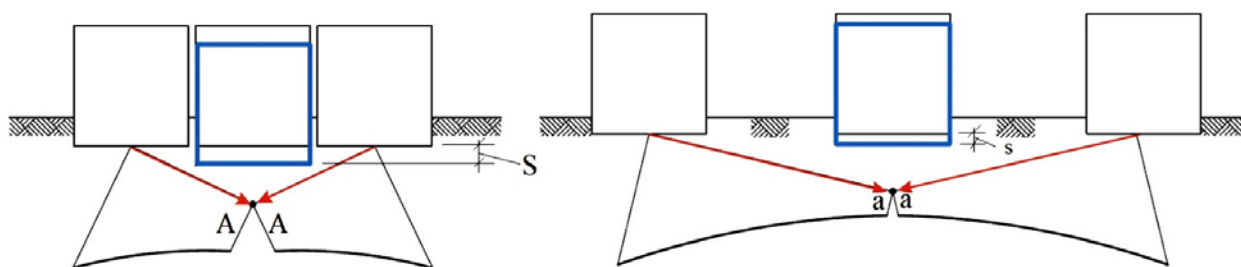


Рис. 2. Иллюстрация влияния раздвижки элементов фундамента на напряженное состояние основания

Суммарное влияние крайних элементов на напряженное состояние исследуемой точки основания под центральным элементом равно $A+A$ при сближенных элементах и $a+a$ при рассредоточенных. Поскольку деформации порождаются напряжениями, можно утверждать, что меньшие напряжения при рассредоточении нагрузок порождают меньшую осадку элементов, чем при их сближении, то есть $s < S$.

Таким образом, предлагается расчленить фундамент и рассмотреть дискретную передачу нагрузки от горизонтальных элементов фундамента на грунт взамен сплошному контакту его с плитой.

Рассмотрены инструментальный и численный способы нагружения поверхности грунтового основания.

Экспериментальная и расчетная реализации задачи

Инструментальный способ предполагает испытание модели грунтового основания и фундамента в лотке со стеклянной стенкой. Замер деформаций производится методом фотограмметрии с использованием оптического муарового эффекта [5]. Он позволяет оценить по естественному растру, создаваемому зернистой структурой грунта, возникающие в грунте угловые деформации с получением остальных (осевых) компонент деформаций.

Одинаковая нагрузка, передаваемая на основание через жесткую плиту и два элемента равной общей площади, приводит к образованию неравных по глубине распространения зон уплотнения (рис. 3). Таким образом, можно утверждать, что размер и глубина развития зон уплотнения при равных нагрузках для элементного фундамента оказывается меньшей, чем для плитного варианта.

Представляет интерес величина центральной вертикальной нагрузки, вызывающая равную осадку плитного и элементного фундаментов. В качестве примера рассмотрены фундамент под опоры ВЛ типа Ф3-А с размером плиты $2,1 \times 2,1$ м [6] и фундамент из 4 горизонтальных элементов сечением $0,35 \times 0,35$ м длиной 2,45 м, расположенных с просветом 0,35 м (рис. 4). Для расчета принят грунт основания с модулем деформации $E = 20$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,35$. Фундаментам задана равная вертикальная осадка 3 см.

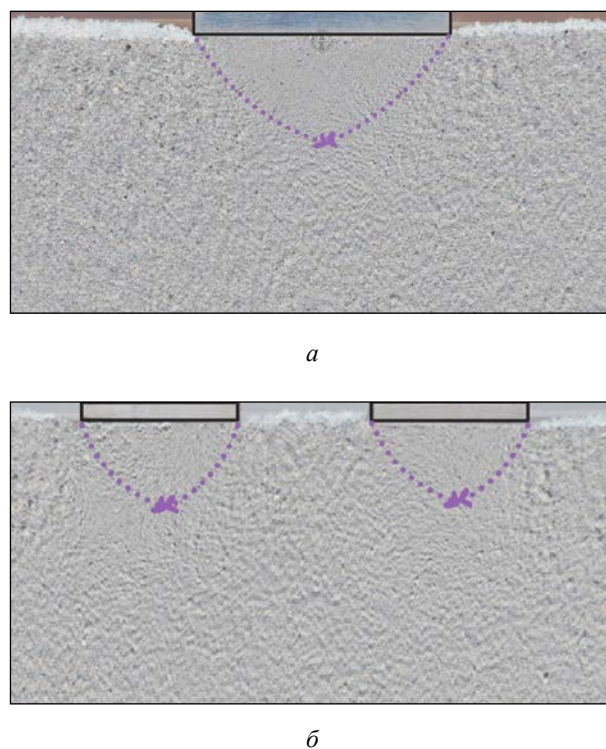


Рис. 3. Зоны уплотнения основания в моделях плитного (а) и элементного (б) фундаментов

Требуемая вертикальная нагрузка при заданной равной осадке обоих фундаментов различна и определяется нахождением площади под графиками контактных давлений.

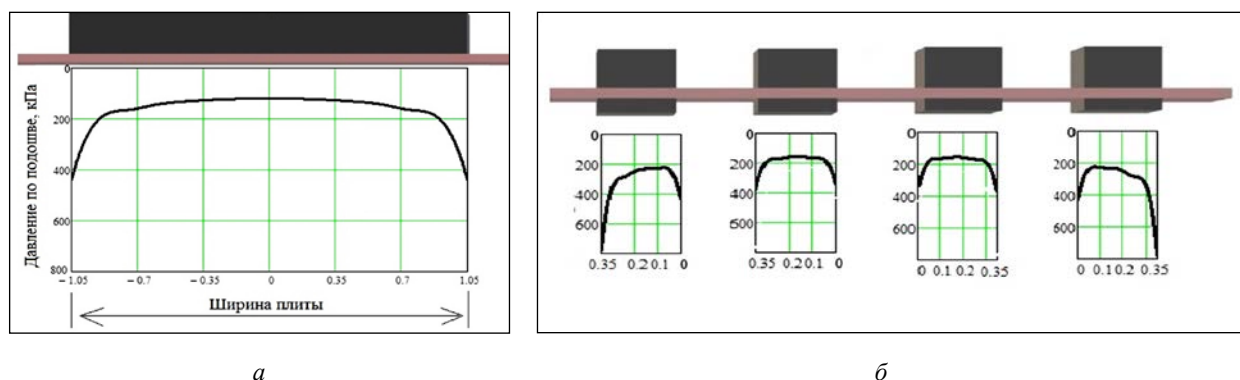


Рис. 4. Контактные давления по подошве плитного (а) и элементного (б) фундаментов при задании равной осадки

Для принятых условий усилие вдавливания для плитного фундамента равно 80 тс, для элементного 97 тс. Таким образом, рассредоточение на грунте опорных элементов привело при заданной осадке к возрастанию несущей способности фундамента.

Наличие в грунтовом массиве скального подстилающего слоя на глубине 5 м от подошвы фундаментов повышает требуемое усилие вдавливания при заданной осадке 3 см для плитного и элементного фундаментов соответственно до 126 тс и 157 тс. Это означает, что снижение мощности сжимаемого слоя увеличивает эффект от рассредоточения элементов.

Результаты вычислений

Произведены расчеты плитных и элементных фундаментов методом граничных элементов [7, 8] при заданных равных осадках элементов и при равных давлениях по подошве. Первый вариант соответствует случаю абсолютно жесткого фундамента, второй — гибкому (по Винклеру). Подошва фундаментов принята шероховатой.

При анализе контактных давлений по подошве фундаментов, вызвавших заданную

осадку, удобно переходить к понятию коэффициента постели C_b , равного отношению давления (кПа) по подошве к возникающей при этом осадке (см).

Рассмотрен случай равной осадки всех элементов с расстоянием в свету d на грунтовом основании с указанными ранее деформативными характеристиками. График на рис. 5 показывает, что при раздвижке четырех балок шириной 0,35 м от $d = 0$, соответствующего их плотному смыканию в жесткую плиту, до дистанции 1 м, приводит к возрастанию коэффициента постели от 80 до 114 кПа/см.

Характерно то, что возрастание несущей способности произошло при одинаковой площади (нетто) опирания плитного и элементных фундаментов на грунт.

Анализ графиков контактных давлений на рис. 4 показывает, что грунтовое основание под крайними элементами является перегруженным по сравнению с плитным вариантом. В этом случае зоны максимальных напряжений под крайними элементами будут «подрезаны» предельными для грунта значениями давлений.

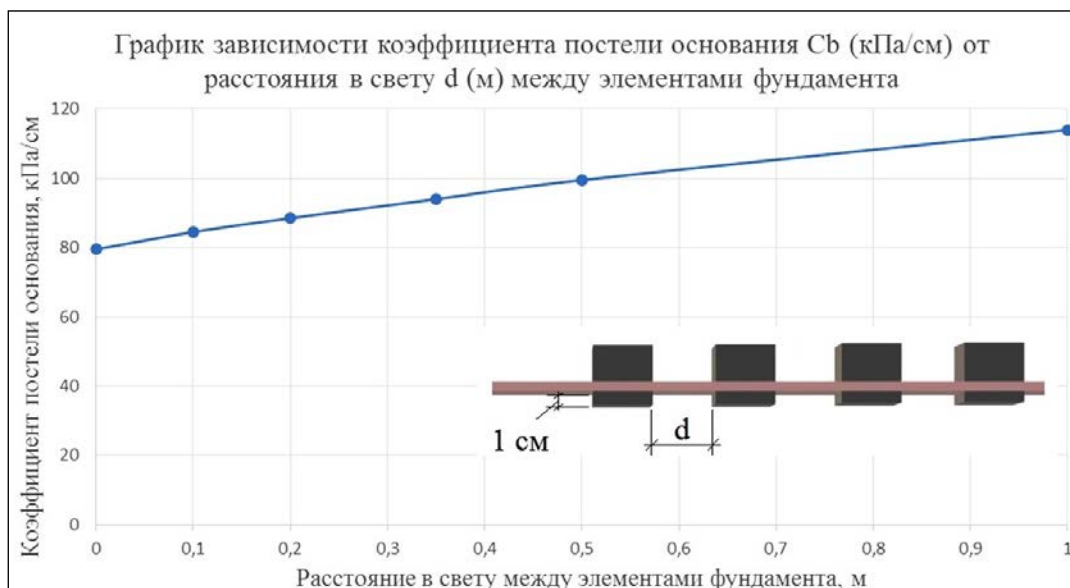


Рис. 5. Зависимость коэффициента постели от дистанции между элементами фундамента при их равной осадке

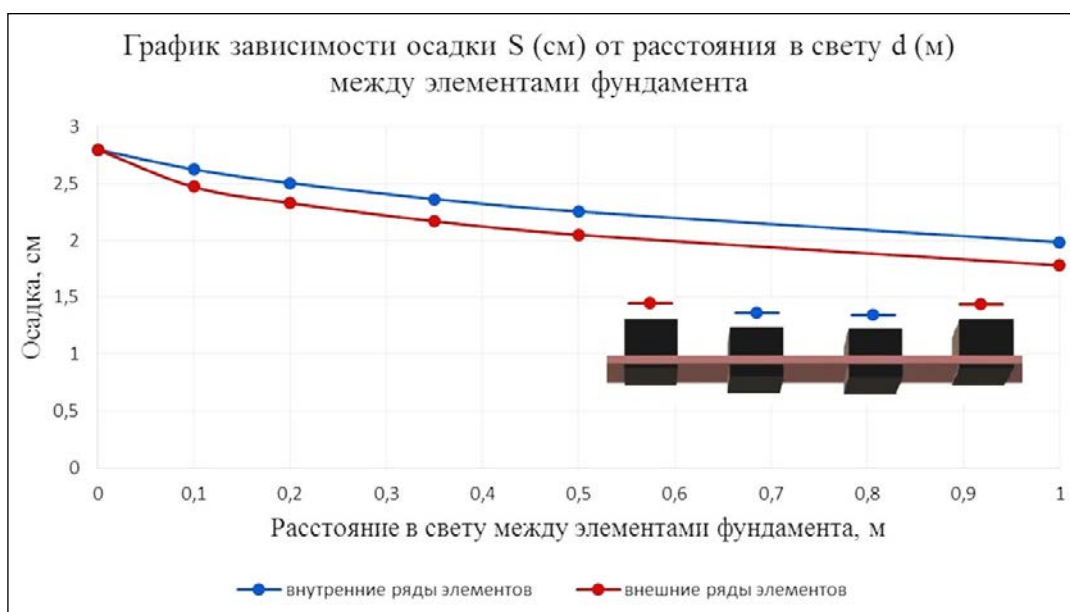


Рис. 6. Зависимость осадки от дистанции между элементами фундамента при равном давлении по подошве

При задании граничных условий в виде постоянных давлений по подошве, равных 200 кПа, максимальная осадка при раздвижке элементов будет снижаться (рис. 6). Внутренние ряды имеют осад-

ку большую, чем внешние. Осадка при $d = 0$ м соответствует варианту фундамента в виде гибкой плиты, по подошве которой действуют постоянные по величине давления.

Как следует из полученных графических зависимостей, как в случае жесткого, так и в случае гибкого элементного фундамента, прослеживается их преимущество перед плитной конструкцией. В «жестком» случае элементный фундамент имеет больший коэффициент постели, в «гибком» — меньшая осадка элементов в сравнении с плитным вариантом. Характер работы реального фундамента конечной жесткости соответствует промежуточному положению между рассмотренными жестким и гибким случаями.

Рост угловых деформаций в основании происходит в соответствии с ростом касательных напряжений (рис. 7, а), величины которых получены исходя из двух условий

нагружения (граничных условий): постоянства по подошве осадок или давлений. В расчетах горизонтальные перемещения грунта по подошве фундаментов были запрещены в граничных условиях. В лотковых моделях шероховатость создавалась материалами на подошве моделей фундаментов.

Под жесткими плитным и элементным фундаментами при равных осадках касательные напряжения близки по значениям (рис. 7, б). При равных давлениях по подошве гибких фундаментов осадки их также близки, но элементный фундамент оказывается более эффективным вследствие меньших сдвигов в основании и, как следствие, большем расчетном сопротивлении грунта основания.

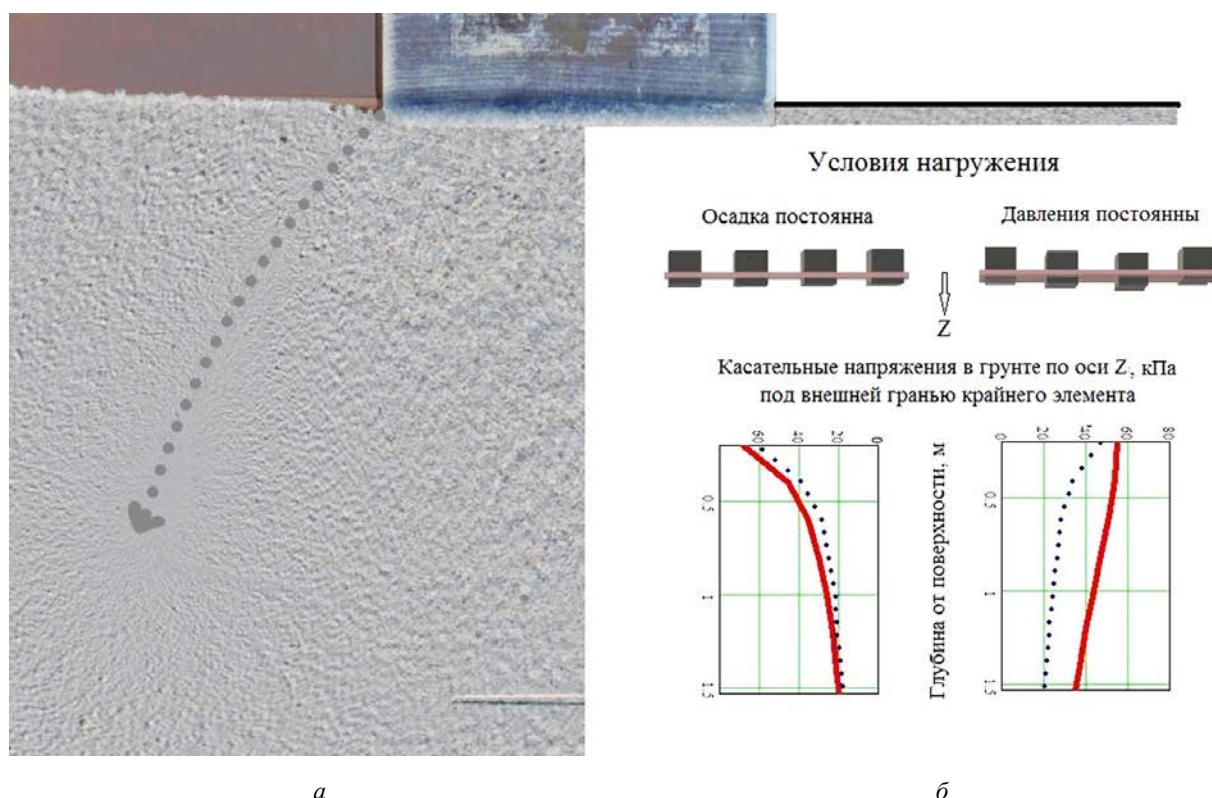


Рис. 7. Траектория роста угловых деформаций (а) и графики касательных напряжений при разных условиях нагружения (б): сплошная линия — плитный фундамент, пунктир — элементный фундамент

Расчет плитных и элементных фундаментов опор ВЛ на вырывание по деформациям может быть произведен по методикам, изложенным в [9, 10].

При расчете по несущей способности определяющими являются объем, вес и площадь боковых граней тела выпирания, опирающегося подошвой на верхний обрез фундамента. Усеченная пирамида тела выпирания, характерная для плиты, приобретает в основании пилообразную форму при опирании на элементный фундамент (рис. 8).

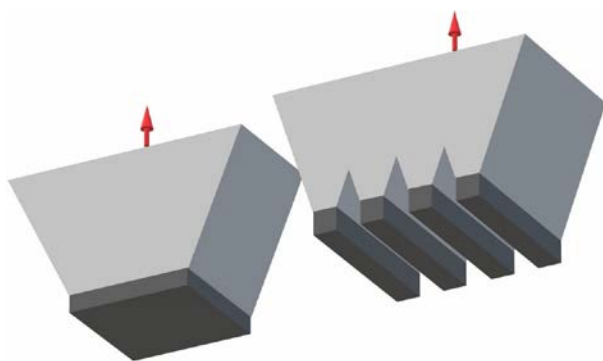


Рис. 8. Тела выпирания для плитного и элементного фундаментов

Потери объема тела выпирания при раздвижке элементов за счет клиновидных зон на его подошве компенсируются существенным приростом объема в верхней зоне. При качественном уплотнении грунта обратной засыпки это дает существенное увеличение предельной выдерживающей силы.

Клиновидные зоны, в свою очередь, увеличивают удельную поверхность тела выпирания и поверхностей сдвига, что усиливает роль характеристик прочности грунта обратной засыпки в предельной силе выдерживания.

Очевидно, что перспективным является взаимно перекрестное, ортогональное положение элементов, в результате которо-

го фундамент приобретет крестовую либо ячеистую форму. Это позволит увеличить его геометрическую неизменяемость, жесткость и даст возможность эффективнее использовать при наличии горизонтальных составляющих внешней нагрузки.

Заключение

Элементные фундаменты опор высоковольтных линий, работающие на знакопеременные нагрузки, имеют ряд преимуществ перед плитными. Рассредоточение элементов, передающих давление на грунт, приводит к снижению деформаций и увеличению несущей способности фундамента на сжимающие и выдергивающие нагрузки. При одинаковых параметрах напряженно-деформированного состояния основания плитных и элементных фундаментов последние приводят к экономии материалов и облегчению логистических задач при сооружении фундаментов.

Следующим этапом следует считать разработку конструктивного решения элементного фундамента из ортогональных элементов с решением вопроса об используемых материалах и конструкциях стыков элементов.

Библиографический список

1. Фундаменты под унифицированные металлические опоры ВЛ 35-330 кВ, серия 3.407-115.
2. Унифицированные конструкции фундаментов для стальных опор ВЛ 35-500 кВ, серия 3.407.1-144.
3. Федеральный закон № 196-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «об электроэнергетике» в части совершенствования требований к обеспечению надежности и безопасности электроэнергетических систем и объектов электроэнергетики».
4. Правила устройства электроустановок (ПУЭ-7), Министерство энергетики РФ. 504 с.

5. Голкин Д. В., Емельянов Е. В., Козловский В. Е. Исследование моделей грунтового основания методом фотограмметрии // *Транспорт: проблемы, идеи, перспективы. Сборник трудов LXXXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (в 2 томах)*. Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. 2023. С. 203–207.
6. Реут М. А., Рокотян С. С. Справочник по проектированию линий электропередачи. М.: Энергия, 1980. 296 с.
7. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. М.: Мир, 1987. 328 с.
8. Кавказский В. Н., Козловский В. Е. и др. Программа расчета выработки методом граничных элементов. Номер свидетельства о гос. регистрации RU2020663522, дата регистрации: 21.10.2020.
9. СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений». Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*» / Минстрой России. М.: Стандартинформ, 2016. 186 с.
10. Сливец К. В., Колмогорова С. С., Коваленко И. А. Параметры мерзлых грунтов при численном моделировании теплофизических задач // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2022. Т. 19, вып. 2.
11. Козловский В. Е., Касаткина А. В. Расчет деформаций оснований выдергиваемых фундаментов опор ВЛ // *Фундаменты*. 2023. № 2 (12). С. 52–53.

Дата поступления: 26.04.2024

Решение о публикации: 26.05.2024

Контактная информация:

КОЗЛОВСКИЙ Владимир Евгеньевич —

канд. техн. наук, доцент;

koslovskii@mail.ru

СМИРНОВ Иван Михайлович — аспирант;

sm.ivan00@gmail.com

About the elemental foundations of the supports of high-voltage lines

V. E. Kozlovskii, I. M. Smirnov

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

For citation: Kozlovskii V. E., Smirnov I. M. About the elemental foundations of the supports of high-voltage lines // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 489–497. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-489-497

Abstract

Purpose: to substantiate the possibility of using the foundations of supports of high-voltage lines in the form of dispersed horizontal elements combined into a single structure for the perception of alternating loads. To determine by experimental and computational methods the effect of the mutual displacement of elements in the form of an increase in the bearing capacity of foundations and a decrease in their deformations under the influence of pressing and pulling loads. To show the possibility of replacing slab foundations of supports of high-voltage lines with structures made of prefabricated elements to reduce the volume and weight of products transported from the factory. **Methods:** application of the moire photogrammetric method to assess the development of soil compaction zones and angular deformations of the soil base in a tray with a glass wall under models of slab and elemental foundations. Using the method of boundary integral equations to obtain the dependence of precipitation on the step

of elements for flexible and rigid foundations. **Results:** the effect of mutual influence of foundation elements during their convergence and dispersal in the form of a change in the stress-strain state in their base is illustrated. Differences in the depths of the distribution of compaction zones and areas of development of angular deformations are revealed. Quantitative data on the precipitation of slab and elemental foundations and the influence of the depth of the roof of the solid underlying layer on them have been obtained. Graphical dependences of the relationship of sediment elements with the distance (step) between them are presented. The effect of the division of the foundation on the rate of extinction of marginal tangential stresses in the base is shown. An illustration is made of an increase in the volume and surface area of the bulging body of the elemental foundation, which leads to an increase in its bearing capacity compared to the slab one when calculating for pulling out. **Practical importance:** the effectiveness of the use of an element foundation in comparison with the paid option in reducing the parameters of the stress-strain state of the base and facilitating logistical tasks during construction is shown. The experimental and computational methods used can be recommended for further refinement of the parameters of the elemental foundations.

Keywords: prefabricated foundations, elemental foundations, photogrammetry method, moire method, boundary element method, stresses, deformations, precipitation.

References

1. Fundamenty pod unificirovannye metallicheskie opory VL 35-330 kV, seriya 3.407-115. (In Russian)
2. Unificirovannye konstrukcii fundamentov dlya stal'nyh opor VL 35-500 kV, seriya 3.407.1-144. (In Russian)
3. Federal'nyj zakon № 196-FZ "O vnesenii izmenenij v Federal'nyj zakon "ob elektroenergetike" v chasti sovershenstvovaniya trebovanij k obespecheniyu nadezhnosti i bezopasnosti elektroenergeticheskikh sistem i ob"ektov elektroenergetiki" ot 23.06.2016. (In Russian)
4. Pravila ustrojstva elektroustanovok (PUE-7), Ministerstvo energetiki RF. 504 s. (In Russian)
5. Golkin D. V., Emel'yanov E. V., Kozlovskij V. E. Issledovanie modelej gruntovogo osnovaniya metodom fotogrammetrii // Transport: problemy, idei, perspektivy. sbornik trudov LXXXIII Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh (v 2 tomah). Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I. 2023. S. 203-207. (In Russian)
6. Reut M. A., Rokotyan S. S. Spravochnik po proektirovaniyu linij elektroperedachi. M.: Energiya, 1980. 296 s. (In Russian)
7. Krauch S., Starfield A. Metody granichnyh elementov v mekhanike tvyordogo tela. M.: Mir, 1987. 328 s. (In Russian)
8. Kavkazskij V. N., Kozlovskij V. E. i dr. Programma raschyota vyrabotki metodom granichnyh elementov. Nomer svidetel'stva o gos. registracii RU2020663522, data registracii 21.10.2020. (In Russian)
9. SP 22.13330.2016 "Osnovaniya zdaniy i sooruzhenij. Aktualizirovannayaredakciya SNIp2.02.01-83*" / Ministroy Rossii. M.: Standartinform, 2016. 186 s. (In Russian)
10. Slivec K. V., Kolmogorova S. S., Kovalenko I. A. Parametry merzlyh gruntov pri chislennom modelirovani teplofizicheskikh zadach // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2022. T. 19, vyp. 2. (In Russian)
11. Kozlovskij V. E., Kasatkina A. V. Raschet deformacij osnovanij vydergivaemyh fundamentov opor VL // Fundamenty. 2023. № 2 (12). S. 52-53. (In Russian)

Received: 26.04.2024

Accepted: 26.05.2024

Author's information:

Vladimir E. KOZLOVSKII — PhD in Engineering, Associate Professor;
koslovskii@mail.ru
Ivan M. SMIRNOV — postgraduate student;
sm.ivan00@gmail.com

УДК 629.4.063.7

Аккумуляция тепловой энергии масла и охлаждающей жидкости дизельного двигателя маневрового тепловоза

А. А. Свечников

Самарский государственный университет путей сообщения, Россия, 443066, Самара, ул. Свободы, 2 В

Для цитирования: Свечников А. А. Аккумуляция тепловой энергии масла и охлаждающей жидкости дизельного двигателя маневрового тепловоза // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 498–507. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-498-507

Аннотация

Цель: обосновать эффективность использования теплоаккумулирующих материалов для сохранения тепловой энергии масла и охлаждающей жидкости дизельной силовой установки маневрового тепловоза. Для достижения поставленной цели необходимо: обозначить актуальность проблемы сохранения тепловой энергии масла и охлаждающей жидкости при эксплуатации тепловозов в условиях отрицательных температур окружающего воздуха; разработать концепцию использования теплоаккумулирующих материалов фазового перехода в масляной и водяной системах тепловоза; выполнить подбор теплоаккумулирующих материалов, исходя из их физических свойств и особенностей работы систем дизельного двигателя тепловоза; провести лабораторные экспериментальные исследования по оценке эффективности применения того или иного теплоаккумулирующего материала. **Методы:** физический эксперимент, выполненный в лабораторных условиях, заключающийся в регистрации температуры рабочей среды (масла и воды) и температуры, используемого теплоаккумулирующего материала в зависимости от времени холодного простоя. Экспериментальные исследования позволяют более точно подобрать наиболее предпочтительные материалы для аккумуляции тепла масла и воды систем дизельного двигателя тепловоза. **Результаты:** построена экспериментальная зависимость температуры различных теплоаккумулирующих материалов от времени холодного простоя, позволяющая обосновать использование стеарина для аккумуляции тепла моторного масла и воды системы охлаждения. **Практическая значимость:** исследования выполнены в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» для молодых ученых на проведение научных исследований, направленных на создание новой техники и технологий для применения на железнодорожном транспорте и рекомендованы к использованию в локомотивном комплексе. Договор о выплате гранта № 5103675 от 26 декабря 2022 года «Тепловой аккумулятор системы предпусковой подготовки тепловозов в холодное время года».

Ключевые слова: теплоаккумулирующий материал фазового перехода, аккумуляция тепла, прогрев, дизельный двигатель, масляная система, система охлаждения, холодный простой.

Одной из приоритетных задач, стоящих перед ОАО «РЖД» в целом и локомотивным комплексом в частности, является повышение эффективности эксплуатации тягового подвижного состава. Тепловозы различного назначения — грузовые, пассажирские, маневровые составляют значительную часть

доли от парка всех локомотивов, эксплуатируемых на российских железных дорогах. В связи с тем, что на некоторых железных дорогах страны (например, Забайкальской, Восточно-Сибирской, Северной) до 40 % времени тепловозы эксплуатируются при минусовых температурах окружающей среды,

актуальной является задача повышения эффективности прогрева дизельной силовой установки. Эффективность прогрева определяется количеством топлива, потребляемого тепловозами в данном режиме работы. Потенциал экономии топлива на прогрев тепловозов составляет 6–10 % в зимний период и 3–5 % в осенний и весенний периоды, что говорит о целесообразности исследований, направленных на разработку методов, позволяющих сохранить тепловую энергию масла и охлаждающей жидкости силовой установки тепловозов.

Задача повышения эффективности прогрева дизельных силовых установок тепловозов в период отрицательных температур окружающего воздуха стоит с момента появления первых тепловозов и не является полностью решенной по настоящее время [1–4]. В качестве охлаждающей жидкости на подавляющем большинстве тепловозов используют воду, которая требует прогрева в зимний период. Использование тосола или антифриза на транспортных дизелях большого объема не решает проблему горячего простоя, поэтому предпочтение отдается более дешевой воде. Что касается моторного масла, то поддержание его температуры в рабочем диапазоне зимой положительно сказывается на надежности трущихся элементов дизельного двигателя.

Проанализировав труды ученых, занимающихся проблемой поддержания рабочих жидкостей тепловоза в прогретом состоянии, можно сделать вывод, что на сегодняшний день существуют два основных типа систем прогрева: стационарные и бортовые. Из наиболее хорошо зарекомендовавших себя можно отметить:

— стационарные системы, использующие электрический подогрев [5];

— бортовые системы на вторичных источниках энергии (например, с использованием котлов-подогревателей на бензине или метане) [6];

— бортовые системы, использующие аккумуляторы теплоты фазового перехода [7, 8].

Несмотря на многолетний опыт ученых в разработке и проектировании различных систем прогрева тепловозов, в настоящее время полностью апробированная система отсутствует. Исключением является система «Гольфстрим», которая активно применялась на маневровых тепловозах Красноярской железной дороге. Однако и эта система прогрева не пошла в тиражирование и в настоящее время серийно не производится. В основном это связано с тем, что для эффективной работы системы «Гольфстрим» не хватает емкости штатной и даже дополнительной аккумуляторных батарей.

Один из вариантов решения проблемы прогрева тепловозов в зимнее время предложила компания ООО «АВП Технология» — это использование системы автоматического запуска дизеля тепловоза (САЗДТ) [9, 10]. В настоящее время системой САЗДТ оборудуют маневровые тепловозы серии ТЭМ18ДМ. Однако использование САЗДТ относительно эффективно только при умеренных отрицательных температурах окружающей среды (не ниже минус 10 °С), когда скорость остывания воды относительно невелика и, соответственно, частота включений дизеля тоже невелика. При более низких температурах увеличивается частота включений дизеля при простоях, что отрицательно сказывается на его моторесурсе. Каждый холодный запуск дизеля эквивалентен нескольким сотням км пробега тепловоза. А высокие темпы охлаждения воды при низких температурах

воздуха (минус 25 °С и ниже) могут спровоцировать звонковую работу САЗДТ.

Тепловые аккумуляторы фазового перехода не являются устройством, способным решить проблему прогрева тепловозов, однако их можно использовать как дополнение к любому из известных способов повышения эффективности прогрева. Продолжительный прогрев предполагает наличие источника тепловыделений, коим тепловой аккумулятор не является по определению. Тепловой аккумулятор может только решить задачу поддержания температур теплоносителей на некотором допустимом уровне, ограниченное время в период содержания тепловоза с выключенным двигателем. Тем не менее аккумулярование тепла масла и охлаждающей жидкости дизеля тепловоза является перспективным методом, снижающим преждевременный износ трибосопряжений дизельного двигателя в момент пуска после холодного простоя и повышающего эффективность прогрева тепловозов.

Использование тепловой энергии фазового перехода различных материалов можно использовать для аккумулярования тепла как моторного масла, так и воды тепловоза. Род службы локомотива никак не влияет на возможность аккумулярования тепла теплоносителей, однако вопрос повышения эффективности прогрева наиболее остро стоит для маневровых тепловозов. Именно поэтому объектом исследований выбран наиболее распространенный на сети «Российских железных дорог» современный маневровый тепловоз ТЭМ18ДМ.

Концепции использования теплового аккумулятора для моторного масла и для воды системы охлаждения должны отличаться. Моторное масло при холодном простое тепловоза стекает в картер дизеля и хранится

полным объемом, а вода остается внутри элементов системы охлаждения. Из-за этого охлаждающая жидкость остывает с разной интенсивностью. Труба отвода от калорифера и нижние патрубки секций радиатора являются самыми быстро замерзающими участками системы охлаждения дизеля тепловоза.

Применение теплового аккумулятора моторного масла предполагает, что при работе двигателя происходит его тепловая зарядка. После остановки дизельной силовой установки и в момент холодного простоя тепловоза часть горячего масла (около 100 л) остается в тепловом аккумуляторе, а остальная часть через штатные вентили в трубопроводах масляной системы стекает в картер двигателя. При новом пуске дизеля тепловоза предпусковая прокачка масла осуществляется горячим маслом из теплового аккумулятора. После запуска тепловоза масляная система работает в штатном режиме и происходит смешение пускового масла с картерным.

Для теплового аккумулятора воды целесообразнее применять конструкцию с радиатором, расположенным в среде теплоаккумулирующего материала. В условиях холодного простоя тепловоза, за счет использования такого теплового аккумулятора можно легко осуществить периодическое подмешивание горячей воды в наиболее интенсивно остывающие элементы водяной системы. Время прокачки горячей воды из теплового аккумулятора определяется, исходя из показаний датчиков, контролирующих температуру зон локального замерзания (отвод калорифера и нижний патрубков секций холодильника). Для повышения эффективности прогрева перед пуском дизеля тепловоза необходимо осуществить прокачку не только масла, но и воды из теплового аккумулятора.

Для эффективного использования тепловых аккумуляторов важной задачей является обосновать целесообразность использования тех или иных теплоаккумулирующих материалов фазового перехода.

Физические параметры различных теплоаккумулирующих материалов, предпочтительных для использования в тепловых аккумуляторах, представлены в табл. 1.

Опыт эксплуатации маневровых тепловозов говорит о том, что рабочая температура масла составляет 55–60 °С, после уже начинает работать водомасляный теплообменник и не дает дальше расти температуре. Рабочая температура охлаждающей жидкости при эксплуатации маневровых тепловозов составляет 80–85 °С [11].

Перечисленные в таблице 1 теплоаккумулирующие материалы гарантированно будут заряжены (расплавлены) температурой 80 °С, и поэтому могут быть использованы в тепловом аккумуляторе охлаждающей жидкости. Для использования в тепловом аккумуляторе масла подойдут только те материалы, температура фазового перехода которых ниже 60 °С.

Предпочтение можно отдать следующим материалам: парафин, стеарин, технический воск, церезин. Теплота фазового перехода данных материалов сопоставима.

Для более точного обоснования выбора теплоаккумулирующего материала для масляной и водяной систем дизельного двигателя маневрового тепловоза были проведены физические эксперименты в условиях лаборатории кафедры «Тяговый подвижной состав» СамГУПС.

Основа эксперимента состоит в регистрации температуры рабочей среды (масла и воды) и температуры используемого теплоаккумулирующего материала в зависимости от времени холодного простоя.

Схема лабораторного стенда представлена на рис. 1. Стенд состоит из следующих элементов: 1 — емкость с моторным маслом; 2 — нагревательный элемент; 3 — датчик температуры масла; 4 — емкость с теплоаккумулирующим материалом; 5 — датчик температуры теплоаккумулирующего материала; 6 — датчик температуры окружающего воздуха; 7 — устройство индикации и регистрации температур.

ТАБЛИЦА 1. Физические параметры теплоаккумулирующих материалов

№	Наименование материала	Температура фазового перехода, °С	Теплота фазового перехода, Дж/кг
1	Парафин Т1	52–58	150 000
2	Парафин Т2	52–56	150 000
3	Стеарин	52–56	150 000
4	Церезин 65	65–70	184 000
5	Церезин 75	75–80	184 000
6	Церезин 80Н	80–85	184 000
7	Технический воск	72–87	147 000
8	Торфяной воск обессмоленный	77–82	75 700
9	Хлорид алюминия 88,5 %, хлорид лития 11,5 %	80	199 000

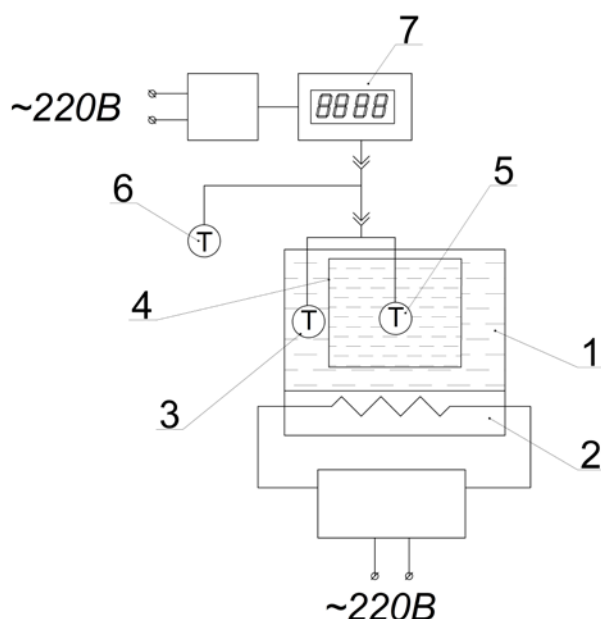


Рис. 1. Схема лабораторного стенда для проведения эксперимента

Эксперимент состоял в нагреве теплоаккумулирующего материала по принципу водяной бани до рабочей температуры двигателя (85–90 °С) и фиксации показателей температуры при холодном простое.

Алгоритм проведения лабораторных экспериментов состоял из следующих действий:

1. Наполнить емкость 1 моторным маслом (водой).

2. Взвесить наполненную емкость (каждый следующий эксперимент проводить для одинаковой массы рабочей жидкости).

3. Наполнить емкость 4 теплоаккумулирующим материалом в твердом фазовом состоянии.

4. Взвесить емкость, наполненную теплоаккумулирующим материалом (каждый следующий эксперимент проводить для одинаковой массы теплоаккумулирующего материала).

5. Разместить емкость 4 внутри емкости 1 и установить на нагревательный элемент.

6. Разместить термодатчики 3, 5, 6 для замера температуры масла, температуры теплоаккумулирующего материала и температуры окружающей среды соответственно.

7. Разогреть теплоаккумулирующий материал до его полного перехода в жидкое состояние по принципу «водяной бани», при этом температура рабочей жидкости (масла или воды) не должна превышать 90 °С.

8. Прекратить нагрев, отключив нагревательный элемент от сети.

9. Производить замеры и регистрацию температур в режиме реального времени (каждые 10 сек.) до момента, когда температуры рабочих тел не достигнут температуры окружающей среды.

10. Повторить данные действия для каждого последующего вида теплоаккумулирующего материала и без теплоаккумулирующего материала.

Регистрация параметров температуры производилась с помощью датчиков, запрограммированных на микроконтроллере и записывающих показания в автоматизированном режиме на флеш-носитель. Все эксперименты проводились в идентичных условиях, при температуре +26 °С.

По результатам проведенных лабораторных экспериментов построен график зависимости температуры теплоаккумулирующих материалов от времени холодного простоя (рис. 2).

По результатам анализа результатов выполненных экспериментальных исследований сделаны следующие выводы:

— фактические температуры фазового перехода материалов составляют: церезин 80Н — 80 °С; воск технический — 69 °С; стеарин — 55 °С; парафин Т1 — 55 °С;

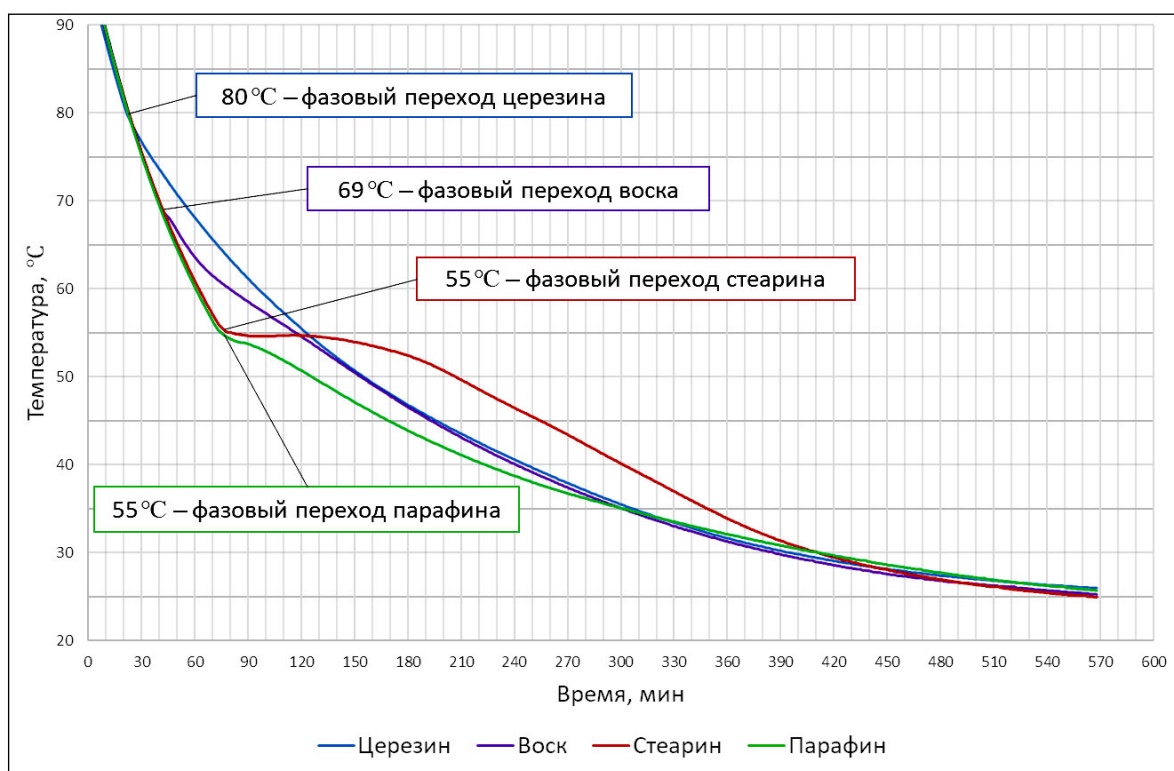


Рис. 2. Зависимость температуры теплоаккумулирующих материалов от времени холодного простоя

— фазовый переход из жидкого состояния в твердое приводит к «перелому» линии температуры и интенсивности остывания материала падает;

— стеарин имеет самую долгую по времени температурную «площадку» в момент фазового перехода;

— церезин практически не дает температурной «площадки», несмотря на то что у него энергия фазового перехода выше на 20 % чем у стеарина. Это можно объяснить тем, что у церезина на 25 °C выше температура фазового перехода, чем у стеарина. Из-за большей разницы температур между нагретым теплоаккумулирующим материалом и окружающей средой температурная «площадка» не успевает образоваться, а наблюдается лишь незначительный «перелом» линии температуры.

Таким образом, по результатам эксперимента и с учетом того, что жидкая фаза теплоаккумулирующего материала лучше передает тепловую энергию в обратном направлении, чем твердая (коллоидная) — наиболее целесообразным является использование стеарина в качестве материала для тепловых аккумуляторов как масла, так и воды.

Для наглядной демонстрации эффективности использования стеарина при аккумуляции тепловой энергии на график падения температуры стеарина наложены линии падения температуры воды и масла при использовании стеарина и температуры воды и масла без использования стеарина (рис. 3).

Из полученной зависимости видно, что использование теплоаккумулирующего материала — стеарина дает прирост температуры масла и воды в среднем на 40–45 %

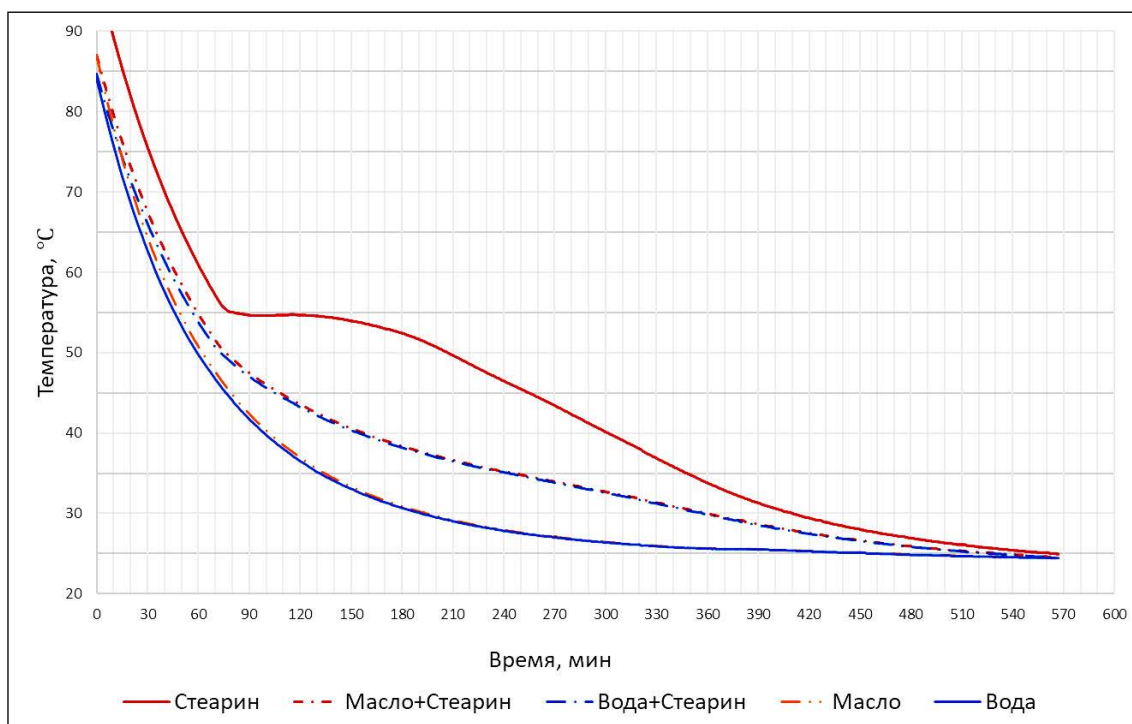


Рис. 3. Зависимость температуры рабочих тел от времени холодного простоя

при данном соотношении масс рабочей жидкости и теплоаккумулирующего материала.

В заключение следует еще раз отметить, что наиболее предпочтительным теплоаккумулирующим материалом для использования в системах прогрева маневровых тепловозов является стеарин, так как он имеет подходящую температуру фазового перехода, является безопасными, дешевым и эффективнее аккумулирует тепловую энергию.

Библиографический список

1. Белоглазов А.К. Влияние температуры окружающей среды на работу системы охлаждения тепловоза и его агрегатов / А.К. Белоглазов, В.О. Носков, А.В. Чулков // Известия Транссиба. 2015. № 4 (24). С. 11–17.
2. Анисимов А.С. Экспериментальные исследования режимов охлаждения и прогрева водяной системы тепловоза / А.С. Анисимов, Н.А. Белоглазова, В.О. Носков // Эксплуатационная надежность

локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы пятой всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 75-летию победы в Великой Отечественной войне, 85-летию кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», 120-летию основания Омского государственного университета путей сообщения, Омск, 12 ноября 2020 года. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2020. С. 28–35.

3. Балабин В.Н. О повышении эффективности прогрева двигателей тепловозов / В.Н. Балабин // Железнодорожный транспорт. 2022. № 11. С. 31–35.

4. Овчаренко С.М. Перспективы развития технологий прогрева тепловозов в зимний период / С.М. Овчаренко, И.С. Ринг // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы научной конференции, посвященной Дню Российской науки, Омск, 8 февраля 2021 года / Министерство

транспорта Российской Федерации, Федеральное агентство железнодорожного транспорта, Омский государственный университет путей сообщения. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2021. С. 77–82.

5. Бакыт Г.Б. Система поддержания теплового состояния дизеля тепловоза с помощью электрического подогрева / Г.Б. Бакыт, А.Б. Бисенгалиев, М.Н. Нажуан // Молодежь в науке: Новые аргументы: VI Международный молодежный сборник научных статей, Липецк, 28 апреля 2020 года / Отв. редактор А.В. Горбенко. Липецк: Научное партнерство «Аргумент», 2020. С. 20–23.

6. Носырев Д.Я. Применение вторичных источников энергии для повышения эффективности эксплуатации маневровых тепловозов в зимнее время / Д.Я. Носырев, Н.В. Чертыковцева // Вестник транспорта Поволжья. 2009. № 3 (19). С. 14–18.

7. Свечников А.А. Тепловой аккумулятор как средство стабилизации температурных режимов наддувочного воздуха и рабочих жидкостей дизеля тепловоза / А.А. Свечников, А.А. Крючкова // Вестник транспорта Поволжья. 2019. № 1 (73). С. 23–28.

8. Свечников А.А. Экспериментальная оценка возможностей теплового аккумулятора с целью использования в масляной системе дизеля маневрового тепловоза / А.А. Свечников, Ю.К. Муштафаев, И.В. Метальников // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2024. Т. 83, № 1. С. 40–49.

9. Абрамов О.В. Система автоматического запуска и остановки дизеля для тепловозов / О.В. Абрамов, А.А. Кащенко // Локомотив. 2017. № 2 (722). С. 34–35.

10. Харькин А.С. Экономический эффект внедрения САЗДТ на маневровом локомотиве / А.С. Харькин // Труды 81-й студенческой научно-практической конференции РГУПС, Воронеж, 28–29 апреля 2022 года / Ростовский государственный университет путей сообщения, филиал в г. Воронеж. Часть 4. Воронеж: филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» в г. Воронеже, 2022. С. 50–55.

11. Свечников А.А. Исследование интенсивности падения температур рабочих жидкостей дизеля маневрового тепловоза / А.А. Свечников, И.В. Метальников // Транспортная наука и инновации: Материалы международной научно-практической конференции, Самара, 1–2 июня 2023 года. Самара: Самарский государственный университет путей сообщения, 2023. С. 62–65.

Дата поступления: 08.04.2024

Решение о публикации: 24.04.2024

Контактная информация:

СВЕЧНИКОВ Александр Александрович — канд. техн. наук, доцент; aa.svechnikov@samgups.ru

Accumulation of thermal energy of oil and coolant of a diesel engine of a shunting diesel locomotive

A. A. Svechnikov

Samara State Transport University, 2 V, Svobody str., Samara, 443066, Russia

For citation: Svechnikov A. A. Accumulation of thermal energy of oil and coolant of a diesel engine of a shunting diesel locomotive // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 498–507. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-498-507

Abstract

Objective: to substantiate the effectiveness of using heat-storing materials to preserve the thermal energy of the oil and coolant of the diesel power plant of a shunting diesel locomotive. To achieve this goal it is necessary: to identify the relevance of the problem of preserving the thermal energy of oil and coolant during the operation of diesel locomotives in conditions of negative ambient temperatures; develop a concept for the use of heat-storing phase transition materials in the oil and water systems of a diesel locomotive; carry out the selection of heat-storing materials based on their physical properties and the operating characteristics of diesel locomotive engine systems; conduct laboratory experimental studies to assess the effectiveness of using a particular heat-storing material. **Methods:** physical experiment performed in laboratory conditions, which consists of recording the temperature of the working medium (oil and water) and the temperature of the heat-storing material used depending on the cold idle time. Experimental studies make it possible to more accurately select the most preferred materials for accumulating heat from oil and water in diesel locomotive engine systems. **Results:** an experimental dependence of the temperature of various heat-accumulating materials on the cold idle time was constructed, which makes it possible to justify the use of stearin to accumulate heat from engine oil and cooling system water. **Practical importance:** the research was carried out as part of the implementation of a grant from Russian Railways JSC for young scientists to conduct scientific research aimed at creating new equipment and technologies for use in railway transport and recommended for use in the locomotive complex. Grant agreement No. 5103675 dated December 26, 2022 “Thermal accumulator for the pre-start preparation system for diesel locomotives in the cold season”.

Keywords: thermal storage material of phase change, heat storage, warming up, diesel engine, oil system, cooling system, cold idle.

References

1. Beloglazov A. K. Vliyanie temperatury okruzhayushchej sredy na rabotu sistemy ohlazhdeniya teplovoza i ego agregatov / A. K. Beloglazov, V. O. Noskov, A. V. Chulkov // *Izvestia Transsib*. 2015. №. 4 (24). S. 11–17. (In Russian)

2. Anisimov A. S. Jeksperimental'nye issledovaniya rezhimov ohlazhdeniya i progrevva vodjanoj sistemy teplovoza / A. S. Anisimov, N. A. Beloglazova, V. O. Noskov // *Jekspluatacionnaja nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie jeffektivnosti tjagi poezdov: Materialy pjatoj vsrossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchast-*

iem, posvjashhennoj 75-letiju pobedy v Velikoj Otechestvennoj vojne, 85-letiju kafedry “Podvizhnoj sostav jelektricheskikh zheleznyh dorog”, 120-letiju osnovaniya Omskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija, Omsk, 12 nojabrja 2020 goda. Omsk: Omskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija, 2020. S. 28–35. (In Russian)

3. Balabin V. N. O povyshenii jeffektivnosti progrevva dvigatelej teplovozov / V. N. Balabin // *Zheleznodorozhnyj transport*. 2022. № 11. S. 31–35. (In Russian)

4. Ovcharenko S. M. Perspektivy razvitija tehnologij progrevva teplovozov v zimnij period /

S. M. Ovcharenko, I. S. Ring // Innovacionnye proekty i tehnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: materialy nauchnoj konferencii, posvjashhennoj Dnju Rossijskoj nauki, Omsk, 8 fevralja 2021 goda / Ministerstvo transporta Rossijskoj Federacii, Federal'noe agentstvo zheleznodorozhnogo transporta, Omskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija. Omsk: Omskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija, 2021. S. 77–82. (In Russian)

5. Bakyt G. B. Sistema podderzhanija teplovogo sostojanija dizelja teplovoza s pomoshh'ju jelektricheskogo podogreva / G. B. Bakyt, A. B. Bisengaliev, M. N. Nazhuan // Molodezh' v nauke: Novye argumenty: VI Mezhdunarodnyj molodezhnyj sbornik nauchnyh statej, Lipeck, 28 aprelja 2020 goda / Otv. redaktor A. V. Gorbenko. Lipeck: Nauchnoe partnerstvo "Argument", 2020. S. 20–23. (In Russian)

6. Nosyrev D. Ja. Primenenie vtorichnyh istochnikov jenergii dlja povyshenija jeffektivnosti jekspluatcii manevrovnyh teplovozov v zimnee vremja / D. Ja. Nosyrev, N. V. Chertykovceva // Vestnik transporta Povolzh'ja. 2009. № 3 (19). S. 14–18. (In Russian)

7. Svechnikov A. A. Teplovoj akkumuljator kak sredstvo stabilizacii temperaturnyh rezhimov nadduvochnogo vozduha i rabochih zhidkostej dizelja teplovoza / A. A. Svechnikov, A. A. Krjuchkova // Vestnik transporta Povolzh'ja. 2019. № 1 (73). S. 23–28. (In Russian)

8. Svechnikov A. A. Jeksperimental'naja ocenka vozmozhnostej teplovogo akkumuljatora s cel'ju ispol'zovanija v masljanoj sisteme dizelja manevrovogo teplovoza / A. A. Svechnikov, Ju. K. Mus-

tafaev, I. V. Metal'nikov // Vestnik Nauchnoissledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. 2024. T. 83, № 1. S. 40–49. (In Russian)

9. Abramov O. V. Sistema avtomaticheskogo zapuska i ostanovki dizelja dlja teplovozov / O. V. Abramov, A. A. Kashhenko // Lokomotiv. 2017. № 2 (722). S. 34–35. (In Russian)

10. Har'kin A. S. Jekonomicheskij jeffekt vnedrenija SAZDT na manevrovom lokomotive / A. S. Har'kin // Trudy 81-j studencheskoj nauchno-prakticheskoi konferencii RGUPS, Voronezh, 28–29 aprelja 2022 goda / Rostovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija, filial v g. Voronezh. Chast' 4. Voronezh: filial federal'nogo gosudarstvennogo bjudzhetnogo obrazovatel'nogo uchrezhdenija vysshego obrazovanija "Rostovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija" v g. Voronezhe, 2022. S. 50–55. (In Russian)

11. Svechnikov A. A. Issledovanie intensivnosti padenija temperatur rabochih zhidkostej dizelja manevrovogo teplovoza / A. A. Svechnikov, I. V. Metal'nikov // Transportnaja nauka i innovacii: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii, Samara, 1–2 ijunja 2023 goda. Samara: Samarskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija, 2023. S. 62–65. (In Russian)

Received: 08.04.2024

Accepted: 24.04.2024

Author's information:

Aleksandr A. SVECHNIKOV — PhD in Engineering, Associate Professor; aa.svechnikov@samgups.ru

06.05.2024 УДК 629.423.31

Исследование существующих методов сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей локомотива

М. Ю. Хажеева¹, Е. Ю. Дульский¹, П. Ю. Иванов¹, В. А. Кручек²

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

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

Для цитирования: Хажеева М. Ю., Дульский Е. Ю., Иванов П. Ю., Кручек В. А. Исследование существующих методов сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 508–516. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-508-516

Аннотация

Цель: рассмотреть вопрос о повышении надежности тяговых электродвигателей электровоза, которая зависит от различных факторов. Все внимание обращено на актуальность исследований методов сушки изоляции тяговых электродвигателей в настоящее время. Доказано многолетним трудом, что самой уязвимой частью двигателя является изоляция. Перечисляются все методы, которые направлены на решение поставленных задач. В статье описываются принцип действия и технология процессов в каждом из указанных методов. Из предложенных методов выводятся показатели эффективности с позиции технических и экономических результатов, также отмечаются некоторые их преимущества и недоработки. Статья основывается на сравнении различных методов, которые направлены на решение текущих проблем, связанных с повышением надежности тягового подвижного состава. Представлена статистика отказов тяговых двигателей за последние три года, описаны причины увлажненности изоляции силового оборудования электровоза. Перечислены основные методы и способы сушки увлажненной изоляции, используемые в локомотивных депо ВСЖД, дана характеристика каждого метода. **Методы:** применен метод статистических данных и аналитического обзора состояния на сегодняшний момент по процессу сушки изоляции тягового подвижного состава. **Результаты:** в статье перечислены проведенные исследования, эксперименты и результаты, оценивающие существующие методы и способы процессов сушки изоляции на подвижном составе. Разработан обновленный метод трехциклового сушки увлажненной изоляции электрических машин, который основан на использовании электрокалориферных установок и предусматривает осцилляционное энергоподведение. Поставлена задача по решению оптимальных способов удаления влажности изоляции тяговых электродвигателей электровозов на основе использования конвективного метода. **Практическая значимость:** на основании проведенных исследований подтверждена возможность использования предлагаемого трехциклового способа сушки увлажненной изоляции электрических машин, что позволяет снижать затраты электроэнергии на ремонт и время процесса сушки изоляции.

Ключевые слова: тяговой подвижной состав, сушка увлажненной изоляции, конвективный метод сушки, электрокалориферная установка, повышение надежности оборудования.

Как показывает анализ статистики отказов тягового подвижного состава, за последние годы существенная часть неисправностей оборудования приходится на тяговые двигатели. За рассматриваемый период (2021–2023 годы) особо часто наблюдаются отказы электрического и вспомогательного оборудования, фиксируются более 1500 случаев каж-

дый год, в сумме они составляют около 50 % от числа всех случаев. Результаты исследований данных о неисправностях электровозов по видам оборудования на Восточно-Сибирской железной дороге можно наблюдать на рис. 1–3. Доля неисправностей ТЭД в данный период держится в районе 11–14 % и насчитывает от 600 до 800 отказов в год [1].

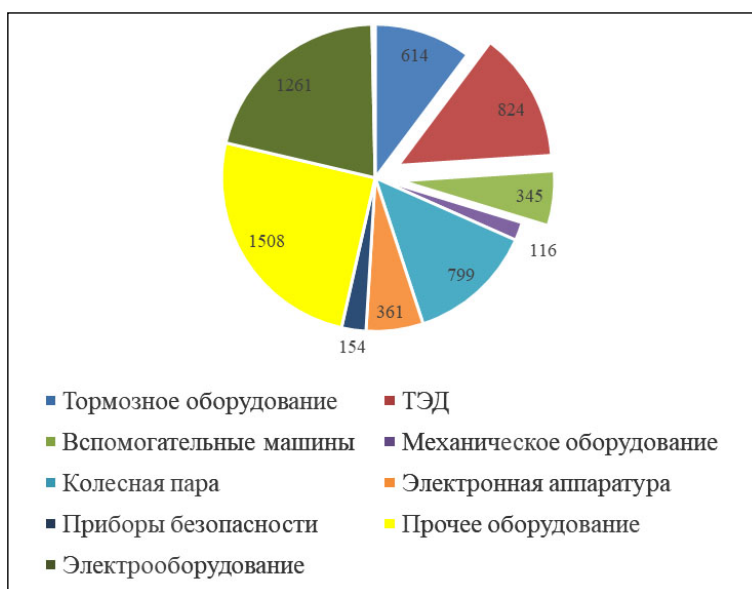


Рис. 1. Динамика отказов элементов тягового подвижного состава на ВСЖД за 2021 год

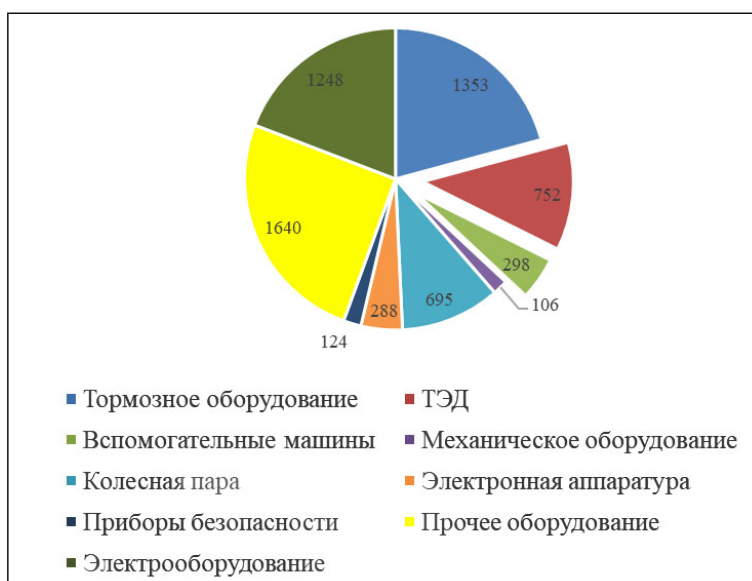


Рис. 2. Динамика отказов элементов тягового подвижного состава на ВСЖД за 2022 год

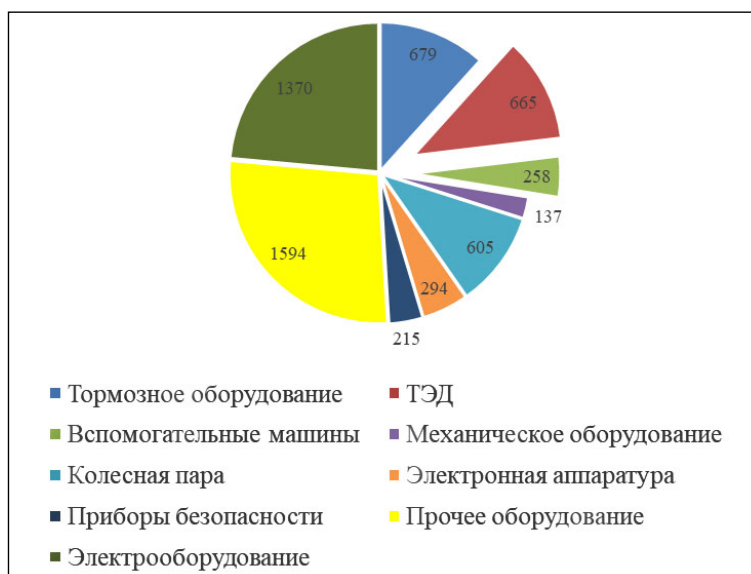


Рис. 3. Динамика отказов элементов тягового подвижного состава на ВСЖД за 2023 год

Из полученных диаграмм по отказам тяговых двигателей электровоза можно наблюдать достаточно стабильное распределение числа неисправностей оборудования тягового подвижного состава за последние годы эксплуатации.

Проблема увлажнения изоляции электрооборудования продолжает оставаться одной из главных причин неисправности тяговых двигателей на подвижном составе. Имеющиеся в настоящее время методы сушки изоляционных систем чрезвычайно трудоемки, сложны в исполнении при реальных условиях эксплуатации на ВСЖД. Поэтому одним из возможных перспективных направлений решения этой проблемы является совершенствование технологии проводимого ремонта и методов, а также постановка задач и нахождение пути по обеспечению надежности электрической прочности изоляции [2–3].

Повышенная влажность воздуха способствует повреждениям тяговых электрических двигателей, которые вызваны пробоем изоляции вследствие ее переув-

лажнения. При постановке электровоза в отапливаемое депо изоляцию тяговых электрических двигателей необходимо сушить. Практикой и наукой накоплен большой объем информации, который касается вопросов теории, технологий и способов сушки изоляции.

Процесс любого мероприятия, направленного на улучшение или сохранение изначальных характеристик какого-либо электрооборудования, представляется сложным и трудоемким. Одним из таких процессов является способ сохранения изоляции тяговых электродвигателей для нормального и долгосрочного использования. В настоящее время в локомотивных депо применяют следующие мероприятия по ремонту тяговых электродвигателей из-за увлажненности изоляции электрооборудования:

- 1) токовую сушку при низком напряжении;
- 2) сушку вентиляторами электровозов;
- 3) электроосмотическую сушку;
- 4) сушку специальными калориферными установками.

Токовая сушка изоляции тяговых электродвигателей осуществляется на основании использования технических средств самого тягового подвижного состава силами непосредственно самих работников. В данном случае задействована вся силовая цепь электровоза, при этом необходима стоянка на рельсовых путях под контактным проводом. Затем выборочно происходит сушка одного или нескольких групп тяговых электродвигателей секции или всего электровоза. Важно, что сушке подвергаются только тяговые электродвигатели с неблагоприятными для работы показателями по сопротивлению изоляции, другие необходимо отключить [4].

Работа силовой цепи тягового подвижного состава начинается с запуска пультом управления машиниста, поднятием токоприемника и включением быстродействующего выключателя. С точки зрения технологии взаимодействия всей цепи электровоза способ характеризуется четырьмя циклами пропускания тока в течение 30 мин. после 30 сек. кратковременной вентиляции паров воды (рис. 4). Из-за перепада температур происходит передача тепла от более нагретой меди обмотки к менее нагретому слою изоляции.

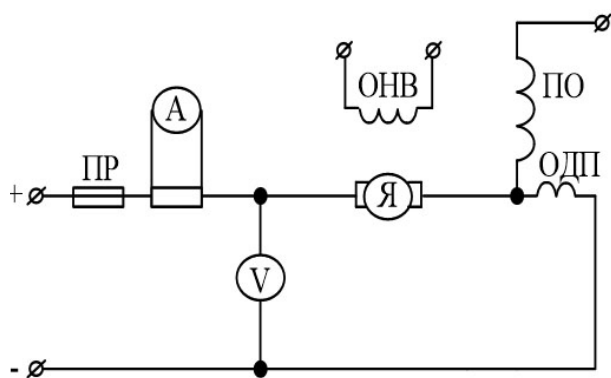


Рис. 4. Схема токового способа сушки изоляции ТЭД

Другой способ в сравнении с предыдущим является простым и обычным благодаря тому, что сушка производится с помощью вентиляторов самого тягового подвижного состава без применения сил персонала. Поэтому этот метод был придуман с целью упрощения удаления влаги из обмоток увлажненной изоляции. Процесс этот упрощен тем, что тепло передается в момент соприкосновения материала с высушиваемым материалом и последний как бы воспринимает испаряющуюся влагу. Благодаря испарению влаги с поверхности высушиваемого материала создается перепад влажности, за счет этого происходит перемещение влаги из внутренних слоев материала на поверхность. Однако исследования этого метода привели к выводу о неблагоприятных параметрах прочности изоляции, а именно по коэффициенту абсорбции [5].

Не наблюдается большого количества данных по этому процессу, практически отсутствуют наработки по причине узких возможностей развития. Известно, что при методе на основе использования вентиляторов электровоза важен режим сушки, который характеризуется скоростью передачи воздуха, значением влажности, начальной и конечной температурами. От параметров этих режимов будет зависеть, сколько времени займет сушка изоляции до момента полного восстановления и каковы будут диэлектрические и механические показатели высушиваемого материала.

Недостаток данного метода решения проблемы заключается в заторможенности процесса и отрицательном воздействии температурных перепадов в слоях изоляции. Метод сушки, применяемый в этой технологии, не обеспечивает возможности контроля

над параметрами теплоносителя, что приводит к значительному снижению качества сушки изоляционного материала. Но выход из строя тяговых двигателей происходит не только из-за воздействия резких перепадов температур во время эксплуатации. Важно также качество произведенного ремонта.

На железнодорожном транспорте применяют новые способы сушки изоляции электрооборудования, называемые электроосмотическими. Подробным изучением и совершенствованием данного метода, сбором данных и проведением экспериментов в локомотивном депо занимаются многие ученые других университетов. Результаты испытаний свидетельствуют о сокращении времени сушки, отсутствии отрицательных результатов.

Вытеснение влаги из системы изоляции электрооборудования электроосмотической сушкой происходит за счет сил электрического поля. Этот процесс является нетепловым, поэтому исключаются тепловое старение, термическая деструкция и локальные перегревы изоляции [6]. Электроосмотическая сушка осуществляется без нагрева электрооборудования при температуре окружающей среды. Сами устройства сушки и влагозащиты представляют собой небольшие аппараты, генерирующие на выходе импульсы напряжения специальной формы, амплитуды, частоты и скважности. Эти устройства имеют небольшую массу и габариты, входное напряжение 220 В, например, устройства типа УЭСИ-0,4 кВ, ВУЭОС-6-10 кВ, УЭСИ-6-10 кВ.

На практике показано, что процесс электроосмотической передачи влажности изоляции обмоток тягового электродвигателя электровоза остается достаточно продолжительным.

Активно применяется в локомотивных депо на пунктах технического обслуживания локомотивов метод сушки изоляции с использованием электрокалориферной установки. Этим методом долгое время занимаются сотрудники ИрГУПС на основе статических данных по увлажненности конструкций тягового электродвигателя. Метод пользуется широким интересом и требует новых способов энергоподвода при осуществлении сушки изоляции.

Специальные электрокалориферные установки предназначены для осуществления сушки увлажненной изоляции горячим воздухом после постановки локомотива в отопливаемый цех, оборудованный ремонтными стойлами [7]. Они просты в обслуживании, не ухудшают условий труда персонала и обеспечивают возможность относительно быстрого проведения ремонтных работ.

Электрокалорифер оборудован специальными воздуховодами для поступления горячего воздуха в слои изоляции, общий вид установки изображен на рис. 5. Для достижения эффективности сушки изоляции этим методом можно начать сушить с минимальных значений температуры воздуха и постепенно повышать в несколько раз. Данные манипуляции необходимы для того, чтобы не допустить больших перепадов температур в материале, уменьшить тормозящий эффект и обеспечить распределение потока влаги на поверхность.

При отправке электровоза на ремонт в депо возрастают перепады температур, что требует продолжительного подогрева. Стационарные калориферные установки используются для эффективного подогрева обмоток, они обеспечивают комфортные условия обслуживания, возможность осуществления ремонтных работ и улучшение условий труда рабочим [8].

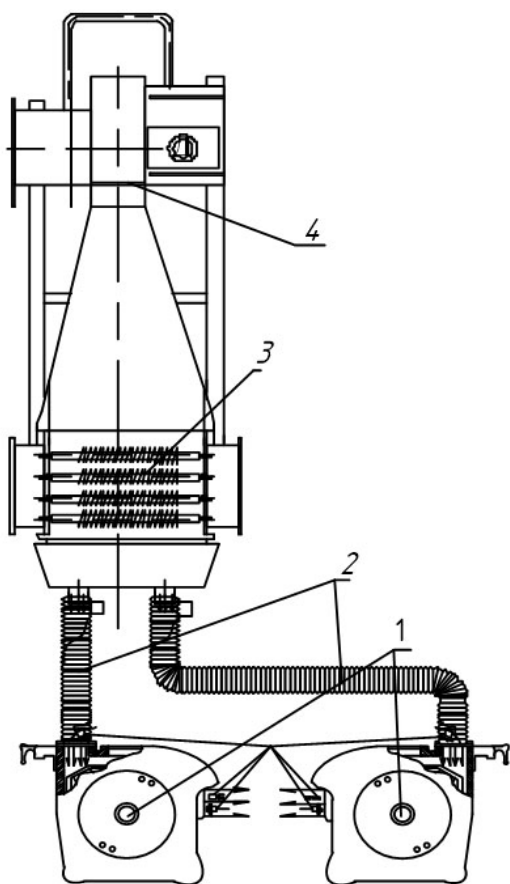


Рис. 5. Схема сушки ТЭД при помощи электрокалориферной установки:
1 — ТЭД; 2 — патрубки; 3 — ТЭНы;
4 — электрокалориферная установка

На основе проведенных научных работ предложен амплитудно-широотно-прерывный способ энергоподвода. Происходит процесс постепенного регулирования температуры нагрева в слоях изоляции. Всего в этом методе описаны три последовательных цикла, благодаря которым достигается необходимое значение для изоляции.

В диссертационных работах был проведен анализ подобных установок и алгоритмов управления энергоподводом, указывающий на несколько существенных

недоработок с позиций ресурсоэнергосбережения [9–10]. Направление исследований задано в сторону использования широтно-прерывистого пути управления мощностями установки для каждого цикла. В результате получен прерывистый метод манипуляций энергоподводом на качественное восстановление характеристик изоляции электрооборудования. Это, в свою очередь, влияет на постепенное испарение влаги из изоляции и продолжительность осуществления процесса. По результатам выполненных задач разработан автоматизированный комплекс положительного воздействия на качество высушиваемого материала электрооборудования. Отмечается значительная экономия денежных средств локомотивного хозяйства за счет снижения потребления электроэнергии.

Недостаток данного метода заключается в больших перепадах температур, отсутствии управления процессом сушки циклами с переменным энергоподводом. В рамках оптимизации и более рационального использования энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте учеными ИрГУПС был разработан новый алгоритм работы электрокалориферной установки, позволяющий устранить имеющиеся недостатки. Метод с применением электрокалориферной установки был доработан с позиции управления процессом в целом. Подана заявка на патент № 2022132878 от 14.12.2022 года «Трехцикловой способ сушки увлажненной изоляции электрических машин». Данный метод сушки увлажненной изоляции может быть использован для всех типов тяговых двигателей, в частности, таких как НБ-418К, НБ-514, НБ-514К.

В работах предшественников уже отмечалось, что подобные методы, основанные на применении прерывистого управления, могут позволить сократить продолжительность сушки в целом, однако численное подтверждение этому возможно только по результатам экспериментальных исследований [9], которые запланированы в ближайшее время и будут отражены в следующих работах.

Таким образом, в данной статье рассмотрена актуальность исследований различных методов сушки увлажненной изоляции на тяговом подвижном составе. На основании проведенных исследований обосновано дальнейшее изучение выбранного направления для повышения надежности и безопасности тягового подвижного состава в условиях его эксплуатации. По сравнению с остальными методами сушки изоляции калориферный способ имеет преимущества по нескольким параметрам, которые необходимо продолжать улучшать.

В дальнейших работах будет представлен анализ существующих режимов энергоподводов электрокалориферных установок для сушки увлажненной изоляции, в частности прерывистых как наиболее энергоэффективных. Также планируется провести глубокий патентный поиск в выбранном направлении.

Библиографический список

1. Соболев В. М., Левитский В. М. Режимы сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей // Электрическая и тепловозная тяга. 1975. № 1. С. 23–24.
2. Волков А. К., Суворов А. Г. Повышение эксплуатационной надежности тяговых двигателей / М.: Транспорт, 1988. 128 с.
3. Худоногов А. М., Дульский Е. Ю., Иванов П. Ю. Зональные особенности распределения эксплуатационной надежности предельно нагруженного оборудования электровозов // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта: материалы III Международной научно-практической конференции. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2018. С. 311–318.
4. Исмаилов Ш. К. Повышение ресурса изоляции электрических машин подвижного состава: монография // Омский государственный университет путей сообщения. Омск, 2007. 391 с.
5. Дульский Е. Ю. Экспериментальные исследования основных электротехнических параметров изоляции тяговых двигателей электровозов при сушке разными способами / Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов, А. М. Худоногов и др. // Транспорт Урала. 2020. № 3 (66). С. 72–75.
6. Немировский А. Е., Сергиевская И. Ю., Кичигина Г. А. Математическое моделирование процесса электроосмотической сушки изоляции электродвигателей // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2020. № 2 (60). С. 39–51.
7. Дульский Е. Ю., Иванов П. Ю., Хамнаева А. А. и др. Система мониторинга состояния изоляции // Железнодорожный транспорт. 2021. № 3. С. 50–52.
8. Хажеева М. Ю., Худоногов А. М., Дульский Е. Ю. и др. Разработка автоматизированной системы ресурсосберегающего управления электрокалориферной установкой для сушки изоляции тяговых электрических машин // Известия Транссиба. 2021. № 3 (47). С. 61–68.
9. Коноваленко Д. В. Рациональные режимы сушки увлажненной изоляции обмоток тяговых электрических машин: специальность 05.22.07 «Рациональные режимы сушки увлажненной изоляции обмоток тяговых электрических машин»: дис. ... канд. техн. наук / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. Иркутск, 2007. 193 с.

10. Патент № 2494517 Российская Федерация, МПК Н02К 15/12. Трехциклового амплитудно-широтного прерывистый способ сушки изоляции электрических машин: № 2011150204/07: заявл. 09.12.2011; опубл. 27.09.2013 / Сидоров В. В., Лыткина Е. М., Коноваленко Д. В. и др. 6 с.

Дата поступления: 06.05.2024

Решение о публикации: 28.05.2024

Контактная информация:

ХАЖЕЕВА Марина Юрьевна —

аспирант; m.hkazheeva@mail.ru

ДУЛЬСКИЙ Евгений Юрьевич —

канд. техн. наук, доцент; e.dulskiy@mail.ru

ИВАНОВ Павел Юрьевич —

канд. техн. наук, доцент; p_ivanov@ssdigit.ru

КРУЧЕК Виктор Александрович — докт. техн.

наук, профессор; victor.kruchek@yandex.ru

Research of existing methods for drying wetted insulation of traction motors

M. Yu. Khazheeva¹, E. Yu. Dulskiy¹, P. Yu. Ivanov¹, V. A. Kruchek²

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

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

For citation: Khazheeva M. Yu., Dulskiy E. Yu., Ivanov P. Yu., Kruchek V. A. Research of existing methods for drying wetted insulation of traction motors // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 508–516. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-508-516

Abstract

Objective: consider the issue of increasing the reliability of electric locomotive traction motors, which depends on various factors. This article examines the factor of the impact of climate conditions on the operation of a locomotive. All attention is paid to the relevance of research into methods for drying the insulation of traction motors at the present time. It has been proven over many years of work that the most vulnerable part of the engine is insulation. All methods that are aimed at solving the assigned problems are listed. The article describes the principle of operation and technology of processes in each of these methods. From the proposed methods, efficiency indicators are derived from the perspective of technical and economic results, and some of their advantages and disadvantages are also noted. The article is based on a comparison of various methods that are aimed at solving current problems associated with increasing the reliability of traction rolling stock. Statistics on traction motor failures over the past three years are presented, and the reasons for moisture in the insulation of electric locomotive power equipment are described. The main methods and methods for drying moistened insulation used in VSZhD locomotive depots are listed, and the characteristics of each method are given. **Methods:** the method of statistical data and analytical review of the current state of the process of drying the insulation of traction rolling stock was applied. **Results:** the article lists the studies, experiments and results that evaluate the existing methods and methods of insulation drying processes on rolling stock. An updated method of three-cycle drying of moistened insulation of electrical machines has been developed, which is based on the use of electric heating units and provides for oscillatory energy supply. The task has been set to solve the optimal methods for removing moisture from the insulation of traction motors of electric locomotives based on the use of the convective method. **Practical importance:** based on the conducted research, the possibility of using the proposed three-cycle method for drying moistened insulation of electrical machines has been confirmed, which allows reducing energy costs for repairs and the time of the insulation drying process.

Keywords: resource-saving control, electric heating unit, drying process, repair quality, traction motors, cloud storage.

References

1. Sobolev V. M., Levitskij V. M. Rezhimy` sushki uvlazhnennoj izolyacii tyagovy`x e`lektrodvigatelej // E`lektricheskaya i teplovoznaya tyaga. 1975. № 1. S. 23–24. (In Russian)
2. Volkov A. K., Suvorov A. G. Povy`shenie e`kspluatacionnoj nadezhnosti tyagovy`x dvigatelej / M.: Transport, 1988. 128 s. (In Russian)
3. Xudonogov A. M., Dul`skij E. Yu., Ivanov P. Yu. Zonal`ny`e osobennosti raspredeleniya e`kspluatacionnoj nadezhnosti predel`no nagruzhennogo oborudovaniya e`lektrovozov // Razrabotka i e`kspluatatsiya e`lektrotexnicheskix kompleksov i sistem e`nergetiki i nazemnogo transporta: materialy` III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Omsk: Omskij gos. un-t putej soobshheniya, 2018. S. 311–318. (In Russian)
4. Ismailov Sh. K. Povy`shenie resursa izolyacii e`lektricheskix mashin podvizhnogo sostava: monografiya // Omskij gosudarstvenny`j universitet putej soobshheniya. Omsk, 2007. 391 s. (In Russian)
5. Dul`skij E. Yu. E`ksperimental`ny`e issledovaniya osnovny`x e`lektrotexnicheskix parametrov izolyacii tyagovy`x dvigatelej e`lektrovozov pri sushke razny`mi sposobami / Dul`skij E. Yu., P. Yu. Ivanov, A. M. Xudonogov i dr. // Transport Urala. 2020. № 3 (66). S. 72–75. (In Russian)
6. Nemirovskij A.E., Sergievskaya I. Yu., Kichigina G. A. Matematicheskoe modelirovanie processa e`lektroosmoticheskoy sushki izolyacii e`lektrodvigatelej // Vesti vy`sshix uchebny`x zavedenij Chernozem`ya. 2020. № 2 (60). S. 39–51. (In Russian)
7. Dul`skij E. Yu., Ivanov P. Yu., Xamnaeva A. A. i dr. Sistema monitoringa sostoyaniya izolyacii // Zheleznodorozhny`j transport. 2021. № 3. S. 50–52. (In Russian)
8. Xazheeva M. Yu., Xudonogov A. M., Dul`skij E. Yu. i dr. Razrabotka avtomatizirovannoj sistemy` resursoberegayushhego upravleniya e`lektrokalorifernoj ustanovkoj dlya sushki izolyacii tyagovy`x e`lektricheskix mashin // Izvestiya Transsiba. 2021. № 3 (47). S. 61–68. (In Russian)
9. Konovalenko D. V. Racional`ny`e rezhimy` sushki uvlazhnennoj izolyacii obmotok tyagovy`x e`lektricheskix mashin: special`nost` 05.22.07 “Racional`ny`e rezhimy` sushki uvlazhnennoj izolyacii obmotok tyagovy`x e`lektricheskix mashin”: diss. ... kandidat. texn. nauk / Irkutskij gos. un-t putej soobshheniya. Irkutsk, 2007. 193 s. (In Russian)
10. Patent № 2494517 Rossijskaya Federaciya, MPK N02K 15/12. Trexciklovoj amplitudno-shirotnoprery`visty`j sposob sushki izolyacii e`lektricheskix mashin: № 2011150204/07: zayavl. 09.12.2011: opubl. 27.09.2013 / Sidorov V. V., Ly`tkina E. M., Konovalenko D. V. i dr. 6 s. (In Russian)

Received: 06.05.2024

Accepted: 28.05.2024

Author’s information:

Marina Yu. KHAZHEEVA —

Postgraduate Student; m.hkazheeva@mail.ru

Evgeniy Yu. DULSKIY —

PhD in Engineering, Associate Professor;

e.dulskiy@mail.ru

Pavel Yu. IVANOV —

PhD in Engineering, Associate Professor;

p_ivanov@ssdigit.ru

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

Professor; victor.kruchek@yandex.ru

УДК 625.033.34

Сравнение годовых грузооборотов железнодорожного и автомобильного транспортов РФ: моделирование, верификация, точечный и интервальный прогноз

П. В. Герасименко

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

Для цитирования: Герасименко П. В. Сравнение годовых грузооборотов железнодорожного и автомобильного транспортов РФ: моделирование, верификация, точечный и интервальный прогноз // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 517–524. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-517-524

Аннотация

Цель: проведено исследование сравнения грузооборотов железнодорожного и автомобильного транспортов РФ за последнее двадцатилетие и выполнена прогнозная оценка. Сравнительное оценивание осуществлено с помощью показателя, характеризующего превышение грузооборота железнодорожного над автомобильным транспортом. Исследование включает следующие основные этапы: моделирование по наблюдаемым на опыте годовым значениям грузооборота; верификацию модели путем сравнения модельного и опытного значений в годы, не участвующие в построении модели; модельное точечное и интервальное прогнозирование; анализ по прогнозу тенденции изменения. **Методы:** для построения математической модели, ее апробации и проведения прогнозирования использован ряд теоретических положений эконометрики. Математическая модель превышения грузооборота железнодорожного над автомобильным транспортом в зависимости от года доставки грузов построена по выборке статистических данных Росстата с 2004 по 2021 год. Верификация модели выполнена по результатам грузооборота 2022 и 2023 года. **Результаты:** качество построенной модели оценивалось по следующим показателям: погрешности аппроксимации, коэффициентам корреляции и детерминации, критерию Фишера. Сравнение наблюдаемых и модельных значений превышения грузооборота показало, что они в период с 2004 по 2021 год по приведенным показателям имеют незначительные отклонения. Выполненная верификация подтвердила удовлетворительное моделирование. **Практическая значимость:** проведенное исследование показало возможность осуществлять по изложенному алгоритму исследования результатов проведения транспортных операций и обоснованно принимать управленческие решения на начало их проведение. **Рекомендации:** продолжать совершенствование аппарата моделирования и прогнозирования с учетом оценивания показателей риска.

Ключевые слова: моделирование, прогнозирование, оценивание, регрессия, коэффициент детерминации, точечная и интервальная оценка, риск.

В формировании государственного бюджета Российской Федерации огромную роль как непосредственно, так и опосредованно оказывают грузоперевозки, поскольку производство практически всех отраслей во многом зависит от них. Во всей транспортной

системе РФ значимость железнодорожной и автомобильной отраслей является главенствующей, а их личный вклад трудно переоценить. Их значимость обусловлена прежде всего дальностью и массовой перевозкой грузов, необходимых как для населения,

так и для всех отраслей экономики. Кроме того, они осуществляют доставку груза в любой период времени суток и года.

Поскольку перспективы экономики связаны с ее ростом, то и роль этих видов транспорта также должна расти. Важно при этом оценить эффективность их роста путем сравнения динамики такого важного показателя, как грузооборот. Одним из существенных факторов грузоперевозок является своевременная доставка груза. Именно она формирует общественное мнение о грузовых компаниях, осуществляющих перевозку груза.

В 2022 году железнодорожным транспортом в России было перевезено 1,351 млрд т грузов, что на 3,8 % меньше, чем в 2021-м. Грузооборот в 2022 году остался практически неизменным. Объем автомобильных перевозок вырос на 11 % за 2022 год. Несмотря на ограничения внешней торговли с западными странами, все же за январь — июль 2023 года он увеличился на 2,1 % к аналогичному периоду прошлого года. Это позволило автомобильным перевозкам в силу их меньшей зависимости от инфраструктуры компенсировать снижение отчасти железнодорожных перевозок. Доля автомобильного транспорта в общем объеме грузоперевозок в 2022 году выросла с 67,6 до 70,7 %. В начале прошлого года после введения санкций темпы роста грузоперевозок обогнали темпы роста грузооборота, то есть совершались более короткие поездки [1].

Целью настоящей работы является сравнительный анализ изменения грузооборотов железнодорожного и автомобильного транспортов и проведение прогноза динамики превышения грузооборота железнодорожного транспорта над автомобильным. Достижение сформулированной цели предполагает решение следующих основных задач: построение модели зависимо-

сти превышения грузооборота железнодорожного транспорта над автомобильным от года доставки груза; проверку качества модели; точечный и интервальный прогнозы.

Следует заметить, что на процесс перевозки груза оказывают много негативных, как внутренних, так и внешних случайных факторов. Именно их влияние не позволяет своевременно, в плановые сроки доставлять груз. Поэтому при проведении сравнительного прогноза грузооборота железнодорожного и автомобильного транспорта необходимо учитывать тот факт, что грузооборот является случайной величиной. Это требует применения прогнозного аппарата, который позволит оценивать не только точечную, но и интервальную сравнительную динамику. В настоящей работе для проведения исследования сравнения грузооборота двух базовых транспортов в РФ используется методика [2].

Железная дорога и автомобильный транспорт постоянно проводят мониторинг доставки груза. Количественные величины грузооборотов железной дорогой ОАО «РЖД» и автомобильного транспорта, достигнутые за 18 лет, согласно годовым отчетам журнала «Транспорт России» за период с 2004 по 2021 год [3], а также вычисленное превышение первого над вторым, представлены в табл. 1.

Используя представленные в табл. 1 превышения грузооборота железнодорожного транспорта над автомобильным, вычисленные по статистическим данным обеих транспортов, и применяя принятый математический аппарат, реализованный в Excel, были построены линейная, степенная и показательная регрессионные модели. На рис. 1 представлены значения превышения наблюдаемого грузооборота по годам, график линейной модели, ее аналитический вид и коэффициент детерминации.

ТАБЛИЦА 1. Динамика грузооборота за 2004–2021 годы*, млрд т·км

Год доставки груза	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Порядковый номер года	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Грузооборот железнодорожного транспорта, млрд т·км	1802	1856	1951	2090	2116	1865	2 011	2128	2222
Грузооборот автомобильного транспорта, млрд т·км	182	194	199	206	216	180	199	223	249
Превышение грузооборота ж/д транспорта над автомобильным	1620	1662	1752	1884	1900	1685	1812	1905	1973
Год доставки груза	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Порядковый номер года	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Грузооборот железнодорожного транспорта, млрд т·км	2196	2301	2 306	2344	2493	2598	2 602	2 545	2 639
Грузооборот автомобильного транспорта, млрд т·км	250	247	247	248	255	259	275	272	285
Превышение грузооборота железной дороги над автомобильным транспортом	1946	2054	2059	2096	2238	2339	2327	2273	2354

Источник: годовые отчеты журнала «Транспорт России» за 2004–2021 годы.

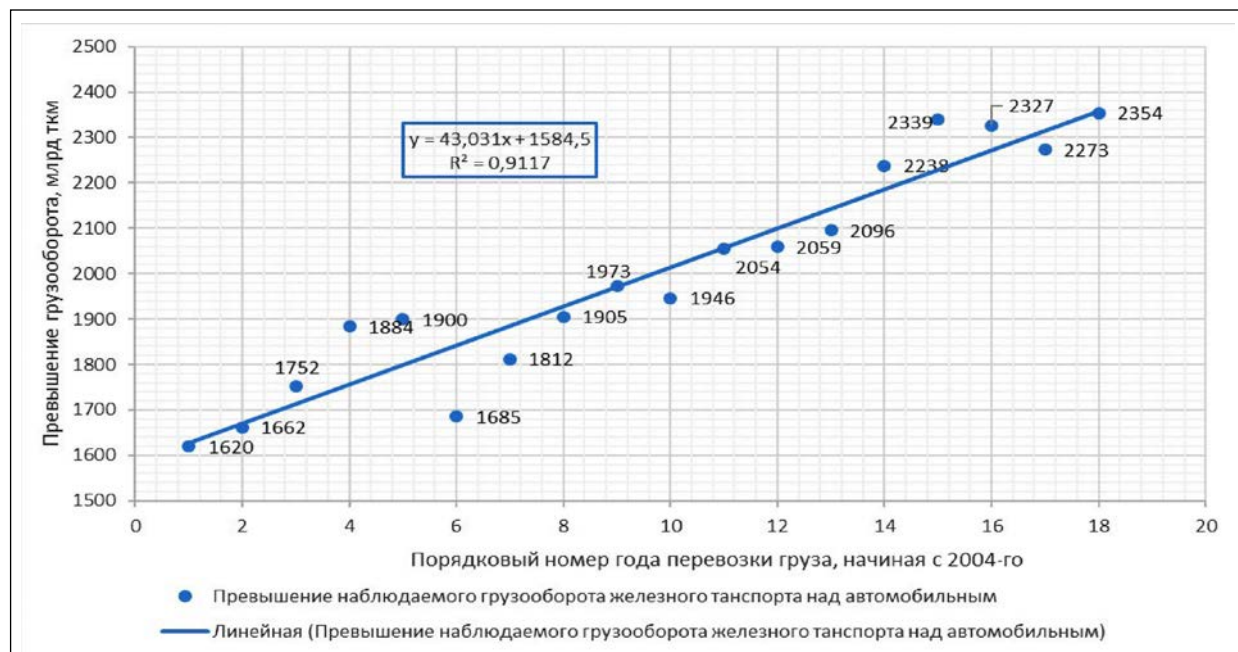


Рис. 1. Линейная модель динамики превышения наблюдаемого грузооборота

На основании опытных и модельных значений превышения грузооборота в табл. 2 приведены вычисленные значения по годам транспортировки грузов, локальные абсолютные и относительные погрешности.

Сравнение показало, что максимальная и средняя величины относительной по-

грешности составляют соответственно 8,56 и 2,1 %. Более детальный анализ погрешностей позволил сделать заключение об удовлетворительных результатах по данному качеству линейной модели и выбрать ее для дальнейших исследований как наиболее простую.

ТАБЛИЦА 2. Основные показатели грузооборота по годам автомобильным и ж/д транспортом

Год доставки груза	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Порядковый номер года	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Реальное значение превышения грузооборота железнодорожного транспорта над автомобильным, млрд т·км	1620	1662	1752	1884	1900	1685	1812	1905	1973
Модельная величина превышения грузооборота железнодорожного транспорта над автомобильным, млрд т·км	1628	1671	1714	1757	1800	1843	1886	1929	1972
Абсолютная погрешность, млрд т·км	8	9	38	127	100	158	74	24	1
Абсолютная погрешность, %	0,46	0,51	2,24	7,25	5,58	8,56	3,91	1,23	0,06
Год доставки груза	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Порядковый номер года	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Реальное значение превышения грузооборота железнодорожного транспорта над автомобильным, млрд т·км	1946	2054	2059	2096	2238	2339	2327	2273	2354
Модельная величина превышения грузооборота железнодорожного транспорта над автомобильным, млрд т·км	2015	2058	2101	2144	2187	2230	2273	2316	2359
Абсолютная погрешность, млрд т·км	69	4	42	48	51	109	54	43	5
Абсолютная погрешность, %	3,41	0,19	1,99	2,23	2,34	4,89	2,38	1,86	0,21

Проведена также оценка качества моделирования с помощью коэффициента детерминации [4]. Его значение, равное 0,9117 (рис. 1), свидетельствует, что связь между значениями превышения грузооборота железнодорожного над автомобильным транспортом и годом перевозки груза, вычисленные по модели, достаточно тесная. Для проверки качества модели использован также инструмент «Регрессия» надстройки

«Пакет анализа» [5]. Его применение позволило установить выборочные коэффициенты корреляции и детерминации, разложения общей суммы квадратов на объясненную и остаточную, а также значения регрессионных параметров и расчетное значение критерия Фишера, величина которого свидетельствует о значимой модели. Основные величины в результате применения «Пакета анализа», представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Выборочные значения параметров моделирования линейной функцией регрессии

Коэффициенты регрессии		Коэффициент корреляции	Коэффициент детерминации	Табличное значение статистики Фишера
43,03	1584,48	0,9548	0,9117	165,27
Суммы квадратов разностей		Общая	Факторная	Остаточная
		983 981,6	897 131	86 850,65
Суммы квадратов разностей на одну степень свободы		Общая	Факторная	Остаточная
		57 881,2	897 131	5428,1

Полученное расчетное значение критерия Фишера существенно превышает табличное. Следовательно, построенная модель является значимой. Построенная модель была также подвергнута верификации путем вычисления погрешностей между превышением наблюдаемого грузооборота в 2022 и 2023 годах, которые не участвовали в построении модели, и значениями модельных превышений в эти годы (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Абсолютная и относительная погрешности превышения грузооборота в годы, подлежащие верификации

Годы	Наблюдаемое превышение	Модельное превышение	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность, %
2022	2346	2488,13	142,13	6,1
2023	2490	2531,16	41,16	1,7

Из табл. 4 следуют относительно незначительные величины абсолютных и относительных погрешностей, что подтверждает хорошее качество модели в виде линейной функции регрессии, построенной по наблюдаемым статистическим данным.

Качество построенной модели (функции регрессии) позволило использовать ее для прогнозных расчетов, а именно установить величины превышения грузооборота железнодорожного транспорта над автомобильным в 2024

и 2025 годах. Для этого в дальнейшем через T^* принято обозначение за прогнозируемый год перевозки груза, а через $\hat{Y}(T^*)$ — ожидаемое значение превышения грузооборота железнодорожного транспорта над автомобильным. Тогда прогнозное значение превышения грузооборота железнодорожного над автомобильным транспортом можно вычислить по построенной функции регрессии. На числовой оси это значение моделируется в виде точки, а поэтому часто такой прогноз называют точечным.

На практике при многократном проведении одной и той же доставки груза расчетная величина достигается с некоторым разбросом, то есть является случайной величиной. Это позволяет при оценках грузооборота считать точечный прогноз средним значением, для которого в расчетах определена дисперсия. Именно она позволила ввести интервальную прогнозную оценку. В работе точечный расчет превышения грузооборота железнодорожного транспорта над автомобильным $\hat{Y}(T^*)$ дополнен выражением интервальной оценки прогнозируемого значения следующего вида:

$$YL = \hat{Y}(T^*) - m_{Y(T^*)} \leq Y^* \leq \hat{Y}(T^*) + m_{Y(T^*)} = YP$$

В приведенном интервальном прогнозном условии величина $m_{Y(T^*)}$ выступает смещением относительно точечного прогнозного значения [4]. Она формирует

нижнюю YL и верхнюю YP границы доверительного интервала.

Результаты расчета точечного (среднего) значения и границ доверительного интервала превышения грузооборота железнодорожного транспорта над автомобильным в млрд т·км для прогнозных годов приведены в табл. 5 и представлены на рис. 2.

На рис. 2 представлены подмножество наблюдаемых значений и часть линейной модели из рис. 1; вычисленные по модели значения превышения грузооборота, предназначенные для верификации; значения точечного прогноза; значения верхней и нижней границ доверительного интервала интервального прогноза.

ТАБЛИЦА 5. Значения превышения грузооборота по точечному и интервальному прогнозу на 2022 и 2025 годы, млрд т·км

Показатель	Год/порядковый номер года			
	2022/19	2023/20	2024/21	2025/22
Точечный прогноз	2402	2445	2488	2531
Доверительный интервал	301	306	311	317
Нижняя граница доверительного интервала $YL = \hat{Y}(T^*) - m_{Y(T^*)}$	2252	2292	2332	2373
Верхняя граница доверительного интервала $YP = \hat{Y}(T^*) + m_{Y(T^*)}$	2553	2598	2644	2690

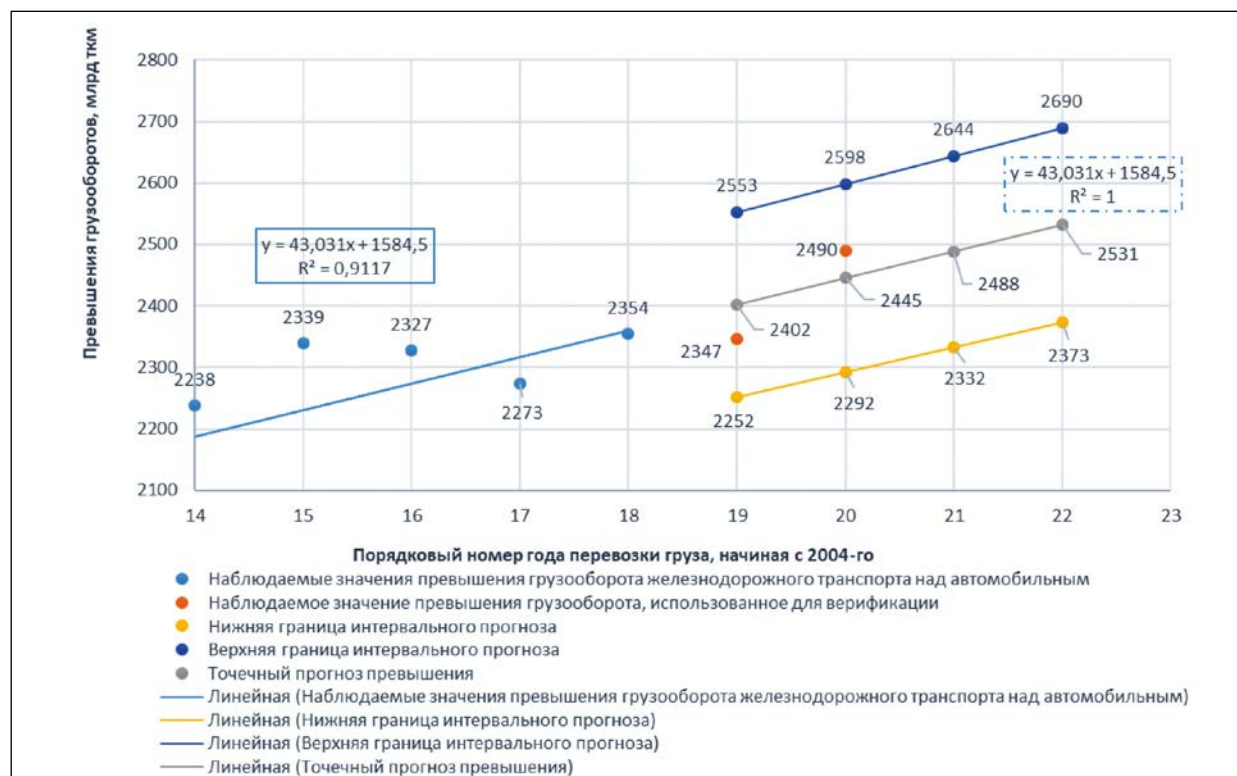


Рис. 2. Графики и значения точечного и интервального прогнозов

Таким образом, представленные результаты проведенного исследования позволяют проводить планирование отношения грузооборотов. По положению показателя планового значения грузооборота внутри доверительного интервала интервального прогноза позволяет определить критическую область и вероятность недостижения плана, то есть показатель риска его выполнения [5].

Библиографический список

1. Табах А. В., Подругина А. В. Транспорт и логистика: переориентация направлений и изменения в структуре // *Промышленность*, 2023.
2. Кударов Р. С., Герасименко П. В. Мониторинг пассажиропотоков, формирующих входной пассажиропоток на станции «Пушкинская» в часы пик // *Сборник: Шаг в будущее. Неделя науки – 2006: материалы научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / под ред. В. В. Сапожникова*. 2006. С. 189–191.
3. Тузов К. А., Сабельников И. Е. Грузовые перевозки в России: обзор текущей статистики // *Бюллетень о текущих тенденциях российской экономики*. № 53 [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (дата обращения: 25.06.2023).
4. Герасименко П. В. Метод моделирования риска при повышении стоимости услуг // *Известия Международной академии наук высшей школы*. 2011. № 2 (56). С. 64–70.
5. Герасименко П. В. Оценка показателей управленческого риска при прогнозировании результатов производственной деятельности предприятия // *Вестник Приднестровского университета. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление*. 2012. № 3 (42). С. 134–141.

Дата поступления: 07.05.2024

Решение о публикации: 28.05.2024

Контактная информация:

ГЕРАСИМЕНКО Петр Васильевич — доктор техн. наук, профессор; pv39@mail.ru

Comparison of annual railway freight turnover and automobile transport of the Russian Federation: modeling, verification, point and interval forecast

P. V. Gerasimenko

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

For citation: Gerasimenko P. V. Comparison of annual railway freight turnover and automobile transport of the Russian Federation: modeling, verification, point and interval forecast // *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 2. P 517–524. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-517-524

Abstract

Purpose: a study was conducted comparing the freight turnover of rail and road transport in the Russian Federation over the last twenty years and a forecast assessment was made. The comparative assessment was carried out due to the excess of freight turnover by rail over road transport. The study includes the following main stages: modeling based on the observed annual values of cargo turnover; model verification by comparing model and experimental values in years not involved in the construction of the model; model point and interval forecasting; analysis of the forecast trend of changes. The mathematical model

of the excess of freight turnover by rail over road transport from the year of cargo delivery is based on a sample of statistical data from Rosstat from 2004 to 2021. The model was verified based on the results of cargo turnover in 2022 and 2023. **Methods:** to build a mathematical model, test it and carry out forecasting, a number of theoretical provisions of econometrics were used, including dynamic series, regression analysis, the least squares method, point and interval forecasting. The applied calculation apparatus was used using the Excel PPP. **Results:** the quality of the constructed model was evaluated by the following indicators: approximation errors, correlation and determination coefficients, and the Fisher criterion. A comparison of the observed and model values of excess cargo turnover showed that in the period from 2004 to 2021, according to the above indicators, they have minor deviations. The verification performed confirmed the satisfactory simulation. **Practical significance:** the conducted research has shown that it is possible to predict the results of transport operations according to the described algorithm and it is justified to make management decisions at the beginning of their implementation. **Recommendations:** to continue improving the modeling and forecasting apparatus, taking into account the assessment of risk indicators.

Keywords: modeling, forecasting, estimation, regression, coefficient of determination, point and interval estimation, risk.

References

1. Tabah A. V., Podrugina A. V. Transport i logistika: pereorientatsiya napravlenij i izmeneniya v strukture // Promyshlennost', 2023. (In Russian)
2. Kudarov R. S., Gerasimenko P. V. Monitoring passazhiropotokov, formiruyushchih vhodnoj passazhiropotok na stantsii "Pushkinskaya" v chasy pik // Sbornik: Shag v budushchee. Nedelya nauki – 2006: materialy nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh / pod red. V. V. Sapozhnikova. 2006. S. 189–191. (In Russian)
3. Tuzov K. A., Sabel'nikov I. E. Gruzovye перевозки в России: обзор текущей статистики // Byulleten' o tekushchih tendentsiyah rossijskoj ekonomiki. № 53 [Elektronnyj resurs]. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (data obrashcheniya: 25.06.2023). (In Russian)
4. Gerasimenko P. V. Metod modelirovaniya riska pri povyshenii stoimosti uslug // Izvestiya Mezhdunarodnoj akademii nauk vysshej shkoly. 2011. № 2 (56). S. 64–70. (In Russian)
5. Gerasimenko P. V. Ocenka pokazatelej upravlencheskogo riska pri prognozirovanii rezul'tatov proizvodstvennoj deyatel'nosti predpriyatiya // Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki. Ekonomika i upravlenie. 2012. № 3 (42). S. 134–141. (In Russian)

Received: 07.05.2024

Accepted: 28.05.2024

Author's information:

Petr V. GERASIMENKO — D. Sci. in Engineering, Professor; pv39@mail.ru



УДК 654+004

Вопросы организации «умного поезда милосердия»

А. В. Татаренко², Е. В. Казакевич¹, А. А. Привалов¹, С. А. Лопатин²

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

²Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины Министерства обороны Российской Федерации (ГНИИИ ВМ МО РФ), 195043, Санкт-Петербург, ул. Лесопарковая, 4

Для цитирования: Татаренко А. В., Казакевич Е. В., Привалов А. А., Лопатин С. А. Вопросы организации «умного поезда милосердия» // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 525–536. DOI: 110.20295/1815-588X-2024-02-525-536

Аннотация

Статья посвящена проблеме цифровизации санитарных поездов, которые обеспечивают проведение этапа медицинской эвакуации пострадавших в чрезвычайных ситуациях. С целью повышения качества лечебно-диагностических мероприятий на пути следования и применения существующих цифровых медицинских сервисов необходимо создать «умный поезд милосердия» (УПМ), оснащенный современными информационными и телекоммуникационными средствами. Информационно-аналитическое пространство «умного поезда милосердия» должно рассматриваться обязательным медицинским сегментом центра обработки данных медицинской службы силовых структур, который планируется в качестве базового элемента создаваемой в стране Единой военно-медицинской информационной системы. **Актуальность:** на этапе цифровой трансформации ОАО «РЖД» обеспечение своевременности и повышения эффективности медицинской эвакуации пострадавших возможно с помощью создания «умного поезда милосердия», использующего существующие решения для объектов интеллектуальной транспортной системы. Выбор оборудования интеллектуальной транспортной системы определяется объемом и видом информации медицинского и административного характера. **Цель:** оценить прогнозируемые информационные потоки и функциональные потребности умного средства медицинской эвакуации железнодорожным транспортом в чрезвычайных ситуациях. **Методы:** использовались методы экспертного опроса, системного анализа и теории исследования операций. **Результаты:** представлен анализ существующих решений для создания умного средства медицинской эвакуации железнодорожным транспортом. Ранжированы внутренние и внешние потоки информации, получаемые начальником поезда милосердия, которые нуждаются в особой технической поддержке (средствах связи). Определено место интегрированной персональной электронной медицинской карты на этапах медицинской эвакуации в рамках Единой военно-медицинской информационной системы. Определены результаты создания цифрового «умного поезда милосердия». **Практическая значимость:** учет оценки прогнозируемых информационных потоков и функциональных потребностей пользователей средств связи в УПМ позволил определить требуемые виды связи и скорость передачи информации для реализации функций пользователей средств связи, что поможет в дальнейшем рассчитать среднюю абонентскую нагрузку на сеть связи УПМ.

Ключевые слова: медицинская эвакуация железнодорожным транспортом, информационные потоки, умный объект, интеллектуальная система, искусственный интеллект.

Введение

Мировой опыт проникновения цифровых технологий в транспортную отрасль показывает рост количества внедрений интеллектуальных систем на железнодорожном транспорте, которые повышают безопасность организации перевозок и обеспечивают эффективность использования человеческих и транспортных ресурсов [1–2].

Стратегия перспективного развития транспортной отрасли России [3] нацелена на создание единого транспортного пространства с использованием эффективной транспортной инфраструктуры на базе интеллектуальных транспортных систем. В данном направлении активная работа по созданию и внедрению данных систем на железнодорожном транспорте проводится отраслевыми научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими институтами.

Таким образом, в рамках цифровизации железнодорожного транспорта расширение возможностей телекоммуникационной инфраструктуры и использование искусственного интеллекта обеспечивает создание качественно нового уровня управления технологическим процессом перевозок. [4–7]. Поэтому «умный поезд милосердия» (УПМ) на этапе создания и эксплуатации должен рассматриваться как объект интеллектуальной транспортной системы ОАО «РЖД», интегрирующий современные информационные и телекоммуникационные технологии.

Существующие технические решения для умного средства медицинской эвакуации железнодорожным транспортом

Во-первых, «умный поезд милосердия» должен использовать интеллектуальную

транспортную базу, состоящую из умного локомотива и умных вагонов.

Понятие «умный подвижной железнодорожный состав» раскрыто на примере грузового поезда [7, 10, 11], который представлен как состав, обладающий свойствами автоматического контроля технического состояния ответственных и ходовых частей высокотехнологичными устройствами с оценкой их функционирования и безопасности, имеющий внутripоездной беспроводный канал обмена телемеханической информацией, а также внешние радиоканалы для приема и передачи командной и известительной информации. Подобный постоянный контроль позволяет вовремя обнаружить проблему, подготовить мероприятия по ее устранению или даже снизить возможность ее возникновения прямым контролем и вовремя переданными данными.

Разработка и внедрение информационно-управляющего бортового комплекса для тягового и моторвагонного подвижных составов нового поколения, в котором одним из приоритетов является совершенствование средств автоматического вождения подвижного состава, должно способствовать повышению безопасности, надежности, энергоэффективности движения, а также комфортности пассажиров и снижению рисков, связанных с человеческим фактором [12]. При этом совершенствование системы «Умный локомотив» идет в направлении развития функционала уровней автоматизированной системы — от частичной и условной автоматизации к высокому уровню, а в перспективе к полной автоматизации. [9].

Во-вторых, «умный поезд милосердия» должен иметь расширенные

функциональные возможности использования современного медицинского оборудования, в том числе мобильного комплекса телемедицины и теледиагностики.

Перспективы создания «умного поезда милосердия» заложены в передвижных клиничко-диагностических центрах (ПКДЦ) «Российских железных дорог», таких как «Здоровье», «Хирург Николай Пирогов», «Терапевт Матвей Мудров», «Доктор Войно-Ясенецкий — Святитель Лука», «Академик Федор Углов».

Современные железнодорожные диагностические центры оборудованы специализированным медицинским оборудованием ультразвуковой и рентгенодиагностики, эндоскопии, флюоростанцией и профильными кабинетами врачей, а также имеют возможность через систему спутниковой связи организовать видеоконференцию для медицинских консультаций со специалистами ведущих клиник страны. Вагоны передвижных клиничко-диагностических центров оснащаются компьютерной сетью, связывающей все рабочие места медицинских работников и интеллектуальное специализированное медицинское оборудование в единую информационную систему.

Кроме того, в настоящее время железнодорожные медицинские службы уже имеют в оснащении специализированные варианты телемедицинского комплекса разной степени мобильности: переносной, на автомобильной базе и в вагоне поезда [13].

В-третьих, «умный поезд милосердия» должен иметь современные средства мониторинга системы жизнеобеспечения для поддержания оптимально комфортных условий, удовлетворяющих санитарно-

гигиеническим требованиям. С целью организации оптимальных условий для проведения лечебных мероприятий на базе УПМ необходимо создание специализированных условий: вагоны с реанимационным и хирургическим отделением должны иметь пониженный уровень механической вибрации, возможности поддержания индивидуального регулирования микроклимата и использование фильтра биологической очистки. Кроме того, вагоны должны быть экранированы для исключения воздействия внешних факторов, влияющих на работу медицинского оборудования, с контролем показателей электромагнитного поля [8–9].

Функциональные потребности умного средства медицинской эвакуации для информационной поддержки медицинских сервисов

В настоящее время в стране создается Единая военно-медицинская информационная система (ЕВМИС), в которой в качестве базового элемента планируется организация центра обработки данных (ЦОД) медицинской службы силовых структур РФ [14–15]. Поэтому информационно-аналитическая система УПМ должна рассматриваться как составная часть единой медицинской системы ЕВМИС.

В качестве индивидуальных информационных ресурсов пациента УПМ предлагается использовать интегрированные персональные электронные медицинские карты (ИПЭМК), которые применяются с первых этапов медицинской эвакуации (ЭМЭ) и в которые на УПМ с помощью программно-аппаратного комплекса (ПАК) планируется вводить дополнительную медицинскую информацию (рис. 1).

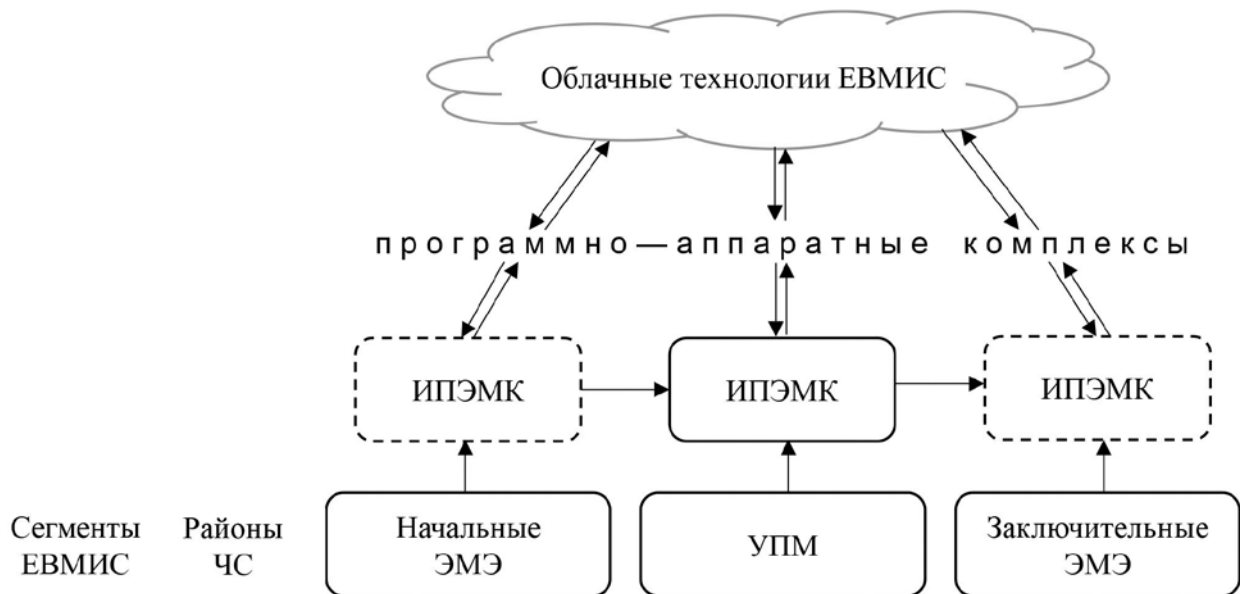


Рис. 1. Формирование ИПЭМК на этапах медицинской эвакуации в рамках ЕВМИС

Интегрированные персональные электронные медицинские карты предназначены для сбора первичной медицинской информации начиная с первых этапов эвакуации и, согласно ГОСТ Р 52636-2006 [16], имеют определенное медицинское содержание, в котором указываются состояние больного, диагноз, результаты анализа (обследования), причины возникновения болезни и др. В течение медицинской эвакуации железнодорожным транспортом ИПЭМК дополняется сведениями в том числе о проведенных в интересах пациента лечебно-диагностических мероприятиях.

Поэтому при практическом внедрении в работу УПМ цифровых технологий целесообразно учитывать, что передача данных о клинических показателях пациентов в информационно-аналитическое пространство обеспечивается с датчиков оборудования медицинского профиля

с целью оперативного вывода сведений на автоматизированное рабочее место медицинского персонала «поезда милосердия» и формирования ИПЭМК на этапе медицинской эвакуации железнодорожным транспортом с использованием клиент-серверных структур УПМ.

Анализ ранжирования потоков информации и требуемые виды связи

Анализ существующих технических решений для умного средства медицинской эвакуации железнодорожным транспортом и оценка функциональных потребностей УПМ для информационной поддержки медицинских сервисов показывают, что инфотелекоммуникационный комплекс (ИТК), предлагаемый для работы внутри УПМ, должен обеспечиваться информацией от разнообразных сенсоров, диагностирующих наиболее важные параметры функционирования мобильной

медицинской организации. Такой комплекс помогает начальнику УПМ отслеживать фактическое и прогнозное техническое состояние, условия жизнеобеспечения пациентов и персонала с целью эффективного управления медицинским железнодорожным комплексом.

В инфотелекоммуникационном комплексе организуется работа с потоками информации между должностными лицами УПМ [15]. Вопрос определения приоритетов потоков информации разного назначения, которые поступают на АРМ

должностных лиц, решался путем ранжирования. С этой целью был проведен экспертный опрос, результаты которого представлены на рис. 2.

К потокам информации высшего ранга, получаемым начальником УПМ, высококвалифицированные специалисты, участвующие в проведении медицинской эвакуации, отнесли информацию об условиях жизнеобеспечения пациентов и персонала в помещениях вагонов, а также информацию о запасах средств материального обеспечения.

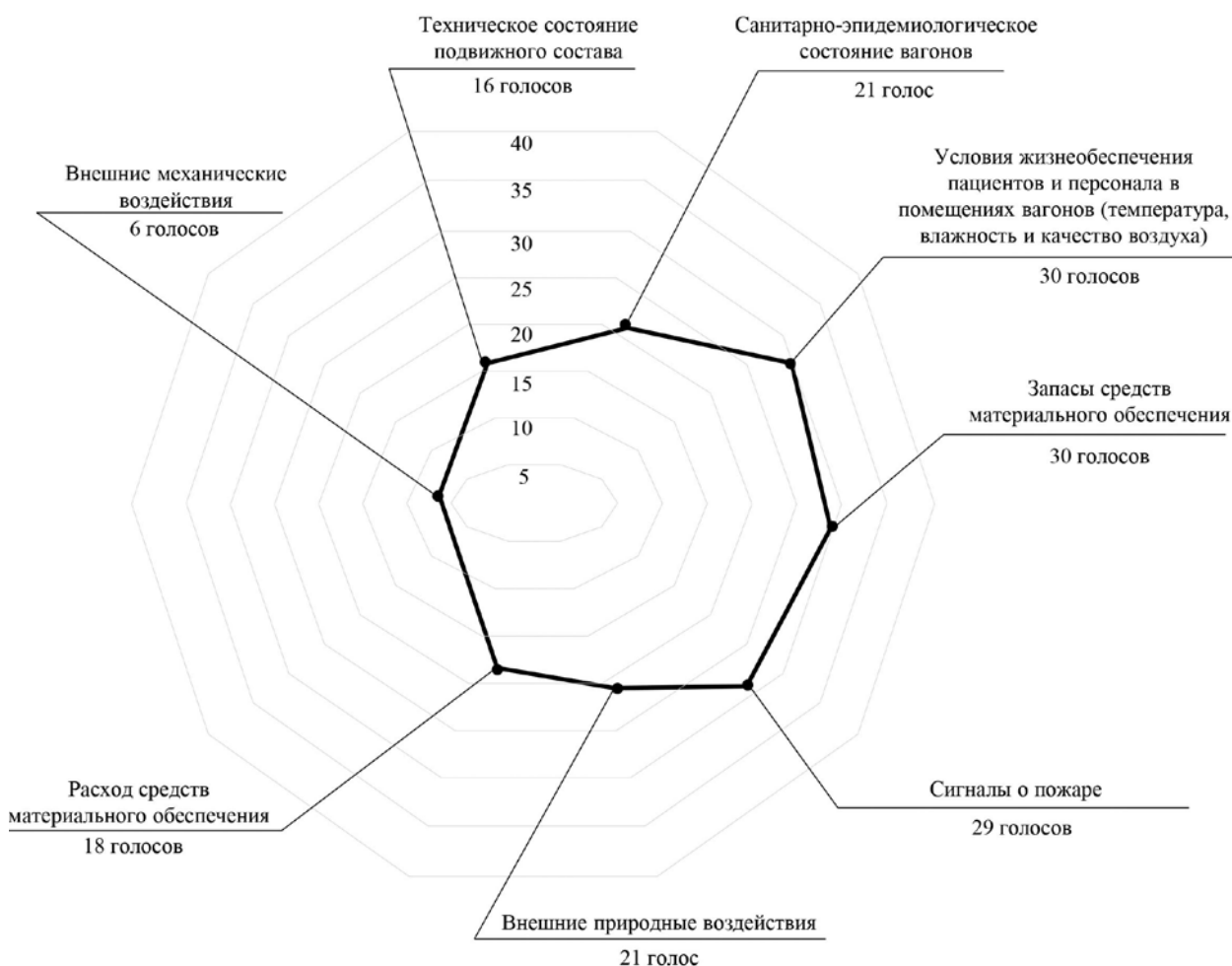


Рис. 2. Результаты ранжирования информационных потоков внутри поезда, получаемых начальником УПМ

Исследование организационной схемы внешнего взаимодействия начальника УПМ показывает, что аппаратура связи и ИТС в целом УПМ должна обеспечивать возможность установления связи с абонентами Минобороны, администраций РЖД и лечебных организаций Министерства здравоохранения. В этих целях начальник УПМ обязан оперативно решать ряд задач:

— представлять начальнику распределительного эвакуационного пункта приписки доклады и донесения по установленным формам, ежедневно информировать его о состоянии дел на УПМ и окончании выгрузки раненых (больных, пораженных), а также немедленно в случаях установления данных, приводящих к снижению работоспособности УПМ, изменения маршрута движения, обо всех нештатных ситуациях, требующих вмешательства вышестоящего командования;

— постоянно взаимодействовать с комендантом железнодорожного участка (станции), а там, где он отсутствует, — с начальником железнодорожного участка (станции) по вопросам движения, остановок и маршрутов следования УПМ, санитарно-эпидемиологического состояния на УПМ, некоторым видам обеспечения (заправка водой, откачка септиков и т. д.);

— через коменданта железнодорожного участка (станции) подавать заявки в службы тыла военного округа, на территории которого находится УПМ, на обеспечение имуществом тыла (горючими и смазочными материалами, вещевым имуществом, нательным бельем, постельными принадлежностями, продовольствием, в том числе не позднее чем за 6 часов до прибытия УПМ на станцию скоропортящимися продуктами и горячей пищей, на банно-прачечное обслуживание и ремонт вещевого имущества);

— представлять в медицинскую службу военного округа, на территории которого находится УПМ, необходимую медицинскую информацию, принимать меры по бесперебойному обеспечению недостающим медицинским имуществом и лекарственными средствами, осуществлять проведение санитарно-эпидемиологической обработки;

— в случае необходимости совместно с медицинской службой военного округа и руководством лечебных организаций Минздрава организовывать передачу раненых (больных, пораженных) в ближайшую лечебную организацию по пути следования УПМ;

— осуществлять взаимодействие с начальниками эвакуационных приемников в местах погрузки и выгрузки раненых (больных, пораженных) по вопросам, касающимся эвакуации (количество раненых, (больных, пораженных), степень тяжести, обмен данными санитарно-эпидемиологического состояния, прочая необходимая медицинская информация).

Анкетирование специалистов о значимости внешних донесений начальника УПМ показало, что первое место занимают сообщения об обеспеченности лекарственными препаратами и организации погрузки (выгрузки) раненых и больных (рис. 3).

Для организации связи в сложных условиях местности и обстановки чрезвычайной ситуации с учетом объема решаемых начальником УПМ задач телекоммуникационная сеть инфокоммуникационного комплекса должна обеспечивать предоставление должностным лицам требуемые услуги связи соответствующего качества для реализации заданных функций.

Виды связи и скорость передачи информации для реализации функций пользователей средств связи в УПМ представлены в табл. 1.

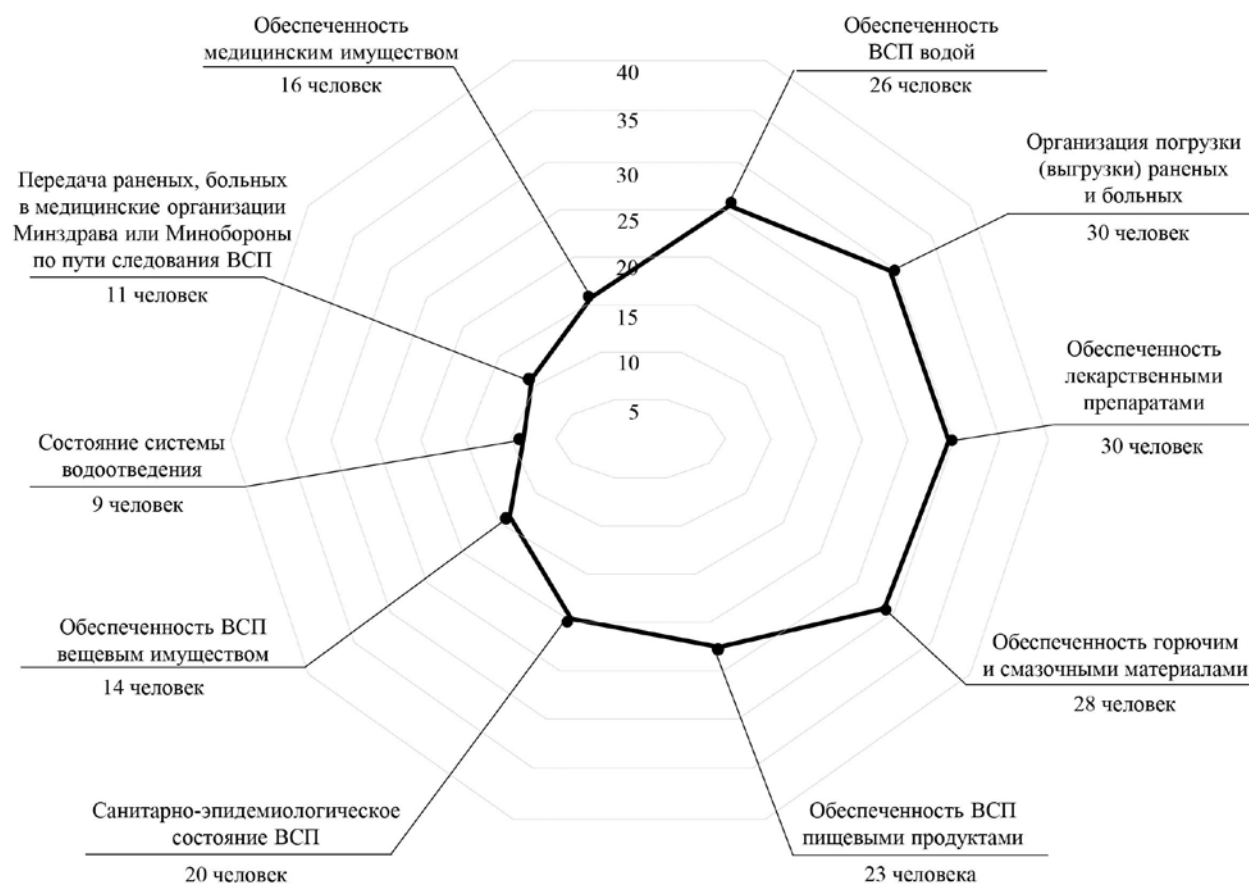


Рис. 3. Результаты ранжирования внешних информационных потоков, получаемых начальником УПМ

ТАБЛИЦА 1. Требуемые виды связи для реализации функций пользователей средств связи в УПМ

ДЛ/виды связи	Громкогов. связь, оповещение	Видео	ТЛФ	П.Д.	Эл. почта, файловый обмен	Навигационное оборудование
Начальник УПМ	+	+	+	+	+	+
Машинист	+	-	+	-	-	+
Нач. проводников	+	-	+	+	+	-
Нач. охраны	+	+	+	-	+	-
Нач. аптеки	+	-	+	+	+	
Ответственный за МТО, РХБЗ	+	-	+	+	+	-
Начальник связи, техник-инженер по эксплуатации средств связи	+	-	+	+	+	-
Врач (1 на вагон)/ медсестры (3 на вагон)	+	+	+/+	+	+	-
Скорость передачи информации, кбит/с	16	512	64	16	64	9,2

В качестве базовых средств связи УПМ с внешними абонентами рекомендуется использование штатного комплекса связи железнодорожных пассажирских поездов, который обеспечивает прием (передачу) информации в открытом сегменте, и мобильного комплекса связи, принятого на снабжение в силовых структурах, для обмена информацией в закрытом сегменте.

В качестве внешних абонентов начальника УПМ следует рассматривать органы военного управления и медицинские организации Минобороны, органы военных сообщений и администрацию железных дорог.

Анализ развития систем железнодорожной связи показывает, что «поезд милосердия» должен быть оборудован современным телекоммуникационным комплексом, обеспечивающим предоставление должностным лицам ресурсов сетей интегрального обслуживания (ЦИО), а также ведомственных цифровых ТКС [17].

Результаты использования инфотелекоммуникационного комплекса УПМ

Важным этапом совершенствования «поезда милосердия» является определение существенных свойств, показателей качества и эффективности мобильного железнодорожного объекта, по которым можно объективно судить о степени соответствия УПМ своему целевому предназначению. Поэтому с целью оценки качества инфотелекоммуникационного комплекса УПМ предлагается использовать понятие эффективности функционирования

мобильного железнодорожного объекта как системы, под которой понимается степень соответствия умного средства медицинской эвакуации ее целевому предназначению в заданных условиях функционирования [18].

На рис. 4 приведены три группы ожидаемых положительных эффектов от создания цифрового УПМ:

- первая — в системе управления УПМ;
- вторая — в совершенствовании лечебно-эвакуационных мероприятий;
- третья — в реализации элементов предиктивного функционирования.

Меры, направленные на улучшение системы управления, позволят оптимизировать число и функциональное предназначение вагонов, обеспечить надежную связь среди личного состава и организовать сбалансированное информационное обеспечение. Применение информационных технологий и средств телекоммуникаций позволит повысить качество лечебно-диагностических мероприятий за счет использования телемедицины и теледиагностики, мониторингования витальных показателей пострадавших и оказания им своевременной помощи, а также сокращения времени на погрузку и выгрузку больных.

Воплощение в жизнь элементов предиктивного функционирования УПМ гарантирует высокое техническое и его санитарно-эпидемиологическое состояние, снижение медицинских и сервисных затрат, высокую эффективность и реализацию некоторых творческих функций искусственного интеллекта УПМ.



Рис. 4. Эффекты от организации инфотелекоммуникационного комплекса УПМ

Заключение

«Умный поезд милосердия» должен рассматриваться как элемент цифровой интеллектуальной транспортной системы ОАО «РЖД», предполагающий возможность осуществления сбора, обработки, хранения различной информации — от контроля подвижного состава до данных о клинических показателях пациентов, а также телемедицины. Проведенный в статье анализ ожидаемых потоков информационного обмена показал, что эти потоки данных являются чрезвычайно разнородными как по перечню предоставляемых услуг связи, так и по адресности и категоричности. При этом только для реализации функций пользователей

поездная телекоммуникационная сеть должна обладать пропускной способностью не менее 700 кбит/с. Это может быть обеспечено при использовании перспективных мобильных комплексов связи, принятых на снабжение в силовых ведомствах, что, в свою очередь, позволит выполнить требования не только по своевременности и достоверности информационного обмена, но и его безопасности.

Библиографический список

1. Солнцев А. Мечты о беспилотных поездах и проза жизни // РЖД Партнер. 2020. №7. С. 52–54.
2. Нащекин А. Все идет к умной дороге, автономному транспорту и нулевой смертности //

Коммерсантъ. 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=209883>

3. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утв. Расп. Правительства РФ от 27.11.2021 года № 3363-р.

4. Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте // 4-я н.-техн. конф. «Компьютерное и математическое моделирование» ИСУЖТ-2015. М., 2015. С. 186.

5. Лапидус Б. М. О создании интеллектуальной мультимодальной транспортной системы России и проекта «Интеллектуальный контейнерный конвейер» // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79, № 5. С. 276–281.

6. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга). Расп. ОАО «Российские железные дороги» от 17 апреля 2018 года № 769/р.

7. Зайцева И. А., Шучева Е. М. Применение технологий цифровой экономики в стратегическом развитии железнодорожной инфраструктуры: сб. материалов X Международной научно-практ. конф. «Вызовы современности и стратегии развития общества в условиях новой реальности». М., 2022. С. 250–256.

8. Быстров В. В., Атьков О. Ю., Азаров А. В. и др. О деятельности железнодорожных передвижных консультативно-диагностических центров // Управление здравоохранением. 2014. № 1 (39). С. 66–72.

9. Распоряжение ОАО «РЖД» от 22 марта 2010 года «Об утверждении Положения о передвижных консультативно-диагностических центрах открытого акционерного общества «Российские железные дороги».

10. Зорин Е. Ю., Попов А. Э. Умный вагон как средство обеспечения безопасности движения поездов: сб. материалов XXVIII международной очно-заочной научно-практ. конф. «Исследование различных направлений современной науки: естественные и технические науки». М., 2023. С. 17–18.

11. Яшин М. Г., Данильченко Д. А. Способ обеспечения безопасности движения поездов с применением когнитивных технологий // Специальная техника и технологии транспорта. 2022. № 15. С. 164–169.

12. Юренко К. И., Харченко П. А., Юренко И. К. Умный локомотив как элемент интегрированной системы «Цифровая железная дорога» // Вестник молодежной науки России. 2019. № 1. С. 3–10.

13. Атьков О. Ю., Плохов В. Н., Быстров В. В. и др. Железнодорожная медицина сегодня // Управление здравоохранением. 2014. № 1 (39). С. 11–26.

14. Куандыков М. Г., Крайнюков П. Е., Столяр В. П. и др. Единая военно-медицинская информационная система медицинской службы Вооруженных сил: возможности создания и стратегия развития // Военно-медицинский журнал. 2020. № 12. С. 4–19.

15. ГОСТ Р 52636-2006 «Информатизация здоровья. Электронная медицинская карта. Электронная медицинская карта, используемая в медицинской организации».

16. Татаренко А. В., Казакевич Е. В., Привалов А. А. и др. Основные требования к средствам связи и информационной поддержке медицинской эвакуации железнодорожным транспортом // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2023. Т. 16, вып. 1. С. 25–34.

17. ГОСТ Р 52636-2006 «Информатизация здоровья. Электронная медицинская карта. Электронная медицинская карта, используемая в медицинской организации».

18. Горелов Г. В., Роенков Д. Н., Юркин Ю. В. Системы связи с подвижными объектами: учеб. пособие / под ред. Г. В. Горелова // М.: ФГБОУ «УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. 335 с.

19. Королев А. А., Пасхин С. М. Общее описание системы связи при управлении железнодорожными войсками // Региональные аспекты управления, экономики и права Северо-Западного федерального округа России. 2021. № 1 (52). С. 45–51.

Дата поступления: 24.03.2024

Решение о публикации: 25.05.2024

Контактная информация:

ТАТАРЕНКО Алексей Викторович —
pomnivm@mail.ru

КАЗАКЕВИЧ Елена Владимировна — канд. техн.
наук, доцент; kev-pgups@yandex.ru

ПРИВАЛОВ Андрей Андреевич —

докт. воен. наук, профессор; aprivalov@inbox.ru

ЛОПАТИН Станислав Аркадьевич — докт. мед.
наук, профессор; stanislav.lopatin47@yandex.ru

ISSUES RELATED TO THE ORGANIZATION OF THE “SMART MERCY TRAIN”

A. V. Tatarenko², E. V. Kazakevich¹, A. A. Privalov¹, S. A. Lopatin²

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

² State Research and Testing Institute of Military Medicine of the Ministry of Defense of the Russian Federation (GNII VM of the Ministry of Defense of the Russian Federation), 195043, St. Petersburg, Lesoparkovaya st., 4

For citation: Tatarenko A. V., Kazakevich E. V., Privalov A. A., Lopatin S. A. Issues related to the organization of the “smart mercy train” // *Proceedings of Petersburg Transport University*, . 2024. Vol. 21, iss. 2. P. 525–536. (In Russian). DOI: 110.20295/1815-588X-2024-02-525-536

Abstract

Annotation: the article is devoted to the problem of digitalization of sanitary trains, which ensure the stage of medical evacuation of victims in emergency situations. In order to improve the quality of medical and diagnostic measures along the route, and the use of existing digital medical services, it is necessary to create a “smart mercy train” (UPM) equipped with modern information and telecommunications facilities. **Relevance:** At the stage of the digital transformation of Russian Railways, ensuring the timeliness and efficiency of medical evacuation of victims is possible by creating a “smart mercy train” using existing solutions for objects of an intelligent transport system. The choice of equipment for an intelligent transport system is determined by the volume and type of information of a medical and administrative nature. **Objective:** To assess the projected information flows and functional needs of a “smart” means of medical evacuation by rail in emergency situations. **Methods:** Methods of expert survey, system analysis and theory of operations research were used. **Results:** An analysis of existing solutions for the creation of a “smart” means of medical evacuation by rail is presented. The internal and external information flows received by the head of the mercy train, which need special technical support (means of communication), are ranked. The place of the integrated personal electronic medical record at the stages of medical evacuation within the framework of the Unified Military Medical Information System has been determined. The results of the creation of a digital “smart mercy train” are determined. **Practical significance:** Taking into account the assessment of projected information flows and functional needs of communication users in the UPM made it possible to determine the required types of communication and the speed of information transfer for the implementation of the functions of communication users, which will further calculate the average subscriber load on the UPM communication network.

Keywords: medical evacuation by rail, information flows, smart object, intelligent system, artificial intelligence

References

1. Solncev A. Mechty o bespilotnyh poezdah i proza zhizni // RZHD Partner. 2020. №7. S. 52–54. (In Russian)
2. Nashchekin A. Vse idet k umnoj doroge, avtonomnomu transportu i nulevoj smertnosti // Kommersant.

2023. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=209883> (In Russian)

3. Transportnaya strategiya Rossijskoj Federacii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda, utv. Rasp. Pravitel'stva RF ot 27.11.2021 goda № 3363-r. (In Russian)

4. Intellektual'nye sistemy upravleniya na zhelezнодорожном транспорте // 4-ya n.-tekhn. konf. "Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie" ISUZHT-2015. M., 2015. S. 186. (In Russian)
5. Lapidus B. M. O sozdanii intellektual'noj mul'timodal'noj transportnoj sistemy Rossii i proekta "Intellektual'nyj kontejneryj konvejer" // Vestnik VNIIZHT. 2020. T. 79, № 5. S. 276–281. (In Russian)
6. Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya holdinga "RZHD" na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda (Belaya kniga). Rasp. OAO "Rossijskie zheleznyye dorogi" ot 17 aprelya 2018 goda № 769/r. (In Russian)
7. Zajceva I. A., Shucheva E. M. Primenenie tekhnologij cifrovoj ekonomiki v strategicheskom razvitii zhelezнодорожной инфраструктуры: sb. materialov X Mezhdunarodnoj nauchno-prakt. konf. "Vyzovy sovremenosti i strategii razvitiya obshchestva v usloviyah novoj real'nosti". M., 2022. S. 250–256. (In Russian)
8. Bystrov V. V., At'kov O. Yu., Azarov A. V. i dr. O deyatelnosti zhelezнодорожных передвижных konsul'tativno-dagnosticheskikh centrov // Upravlenie zdorvoohraneniem. 2014. № 1 (39). S. 66–72. (In Russian)
9. Rasporyazhenie OAO "RZHD" ot 22 marta 2010 goda "Ob utverzhenii Polozheniya o передвижных konsul'tativno-dagnosticheskikh centrakh otkrytogo akcionernogo obshchestva "Rossijskie zheleznyye dorogi". (In Russian)
10. Zorin E. Yu., Popov A. E. Umnyj vagon kak sredstvo obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov: sb. materialov XXVIII mezhdunarodnoj ochno-zaochnoj nauchno-prakt. konf. "Issledovanie razlichnyh napravlenij sovremennoj nauki: estestvennye i tekhnicheskie nauki". M., 2023. S. 17–18. (In Russian)
11. Yashin M. G., Danil'chenko D. A. Sposob obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov s primenением kognitivnyh tekhnologij // Special'naya tekhnika i tekhnologii transporta. 2022. № 15. S. 164–169. (In Russian)
12. Yurenko K. I., Harchenko P. A., Yurenko I. K. Umnyj lokomotiv kak element integrirovannoj sistemy "Cifrovaya zheleznyaya doroga" // Vestnik molodezhnoj nauki Rossii. 2019. № 1. S. 3–10. (In Russian)
13. At'kov O. Yu., Plovov V. N., Bystrov V. V. i dr. Zhelezнодорожная медицина сегодня // Upravlenie zdorvoohranением. 2014. № 1 (39). S. 11–26. (In Russian)
14. Kuandykov M. G., Krajnyukov P. E., Stolyar V. P. i dr. Edinaya voenno-medicinskaya informacionnaya sistema medicinskoj sluzhby Vooruzhennyh sil: vozmozhnosti sozdaniya i strategiya razvitiya // Voенно-medicinskij zhurnal. 2020. № 12. S. 4–19. (In Russian)
15. GOST R 52636-2006 "Informatizaciya zdorov'ya. Elektronnaya medicinskaya karta. Elektronnaya medicinskaya karta, ispol'zuemaya v medicinskoj organizacii". (In Russian)
16. Tatarenko A. V., Kazakevich E. V., Privalov A. A. i dr. Osnovnye trebovaniya k sredstvam svyazi i informacionnoj podderzhke medicinskoj evakuacii zhelezнодорожным transportom // Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. SPb.: PGUPS, 2023. T. 16, vyp. 1. S. 25–34. (In Russian)
17. GOST R 52636-2006 "Informatizaciya zdorov'ya. Elektronnaya medicinskaya karta. Elektronnaya medicinskaya karta, ispol'zuemaya v medicinskoj organizacii". (In Russian)
18. Gorelov G. V., Roenkov D. N., Yurkin Yu. V. Sistemy svyazi s podvizhnymi ob'ektami: ucheb. posobie / pod red. G. V. Gorelova // M.: FGBOU "UMC po obrazovaniyu na zhelezнодорожном транспорте", 2014. 335 s. (In Russian)
19. Korolev A. A., Pashkin S. M. Obshchee opisanie sistemy svyazi pri upravlenii zhelezнодорожными vojskami // Regional'nye aspekty upravleniya, ekonomiki i prava Severo-Zapadnogo federal'nogo okruga Rossii. 2021. № 1 (52). S. 45–51. (In Russian)

Received: 24.03.2024

Accepted: 25.05.2024

Author's information:

Alexey V. TATARENKO — pomnivm@mail.ru

Elena V. KAZAKEVICH — PhD in Engineering, Associate Professor; Kazakevich@pgups.ru

Andrey An. PRIVALOV — Doctor of Military Sciences, Professor; Privalov@pgups.ru

Stanislav Ar. LOPATIN — Doctor of Medical

Sciences, Professor; stanislav.lopatin47@yandex.ru