

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 19, выпуск 4, 2022

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

Учредитель

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

Издатель

Общество с ограниченной ответственностью
«Издательский Центр РИОР» по договору
№ ЭАО09636 от 12.01.2022

Адрес учредителя

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

Адрес издателя

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

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

Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

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

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется

Индекс подписки Агентство «Книга-Сервис» 33315

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

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

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

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

РЕДКОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Фото на обложке предоставлено пресс-службой ФГБОУ ВО ПГУПС

Подписано в печать с оригинал-макета 19.12.2022.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 28,75.
300 экз. Заказ. Цена свободная.

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

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY,
volume 19, issue 4, 2022

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

Founder

Federal State Budgetary Educational Institution
of Higher Education "Emperor Alexander I Petersburg
State Transport University"

Publisher

Limited Liability Company
"Publishing Center RIOR" under contract
N ЭАО09636 dated December 01, 2022

Founder's address

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

Publisher's address

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

Mass media registration certificate number

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

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

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

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

The journal has the Peer-review division

The journal is destributed

Index Direct Mail Agency "Kniga-Service" 33315

JOURNAL STAFF

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

© Emperor Alexander I Petersburg
State Transport University, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

В. И. Штыков, А. Б. Пономарев

Бесполостная дрена составного профиля, усиленная дренажной трубой..... 665

Д. Г. Чарник

К вопросу эффективности применения различных марок сталей в конструкциях
быстровозводимых зданий и сооружений в северных климатических условиях
на территории Российской Федерации..... 677

В. Ф. Лапшин

Проблемы измерения потоков энергии излучения на объектах транспортной
инфраструктуры с излучающей плазмой..... 685

Н. Н. Богомолова

Определение точности геодезических измерений при реконструкции исторических
объектов..... 693

Т. Ю. Сафонова

Дизайн состава штукатурного раствора для реставрации каменных
и кирпичных памятников архитектуры..... 702

Н. А. Саноцкая, И. А. Беликов

Построение цифровой модели русла реки Пур в верховьях для обеспечения
техносферной безопасности на внутренних водных путях 712

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

А. А. Воробьев, А. А. Крутько, А. М. Бадамшин

Моделирование процессов термической обработки в модуле QFORM Heat Treatment..... 727

В. В. Никифоров, Г. И. Никифорова

Цифровизация железнодорожного транспорта с участием операторских компаний..... 736

А. М. Болдинов, А. А. Привалов

Математическая модель канала управления стандарта радиосвязи GSM-R 743

М. Ю. Изварин, В. Е. Андреев

Расчет кривой сцепления для проектирования противоюзных
и противобоксочных систем 752

С. П. Вакуленко, П. В. Куренков, Д. Ю. Роменский, К. А. Калинин, М. В. Роменская

Компоновка железнодорожного хозяйства перспективных грузовых деревьев 763

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Е. П. Дудкин, Д. В. Козлов, Я. С. Хомяков

Экспериментальные исследования колебаний трамвая «Витязь-М» 775

П. В. Бобарыкин, Н. Н. Богомолова, Т. М. Немченко

Комплексный мониторинг геологической среды в пределах горного отвода
строящегося тоннеля 783

Д. Д. Каримов

Снижение воздействия воздушного потока на токоприемное устройство скоростного
поезда с помощью аэродинамического обтекателя 793

О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. В. Трапенов, Т. В. Богачев, В. М. Задорожний

Конфигурирование терминально-складской инфраструктуры транспортного узла
на основе развития метода экономико-географического разграничения грузопотоков 800

В. В. Костенко, С. С. Смирнов, Д. В. Язев, И. П. Александров

Разработка алгоритма расчета наибольшего приведенного уклона
при закреплении вагонов на путях станций тормозными башмаками 812

С. Ван, А. Ф. Колос, А. В. Петряев

Математическое моделирование процесса промерзания грунтов земляного полотна
железных дорог в условиях холодного климата 820

М. Ш. Шадмонходжаев, А. П. Зеленченко, И. А. Ролле

Математическая модель колесно-моторного блока локомотива для условий технологического
процесса диагностирования подшипниковых узлов на позиции виброакустического контроля... 832

Н. В. Малышев, С. А. Бойков

Модель приоритетов обслуживания подач вагонов 839

В. В. Веселов

Работоспособность опор контактной сети на высокоскоростных железнодорожных
магистралях 847

Г. И. Паламарчук, О. В. Бородина, Н. В. Иванова

Архитектура системы сбора данных с датчиков контроля поведения пассажира
авиационного транспортно-логистического узла 856

А. К. Полянина

Государственное управление в области обеспечения благоприятной
информационной среды в общественном транспорте 867

М. А. Марченко, О. Д. Покровская, В. В. Щербаков

Разработка автоматизированного алгоритма для расчета пропускной способности
железнодорожной линии 876

CONTENTS

→ GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

V. I. Shtykov, A. B. Ponomaryev

Cavityless Drain of Composite Profile Reinforced with Drainage Pipe..... 675

D. G. Charnik

On Effectiveness Issue of Steel Various Grade Use in the Structures of Prefabricated
Constructions and Buildings in Northern Climatic Conditions on Russian Federation Territory..... 683

V. F. Lapshin

Problems of Radiation Energy Flux Measurement at Transport
Infrastructure Facilities with Radiating Plasma..... 691

N. N. Bogomolova

Accuracy Appointment for Geodetic Measurements
in Historical Object Reconstruction 700

T. Yu. Safonova

Plaster Mortar Composition Design for the Restoration of Stone
and Brick Architecture Monuments 710

N. A. Sanotskaya, I. A. Belikov

Building Digital Model of Riverbed Pur in Upper Reaches to Ensure
Technosphere Safety on Inland Waterways 725

→ HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

A. A. Vorobyov, A. A. Krutko, A. M. Badamshin

Modeling of Heat Treatment Processes in QFORM Heat Treatment Module 733

V. V. Nikiforov, G. I. Nikiforova

Digitalization of Railway Transport with the Participation of Operator Companies..... 741

A. M. Boldinov, A. A. Privalov

Mathematical Model for Control Channel of GSM-R Radiocommunication Standard 751

M. Yu. Izvarin, V. E. Andreev

Clutch Curve Calculation for Designing Anti-Skid and Anti-Slippage Systems 761

S. P. Vakulenko, P. V. Kurenkov, D. Yu. Romenskiy, K. A. Kalinin, M. V. Romenskaya

Arrangement of Railway Economics of Promising Freight Villages..... 772

→ **PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM**

E. P. Dudkin, D. V. Kozlov, Ya. S. Khomyakov

Experimental Studies of Tram "Vityaz-M" Vibrations 781

P. V. Bobarykin, N. N. Bogomolova, T. M. NemchenkoIntegrated Monitoring of Geological Environment in the Limits of Mining Allotment
of Being Constructed Tunnel..... 791**D. D. Karimov**

Reducing Air Flow Effect on High-Speed Train Current Collector with the Help of Aerodynamic Cow798

O. N. Chislov, V. A. Bogachev, V. V. Trapenov, T. V. Bogachev, V. M. ZadorozhniyConfiguring Terminal-Warehouse Infrastructure of Transport Hub Basing on the Development
of Method of Economic-Geographical Differentiation of Cargo Flows 810**V. V. Kostenko, S. S. Smirnov, D. V. Yazev, I. P. Alexandrov**Algorithm Development for Maximum Reduced Slope Calculation
at Car Securing on Station Railways by Braking Chairs 818**X. Wang, A. F. Kolos, A. V. Petriaev**

Mathematical Modeling of the Process of Soil Freezing of Railway Subgrade in Cold Climate Conditions.... 830

M. Sh. Shadmonkhodjaev, A. P. Zelenchenko, I. A. RolleMathematical Model of Locomotive Wheel-Motor Block for the Conditions of Diagnostics
Technological Process for Bearing Units at the Position of Vibroacoustic Control 837**N. V. Malyshev, S. A. Boikov**

Priority Model of Car Delivery Service 845

V. V. Veselov

Working Efficiency of Catenary Supports on High-Speed Railways 854

G. I. Palamarchuk, O. V. Borodina, N. V. IvanovaArchitecture of the System for Data Collection from Transducers for Behavior Monitoring
of the Passenger of Airborne Transport-Logistic Junction 864**A. K. Polyanina**Public Administration in the Field of Favorable Informational Environment Provision
in Public Transport..... 874**M. A. Marchenko, O. D. Pokrovskaya, V. V. Shcherbakov**

Development of Automated Algorithm for Railway Line Capacity Calculation 887



УДК 626.862.1

Бесполостная дрена составного профиля, усиленная дренажной трубой

В. И. Штыков, А. Б. Пономарев

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

Для цитирования: Штыков В. И., Пономарев А. Б. Бесполостная дрена составного профиля, усиленная дренажной трубой // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 665–676. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-665-676

Аннотация

Цель: Расчетное обоснование конструкции бесполостного дренажа, обеспечивающей эффективное осушение слабоводопроницаемых грунтов. Ранее была разработана методика гидравлического расчета бесполостной дрена составного профиля, закладываемой с уклоном, но без включения в нее дренажной трубы. Дренажная труба усиливает водоотводящую способность бесполостной дрена с сохранением всех остальных ее преимуществ. **Методы:** Использовано известное дифференциальное уравнение фильтрации жидкости в грунте. Особенно важно, что метод расчета может быть использован при всех режимах движения воды в дренаже: ламинарном, переходном или турбулентном. Для переходного и турбулентного режима применены зависимости, обоснованные экспериментами, проводившимися Северным научно-исследовательским институтом гидротехники и мелиорации. Сложная форма поперечного сечения дренажа учитывается с помощью специального коэффициента, который приводит ее к эквивалентному по площади прямоугольному сечению. Доказывается, что такой переход не приводит к значимой погрешности полученных результатов. **Результаты:** Получены зависимости, позволяющие рассчитать расходы, протекающие по бесполостной части дрена и по дренажной трубе. Если дрена имеет большую протяженность, то от нее целесообразно периодически отводить воду в поперечном направлении коллекторами. Выведены зависимости, по которым определяется расстояние между промежуточными коллекторами, куда вода поступает от дрена, закладываемых с уклоном и глубину воды в бесполостной части дрена в характерных сечениях. **Практическая значимость:** Бесполостной дренаж применяется в сельском хозяйстве, в системах инженерной защиты от подтопления и загрязнения окружающей среды. Бесполостные дрена составного профиля привлекли внимание железнодорожников: обеспечивая эффективное осушение земляного полотна, они одновременно увеличивают его несущую способность. Особенно эффективно его применение в слабоводопроницаемых грунтах при заложении в зону сезонного промерзания грунтов.

Ключевые слова: Бесполостная дрена, гидравлический расчет, дренаж, земляное полотно, составное сечение.

Введение

Бесполостные дренажи могут иметь круглое, прямоугольное, трапециевидное и треугольное поперечные сечения. Поперечное сечение может быть также составным, например, включающим в себя такие фигуры, как прямоугольник и трапецию. Поскольку в расчетах сечение дренажа в формулах характеризуется как одно целое, то подчеркнуть отличие такой дренажа можно, используя название: бесполостный дренаж составного профиля. Бесполостным дренажом уже применяется в сельском хозяйстве — в системах инженерной защиты от подтопления и загрязнения окружающей среды. В условиях эксплуатации железных дорог бесполостный дренаж может способствовать решению целого ряда проблем. Во-первых, на современном этапе увеличивается нагрузка от подвижного состава, что приводит к увеличению динамических напряжений в грунтах земляного полотна [1–4] и росту вибрации при прохождении грузовых составов [5]. При этом ранее было доказано, что бесполостным дренажом увеличивает несущую способность земляного полотна [6]. Наиболее технологичным является составной профиль, так как он может закладываться в один проход роторным экскаватором с уширителем (рис. 1).

На рис. 1 цифрой 1 показана водоотводящая труба.

В последние годы для увеличения несущей способности земляного полотна получили широкое

применение геоматериалы (геотекстиль, георешетки и геоячейки). При этом несущая способность земляного полотна увеличивается на 20–40 %.

Однако в случае слабоводопроницаемых грунтов в зависимости от интенсивности и продолжительности выпадающих осадков с помощью стандартных осушительных систем зачастую не представляется возможным поддерживать влажность в земляном полотне в оптимальных пределах. Переувлажнение же грунтов снижает их несущую способность. Для повышения эффективности осушения было предложено применить бесполостный дренаж, располагая дренажи в земляном полотне непосредственно под рельсошпальной решеткой. Оказалось, что при этом мы одновременно увеличиваем несущую способность грунта в 1,7–1,8 раза по сравнению с вариантом усиления земляного полотна с применением георешеток.

Наблюдаются деформации на участках железных дорог в северной зоне, в том числе связанные с избыточным увлажнением [7–10]. В районах сурового климата важно, чтобы в период оттаивания дренаж вступал в действие как можно раньше и сохранял работоспособность как можно дольше в течение года. Для бесполостного дренажа характерна высокая свободная пористость, которая обеспечивает его длительное незамерзание. Также существует проблема истирания балласта, частицы которого загрязняют слой, прилегающий

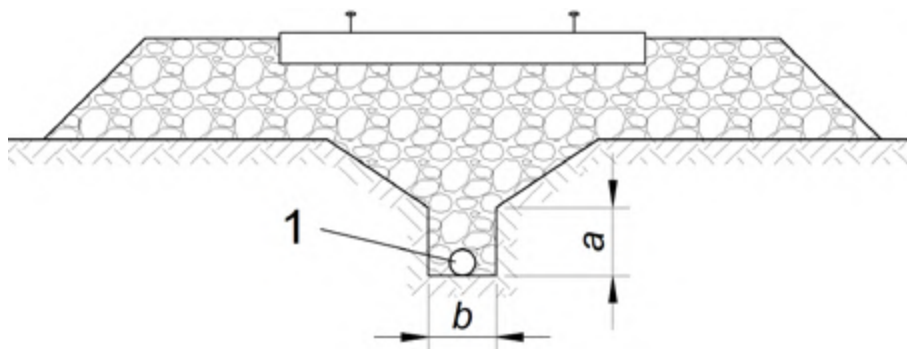


Рис. 1. Бесполостный дренаж составного профиля, усиленный трубой

Метод исследования

Примем, что в бесполостной части дрены (за исключением начального участка) имеет место переходный режим движения воды, а в трубчатой — турбулентный, включающий в себя все три области гидравлического сопротивления. При этом имеет место двустороннее впадение в коллекторы. Расчетная схема представлена на рис. 2.

Запишем уравнение движения в дифференциальной форме для произвольного сечения 1–1 бесполостной части дрены, напор (глубина) в котором равна h :

$$\begin{aligned} \frac{dh}{ds} = \pm i - \left(\frac{q_1 \cdot s}{K_l \cdot \omega} + \frac{q_1^2 \cdot s^2}{K_t^2 \cdot \omega^2} \right) = \\ = \pm i - \left\{ \frac{q_1 \cdot s}{K_l \cdot b \left[h + \frac{m}{b}(h-a)^2 - \frac{\pi d^2}{4b} \right]} + \right. \\ \left. + \frac{q_1^2 \cdot s^2}{K_t^2 \cdot b^2 \left[h + \frac{m}{b}(h-a)^2 - \frac{\pi d^2}{4b} \right]^2} \right\}, \quad (1) \end{aligned}$$

где q_1 — удельная приточность к бесполостной части дрены;

s — расстояние от истока дрены до рассматриваемого живого сечения;

ω — площадь живого сечения бесполостной части дрены в рассматриваемом сечении;

b — ширина бесполостной дрены по основанию;

a — высота прямоугольной части составного профиля дрены;

m — коэффициент откоса;

K_p, K_t — коэффициенты фильтрации заполнителя бесполостной дрены при ламинарном и турбулентном режимах соответственно;

i — уклон дна дрены (знак «+» — для левой части дрены, а «-» — для правой).

Уравнение (1) в таком виде не сводится ни к одному обыкновенному дифференциальному уравнению. Ранее аналогичная проблема имела место, когда мы рассматривали гидравлический расчет бесполостных дренажных труб трапецеидального поперечного сечения [15], не включающих в себя дренажную трубу. Дренажная труба при диаметре 0,05 м занимает менее 1 % от общей площади поперечного сечения бесполостной, и неучитывание этой части площади бесполостной дрены, занимаемой дренажной трубой, практически не сказывается на ее водоотводящей способности.

Как и ранее [14–16], воспользуемся заменой составного профиля на эквивалентное по площади живого сечения прямоугольное при одинаковой их высоте (глубине воды в них) h . Учитывая сказанное выше о влиянии неучета части площади живого сечения бесполостной дрены, занимаемой дренажной трубой, на ее водоотводящую способность, эквивалентная ширина прямоугольного поперечного сечения будет определяться зависимостью:

$$b_e = b + \frac{m \cdot \beta (h_0 - a)^2}{h_0}. \quad (2)$$

Здесь h_0 — глубина воды в бесполостной части дрены в начале координатных осей h и s . Так как глубина фильтрационного потока, а следовательно, и величина b_e изменяются, то это обстоятельство учитывается коэффициентом β [14–16]. Зависимость для определения величины β для составного профиля была получена ранее в работе [16].

$$\beta = \frac{2h_0}{3(h_0 + a)}. \quad (3)$$

Введем обозначения: $\frac{q_1}{K_l \cdot b_e} = U_l$; $\frac{q_1^2}{K_t^2 \cdot b_e^2} = U_t$;
 $\omega = b_e \cdot h$.

С учетом обозначений уравнение (1) запишем в следующем виде:

$$\frac{dh}{ds} = \pm i - \frac{U_l \cdot s}{h} - \frac{U_t \cdot s^2}{h^2}. \quad (4)$$

Было рассмотрено решение аналогичного уравнения для бесполостной дрены прямоугольного поперечного сечения, усиленного дренажной трубой, но при одностороннем впадении в коллекторы. При этом для уклона дна $i > 0$ было получено следующее решение для определения h_0 .

$$h_0 = L_1 \sqrt{\frac{(t_k^3 - i \cdot t_k^2 + U_l \cdot t_k + U_t)^{(1-F_1)}}{(t_k - K_1)^{(1-3F_1)}}} \times \exp \left[-\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2t_k + K_1 - i}{\sqrt{N_1}} \right) \right], \quad (5)$$

$$\text{где } t_k = \frac{h_k}{L_1}, \quad F_1 = \frac{K_1^2}{3K_1^2 - 2K_1 \cdot i + U_l}, \quad (6)$$

$$M = (1 - F_1) \frac{U_l}{K_1} + (1 - 3F_1) \frac{U_t}{K_1^2}, \quad (7)$$

$$N_1 = 4(K_1^2 + U_l) - (K_1 + i)^2, \quad (8)$$

$$K_1 = \frac{i}{3} - 2r \cdot \operatorname{sh} \left(\frac{1}{3} \operatorname{Arsh} \frac{P}{r^3} \right), \quad (9)$$

$$r = \sqrt{\frac{U_l}{3} - \left(\frac{i}{3} \right)^2}; \quad P = -\left(\frac{i}{3} \right)^3 + \frac{i \cdot U_l}{6} + \frac{U_t}{2}. \quad (10)$$

При расчете правой части дрены с обратным уклоном дна ($i < 0$) в формулах, содержащих уклон дна, знак перед i меняется на противоположный и вместо L_1 подставляется L_2 .

Расчет дренажной трубы, заложенной внутри бесполостной дрены с уклоном при одностороннем впадении в коллекторы, был рассмотрен ранее в [15]. При этом было принято, что напорная линия для бесполостной части дрены и линия

для перфорированной трубчатой практически совпадают, так как скорости перетекания из бесполостной части дрены в трубчатую составляют менее 0,1 м/с и местными потерями напора на отверстиях можно пренебречь.

С учетом сказанного дифференциальное уравнение неравномерного движения воды в дренажной трубе с двусторонним впадением в коллекторы, выраженное через глубину воды фильтрационного потока в бесполостной части дрены, будет иметь вид:

$$\frac{dh}{ds} = \pm i - \frac{8 \cdot \lambda_{mid} \cdot q_2^2 \cdot s^2}{\pi^2 \cdot d^5 \cdot g}, \quad (11)$$

где λ_{mid} — средняя величина коэффициента гидравлического трения в дренажной трубе;

q_2 — удельная приточность к дренажной трубе;

d — диаметр дренажной трубы.

В результате его решения получаем:

а) для левой части трубчатой дрены:

$$h_0 = h_k + \frac{8 \cdot \lambda_{mid} \cdot q_2^2 \cdot L_1^3}{3 \cdot \pi^2 \cdot d^5 \cdot g} - i \cdot L_1; \quad (12)$$

б) для правой части трубчатой дрены:

$$h_0 = h_k + \frac{8 \cdot \lambda_{mid} \cdot q_2^2 \cdot L_2^3}{3 \cdot \pi^2 \cdot d^5 \cdot g} + i \cdot L_2. \quad (13)$$

Результаты исследований

Ход расчета рассмотрим на примере.

Дано: материал заполнителя бесполостной дрены — щебень фракции 5–20 мм: $d_{17} = 1,2$ см; коэффициент неоднородности $\eta = 1,9$; пористость $n = 0,48$; коэффициент формы частиц $\psi = 1,68$; коэффициент Шези $C_0 = 78 \text{ см}^{0,5}/\text{с}$; кинематический коэффициент вязкости $\nu = 0,0131 \text{ см}^2/\text{с}$; коэффициент откоса $m = 1,5$; $b = 0,4$ м; $a = 0,4$ м; $L_1 = 60$ м; $h_k = d = 0,005$ м; удельный приток $q = 9 \text{ м}^2/\text{сут}$; диаметр трубы $d = 0,05$ м; $\lambda_{mid} = 0,04$; $i = 0,003$.

Определить $h_{\max}$, L_2 , h_0 , q_1 , q_2 .

1. Определяем величину расчетного диаметра фильтрационного хода d_u [16]:

$$d_u = 0,57 \sqrt[6]{\eta} \frac{n}{1-n} \cdot \frac{d_{17}}{\psi} =$$

$$= 0,57 \sqrt[6]{1,9} \frac{0,48}{1-0,48} \cdot \frac{1,2}{1,68} = 0,42 \text{ см.}$$

2. Вычисляем коэффициенты фильтрации при ламинарном и турбулентном режимах [16].

При ламинарном режиме:

$$K_l = \frac{n \cdot g \cdot d_u^2}{8\pi^2 \cdot v} = \frac{0,48 \cdot 9,81 \cdot 0,0042^2}{8 \cdot 3,14^2 \cdot 0,0131 \cdot 10^{-4}} =$$

$$= 0,803 \text{ м/с.}$$

При турбулентном режиме:

$$K_t = \frac{n \cdot C_0}{\pi^{3/2}} \sqrt{2d_u} = \frac{0,48 \cdot 78}{3,14^{3/2}} \sqrt{2 \cdot 0,42} =$$

$$= 6,16 \text{ см/с или } 0,0616 \text{ м/с.}$$

3. Задаемся в первом приближении некоторым значением h_0 , например, равным 0,94 м. При данном значении h_0 по формуле (12) вычисляем q_2 :

$$q_2 = \sqrt{\frac{3 \cdot \pi^2 \cdot d^5 \cdot g (h_0 - h_k + i \cdot L_1)}{8 \cdot \lambda_{\text{mid}} \cdot L_1^3}} =$$

$$= \sqrt{\frac{3 \cdot 3,14^2 \cdot 0,05^5 \cdot 9,81 (0,94 - 0,05 + 0,003 \cdot 60)}{8 \cdot 0,04 \cdot 60^3}} =$$

$$= 0,374 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с.}$$

4. Соответственно:

$$q_1 = q - q_2 = 1,04 \cdot 10^{-4} - 0,374 \cdot 10^{-4} =$$

$$= 0,666 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с.}$$

5. Вычисляем параметры: U_l , U_t , β , b_e , K_1 , Φ_1 , M , N_1 и t_k .

$$t_k = \frac{0,05}{60} = 0,000833;$$

$$\beta = \frac{2h_0}{3(h_0 + a)} = \frac{2 \cdot 0,94}{3(0,94 + 0,4)} = 0,47;$$

$$b_e = b + \frac{m \cdot \beta \cdot (h_0 - a)^2}{h_0} =$$

$$= 0,4 + \frac{1,5 \cdot 0,47 \cdot (0,94 - 0,4)^2}{0,94} = 0,62 \text{ м;}$$

$$U_l = \frac{q_1}{K_l \cdot b_e} = \frac{0,666 \cdot 10^{-4}}{0,803 \cdot 0,62} = 1,34 \cdot 10^{-4};$$

$$U_t = \frac{q_1^2}{K_t^2 \cdot b_e^2} = \frac{(0,666 \cdot 10^{-4})^2}{0,0616^2 \cdot 0,62^2} = 3,04 \cdot 10^{-6};$$

$$r = \sqrt{\frac{U_l}{3} - \left(\frac{i}{3}\right)^2} = \sqrt{\frac{1,34 \cdot 10^{-4}}{3} - \left(\frac{0,003}{3}\right)^2} =$$

$$= 0,658 \cdot 10^{-2};$$

$$P = -\left(\frac{i}{3}\right)^3 + \frac{i \cdot U_l}{6} + \frac{U_t}{2} = -\left(\frac{0,003}{3}\right)^3 +$$

$$+ \frac{0,003 \cdot 1,34 \cdot 10^{-4}}{6} + \frac{3,04 \cdot 10^{-6}}{2} = 1,586 \cdot 10^{-6};$$

$$K_1 = \frac{i}{3} - 2r \cdot \text{sh} \left(\frac{1}{3} \text{Arsh} \frac{P}{r^3} \right) = \frac{0,003}{3} -$$

$$- 2 \cdot 0,658 \cdot 10^{-2} \cdot \text{sh} \left(\frac{1}{3} \text{Arsh} \frac{1,586 \cdot 10^{-6}}{(0,658 \cdot 10^{-2})^3} \right) =$$

$$= -1,079 \cdot 10^{-2};$$

$$\Phi_1 = \frac{K_1^2}{3K_1^2 - 2K_1 \cdot i + U_l} =$$

$$= \frac{(-1,079 \cdot 10^{-2})^2}{3(-1,079 \cdot 10^{-2})^2 + 2 \cdot 1,079 \cdot 10^{-2} \cdot 0,003 + 1,34 \cdot 10^{-4}} =$$

$$= 0,21;$$

$$M = (1 - \Phi_1) \frac{U_l}{K_1} + (1 - 3\Phi_1) \frac{U_t}{K_1} =$$

$$= (1 - 0,21) \frac{1,34 \cdot 10^{-4}}{-1,079 \cdot 10^{-2}} + (1 - 3 \cdot 0,21) \times$$

$$\times \frac{3,04 \cdot 10^{-6}}{(-1,079 \cdot 10^{-2})^2} = -0,015 \cdot 10^{-2};$$

$$N_1 = 4 \cdot (K_1^2 + U_l) - (K_1 + i)^2 = 4 \cdot [(-1,079 \cdot 10^{-2})^2 + 1,34 \cdot 10^{-4}] - (-1,079 \cdot 10^{-2} + 0,3 \cdot 10^{-2})^2 = 9,41 \cdot 10^{-4};$$

$$h_0 = L_1 \sqrt{\frac{(t_k^3 - i \cdot t_k^2 + U_l \cdot t_k + U_t)^{(1-F_1)}}{(t_k - K_1)^{(1-3F_1)}}} \cdot \exp \left[-\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2t_k + K_1 - i}{\sqrt{N_1}} \right) \right] =$$

$$= 60 \sqrt{\frac{[0,833^3 \cdot 10^{-9} - 0,3 \cdot 10^{-2} \cdot 0,833^2 \cdot 10^{-6} + 1,34 \cdot 10^{-4} \cdot 0,833 \cdot 10^{-3} + 3,04 \cdot 10^{-6}]^{0,79}}{(0,833 \cdot 10^{-3} + 1,079 \cdot 10^{-2})^{0,37}}} \times$$

$$\times \exp \left[\frac{0,015 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{9,41 \cdot 10^{-4}}} \left(\frac{3,14}{2} - \arctg \frac{2 \cdot 0,833 \cdot 10^{-3} - 1,079 \cdot 10^{-2} - 0,3 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{9,41 \cdot 10^{-4}}} \right) \right] = 0,93$$

Принимаем $h_0 = 0,94$ м.

Однако, как это следует из проведенных ранее исследований, максимальная глубина воды в бесполостной части дрены $h_{\max}$ (рис. 2) и, соответственно, напор в дренажной трубе будут в сечении, расположенном на расстоянии $s_{\max}$ от начала оси s (точки водораздела). Величина $s_{\max}$ может быть вычислена по формуле:

$$s_{\max} = h_0 \sqrt{\frac{(t_{\max} - K_1)^{(1-3F_1)}}{(t_{\max}^3 - i \cdot t_{\max}^2 + U_l \cdot t_{\max} + U_t)^{(1-F_1)}}} \cdot \exp \left[\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2t_{\max} + K_1 - i}{\sqrt{N_1}} \right) \right] =$$

$$= 0,94 \sqrt{\frac{(0,061 - 1,079 \cdot 10^{-2})^{0,37}}{(0,061^3 - 3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,061^2 + 1,34 \cdot 10^{-4} \cdot 0,061 + 3,04 \cdot 10^{-6})^{0,79}}} \times$$

$$\times \exp \left[\frac{0,015 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{9,41 \cdot 10^{-4}}} \left(\frac{3,14}{2} - \arctg \frac{2 \cdot 0,061 - 1,079 \cdot 10^{-2} - 0,3 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{9,41 \cdot 10^{-4}}} \right) \right] = 15,7$$

$$t_{\max} = \frac{h_{\max}}{s_{\max}}, \text{ откуда } h_{\max} = t_{\max} \cdot s_{\max} = 0,061 \cdot 15,7 = 0,96 \text{ м.}$$

Для расчета правой части дрены перепишем уравнения (3–9) и (13), имея в виду, что правая часть дрены по отношению потока имеет обратный уклон.

$$h_0 = L_2 \sqrt{\frac{(t_k^3 + i \cdot t_k^2 + U_l \cdot t_k + U_t)^{(1-F_1)}}{(t_k - K_1)^{(1-3F_1)}}} \cdot \exp \left[-\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2t_k + K_1 + i}{\sqrt{N_1}} \right) \right], \quad (14)$$

$$\text{где } t_k = \frac{h_k}{L_2}, \quad F_1 = \frac{K_1^2}{3K_1^2 + 2K_1 \cdot i + U_l}, \quad (15)$$

$$M = (1 - F_1) \frac{U_l}{K_1} + (1 - 3F_1) \frac{U_t}{K_1^2}, \quad (16)$$

$$N_1 = 4(K_1^2 + U_l) - (K_1 - i)^2, \quad (17)$$

$$K_1 = -\frac{i}{3} - 2r \cdot \operatorname{sh} \left(\frac{1}{3} \operatorname{Arsh} \frac{P}{r^3} \right), \quad (18)$$

$$r = \sqrt{\frac{U_l}{3} - \left(-\frac{i}{3} \right)^2};$$

$$P = -\left(-\frac{i}{3} \right)^3 - \frac{i \cdot U_l}{6} + \frac{U_t}{2}. \quad (19)$$

$$h_0 = h_k + \frac{8 \cdot \lambda_{mid} \cdot q_2^2 \cdot L_2^3}{3 \cdot \pi^2 \cdot d^5 \cdot g} + i \cdot L_2. \quad (20)$$

Исходные данные для расчета:

$q = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda_{mid} = 0,04$; $h_0 = 0,94 \text{ м}$; величины q_1 и q_2 изменятся и подлежат определению; $i = -0,003$ (обратный уклон по отношению к направлению движения потока; $h_k = 0,05 \text{ м}$. Характеристики заполнителя бесполостной части дрены, включая величины коэффициентов фильтрации K_l и K_t , остаются неизменными. Остаются постоянными также величины коэффициента $\beta = 0,47$ и эквивалентной ширины прямоугольного поперечного сечения $b_e = 0,62 \text{ м}$. Определению подлежат величины q_1 , q_2 и L_2 . Расчет начинаем с того, что задаемся некоторым значением L_2 и, принимая за h_0 величину $0,94 \text{ м}$, вычисленную при расчете левой части дрены, определяем соответствующее значение q_2 . Далее, по зависимости (14) снова вычисляем h_0 , используя исходные данные для правой части дрены. Сравниваем между собой величину h_0 , полученную при расчете левой части дрены и по формуле (14). Если они будут одинаковы, то определяемые последовательно по ходу расчета величины q_1 , q_2 и L_2 и будут искомыми.

Проиллюстрируем ход расчета на примере.

Принимаем $L_2 = 50 \text{ м}$.

$$q_2 = \sqrt{\frac{3 \cdot \pi^2 \cdot d^5 \cdot g (h_0 - h_k + i \cdot L_2)}{8 \cdot \lambda_{mid} \cdot L_1^3}} =$$

$$= \sqrt{\frac{3 \cdot 3,14^2 \cdot 0,05^5 \cdot 9,81 (0,94 - 0,05 - 0,003 \cdot 50)}{8 \cdot 0,04 \cdot 50^3}} =$$

$$= 0,409 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

4. Соответственно:

$$q_1 = q - q_2 = 1,04 \cdot 10^{-4} - 0,409 \cdot 10^{-4} =$$

$$0,631 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

5. Вычисляем параметры: U_l , U_t , β , b_e , K_l , Φ_1 , M , N_1 и t_k .

$$t_k = \frac{0,05}{50} = 0,001;$$

$$\beta = \frac{2h_0}{3(h_0 + a)} = \frac{2 \cdot 0,94}{3(0,94 + 0,4)} = 0,47;$$

$$b_e = b + \frac{m \cdot \beta \cdot (h_0 - a)^2}{h_0} =$$

$$= 0,4 + \frac{1,5 \cdot 0,47 \cdot (0,94 - 0,4)^2}{0,94} = 0,62 \text{ м};$$

$$U_l = \frac{q_1}{K_l \cdot b_e} = \frac{0,631 \cdot 10^{-4}}{0,803 \cdot 0,62} = 1,267 \cdot 10^{-4};$$

$$U_t = \frac{q_2^2}{K_t^2 \cdot b_e^2} = \frac{(0,631 \cdot 10^{-4})^2}{0,0616^2 \cdot 0,62^2} = 2,73 \cdot 10^{-6};$$

$$r = \sqrt{\frac{U_l}{3} - \left(-\frac{i}{3} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1,267 \cdot 10^{-4}}{3} - \left(-\frac{0,003}{3} \right)^2} = 0,64 \cdot 10^{-2};$$

$$P = -\left(-\frac{i}{3}\right)^3 - \frac{i \cdot U_l}{6} + \frac{U_t}{2} = -\left(-\frac{0,003}{3}\right)^3 - \frac{0,003 \cdot 1,267 \cdot 10^{-4}}{6} + \frac{2,73 \cdot 10^{-6}}{2} = 1,303 \cdot 10^{-6};$$

$$K_1 = -\frac{i}{3} - 2r \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{1}{3} \operatorname{Arsh} \frac{P}{r^3}\right) = -\frac{0,003}{3} - 2 \cdot 0,64 \cdot 10^{-2} \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{1}{3} \operatorname{Arsh} \frac{1,303 \cdot 10^{-6}}{(0,64 \cdot 10^{-2})^3}\right) = -0,985 \cdot 10^{-2};$$

$$\Phi_1 = \frac{K_1^2}{3K_1^2 + 2K_1 \cdot i + U_l} = \frac{(-0,985 \cdot 10^{-2})^2}{3(-0,985 \cdot 10^{-2})^2 - 2 \cdot 0,985 \cdot 10^{-2} \cdot 0,003 + 1,267 \cdot 10^{-4}} = 0,27;$$

$$M = (1 - \Phi_1) \frac{U_l}{K_1} + (1 - 3\Phi_1) \frac{U_t}{K_1^2} = (1 - 0,27) \frac{1,267 \cdot 10^{-4}}{-0,985 \cdot 10^{-2}} + (1 - 3 \cdot 0,27) \cdot \frac{2,73 \cdot 10^{-6}}{(-0,985 \cdot 10^{-2})^2} = -0,404 \cdot 10^{-2};$$

$$N_1 = 4 \cdot (K_1^2 + U_l) - (K_1 - i)^2 = 4 \cdot [(-0,985 \cdot 10^{-2})^2 + 1,267 \cdot 10^{-4}] - (-0,985 \cdot 10^{-2} + 0,3 \cdot 10^{-2})^2 = 8,298 \cdot 10^{-4};$$

$$\begin{aligned} h_0 &= L_2 \sqrt{\frac{(t_k^3 + i \cdot t_k^2 + U_l \cdot t_k + U_t)^{(1-F_1)}}{(t_k - K_1)^{(1-3F_1)}}} \cdot \exp\left[-\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2t_k + K_1 + i}{\sqrt{N_1}}\right)\right] = \\ &= 50 \sqrt{\frac{[1 \cdot 10^{-9} + 3 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-6} + 1,267 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^{-3} + 2,73 \cdot 10^{-6}]^{0,73}}{(1 \cdot 10^{-3} + 0,985 \cdot 10^{-2})^{0,19}}} \times \\ &\times \exp\left[\frac{0,404 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{8,298 \cdot 10^{-4}}} \left(\frac{3,14}{2} - \arctg \frac{2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} - 0,985 \cdot 10^{-2} + 0,3 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{8,298 \cdot 10^{-4}}}\right)\right] = 0,94 \text{ м.} \end{aligned}$$

Представляет интерес ответ на вопрос, а насколько ниже будет уровень грунтовых вод в земляном полотне при введении в бесполостную дренажную трубу диаметром 0,05 м. Для этого с использованием изложенных выше исходных данных нам надо вычислить величину $h_{\max}$ для случая, когда весь расход отводится бесполостной частью дрены при $q_1 = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. Расчеты показывают, что благодаря введению в бесполостную дренажную трубу уровень грунтовых вод в земляном полотне будет дополнительно понижен на 27 см либо на такую же величину может быть уменьшена высота бесполостной дрены, что даст возможность снизить расход материалов заполнителя бесполостной дрены при обеспечении нормы осушения.

Выводы

1. Бесполостная дрена составного профиля, усиленная дренажной трубой, увеличивает свою водоотводящую способность, сохраняя все свои преимущества (не боится пучения и просадок, обладает высокой водозахватной и самоочищающей способностями, долговечна).

2. Движение воды как в пределах бесполостной части дрены, так и в дренажной трубе является плавно изменяющимся, а живые сечения принимаются плоскими. Потери напора на отверстиях в трубе ввиду малости скоростей перетекания (менее 0,1 м/с) незначительны, поэтому во всех точках любого одного и того же живого сечения как в бесполостной части дрены, так и в дренажной трубе величина напора одинакова.

3. Для обеспечения решения уравнения, описывающего движение воды в бесполостной части дрены, составной профиль дрены заменяется прямоугольным. При этом площади их живых сечений эквивалентны.

4. Получены зависимости, позволяющие рассчитать расходы, протекающие по бесполостной части дрены и по дренажной трубе, расстояние между коллекторами при двустороннем впадении в них дрен, закладываемых с уклоном и глубину воды в бесполостной части дрены в характерных сечениях (h_0 и $h_{\max}$).

Библиографический список

1. Kolos A. Reducing of negative heavy axle load impact on the railway track structure / A. Kolos, A. Petriaev, I. Kolos et al. // AIP Conference Proceedings. — 2021. — DOI: 10.1063/5.0063962.
2. Kolos A. Railway subgrade stressed state under the impact of new-generation cars with 270 kN axle load / A. Kolos, A. Romanov, V. Govorov et al. // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2020. — I. 49. — Pp. 343–351. — DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_35.
3. Kolos A. Bearing capacity of high embankment clay soils in terms of heavy axle load operation / A. Kolos, A. Romanov, E. Shekhtman et al. // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2020. — I. 49. — Pp. 403–412. — DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_42.
4. Lazorenko G. Dynamic behavior and stability of soil foundation in heavy haul railway tracks: A review / G. Lazorenko, A. Kasprzhitskii, Z. Khakiev et al. // Construction and Building Materials. — 2019. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.184.
5. Kolos A. Study on railway elastic substructure vibration under heavy axle load / A. Kolos, A. Petriaev, A. Konon // AIP Conference Proceedings. — 2021. — DOI: 10.1063/5.0063961.
6. Blazhko L. S. Enhancement of Subgrade's Bearing Capacity in Low Water Permeable (Clay) Soils / L. S. Blazhko, V. I. Shtykov, E. V. Chernyaev // Procedia Engineering. — 2017. — Vol. 189. — Pp. 710–715.
7. Bogomolova N. The study of railway embankment deformations in cold regions / N. Bogomolova, M. Bryn, A. Nikitchin et al. // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2020. — Iss. 50 — Pp. 223–229. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_24.
8. Yang G. S. Study of thawing and consolidation law of ice-rich embankment / G. S. Yang, B. Bai, X. L. Yao // Yantu Lixue. Rock Soil Mech. — 2020. — Iss. 41.
9. Bogomolova N. Features of engineering surveys in areas of permafrost prevalence by the example of the project “northern latitudinal way” / N. Bogomolova, Y. Milyushkan, S. Shkurnikov et al. // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2020. — Iss. 50. — Pp. 215–221. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_23.
10. Yang G. L. Study on earth pressures in expansive soil roadbed under weather influence / G. L. Yang, X. J. Huang // Chinese J. Geotech. Eng. — 2005. — Iss. 27.
11. Nguyen T. T. Mud pumping under railtracks: Mechanisms, assessments and solutions / T. T. Nguyen, B. Indraratna, R. Kelly et al. // Australian Geomechanics Journal. — 2019. — Iss. 54(4).
12. Leus O. Strength properties of ballast layer, created from new and recycled crushed stone ballast / O. Leus, I. Menendez Pidal, A. Kolos et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — Iss. 942(1). — DOI: 10.1088/1755-1315/942/1/012026.
13. Kaushik M. K. Drainage Performance of Different Sizes Tire Chips used Alone and Mixed with Natural Aggregates as Leachate Drainage Layer Material / M. K. Kaushik, A. Kumar, A. Bansal // Geotech. Geol. Eng. — 2016. — DOI: 10.1007/s10706-015-9937-x.
14. Shtykov V. I. Hydraulic calculation of non-cavity triangular cross-section drains in transient regime / V. I. Shty-

kov, A. B. Ponomarev // *Proceedings of Petersburg Transport University*. — Saint-Petersburg, 2019. — Vol. 16. — iss. 3. — Pp. 523–532. — DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-523-532.

15. Shtykov V. Hydraulic Analysis of a Sloped Trapezoidal Non-cavity Drain Improved by a Pipe Drainage / V. Shtykov, A. Ponomarev, J. Yanko // *Transportation Research Procedia*. — 2021. — Iss. 54. — Pp. 768–774. — DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.129.

16. Shtykov V. I. Hydraulic calculation of non-cavity complex cross-section drains / V. I. Shtykov, Yu. G. Yanko //

Bulletin of scientific research results. — 2021. — Iss. 1. — Pp. 33–49. — DOI: 10.20295/2223-9987-2021-1-33-49.

Дата поступления: 05.10.2022

Решение о публикации: 19.11.2022

Контактная информация:

Штыков Валерий Иванович — чл.-корр. РАН,
д-р техн. наук, проф.; shtykov41@mail.ru

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

Cavityless Drain of Composite Profile Reinforced with Drainage Pipe

V. I. Shtykov, A. B. Ponomaryev

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

For citation: Shtykov V. I., Ponomaryev A. B. Cavityless Drain of Composite Profile Reinforced with Drainage Pipe // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 676. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4--676

Summary

Purpose: Calculated substantiation of cavityless drain structure that provides for effective draining of poorly permeable soils. Hydraulic calculation methodology of composite profile cavityless drain, laid with a slope but without inclusion thitherwards of a drainage pipe, was developed earlier. Drainage pipe reinforces drainage capability of cavityless drain with the preservation of all its other advantages. **Methods:** Known differential equation of liquid filtration in a soil is used. It's of special importance that the calculation method may be used at all modes of water movement in a drainage: laminar, transient or turbulent. The dependencies substantiated with experiments, held by Northern Scientific-Research Institute of Hydrotechnique and Melioration, were applied for transient and turbulent modes. The complex form of drainage transection is taken into account with the help of special coefficient which leads it to equivalent by area rectangular section. It's proved that such transfer doesn't lead to significant inaccuracy of results obtained. **Results:** Dependencies have been obtained allowing to calculate consumptions, flowing along drain cavityless part and along drain pipe. If drain is long, it's feasible to divert a water periodically from it in lateral direction by collectors. Dependencies are derived which according to, the distance between intermediary collectors, whereto a water comes from drains that're laid with a slope, and the water depth in drain cavityless part in characteristic sections are defined. **Practical significance:** Cavityless drainage is applied in agriculture, in the systems of engineering protection from environmental sinking and pollution. Cavityless drains of composite profile have attracted railwaymen's attention providing effective draining of subgrade, they simultaneously increase its bearing capacity. Its application is especially effective on poorly permeable soils when laying in the zone of seasonable freezing of soils.

Keywords: Cavityless drain, hydraulic calculation, drainage, subgrade, composite section.

References

1. Kolos A., Petriaev A., Kolos I. Reducing of negative heavy axle load impact on the railway track structure. AIP Conference Proceedings. 2021. DOI: 10.1063/5.0063962.
2. Kolos A., Romanov A., Govorov V. Railway subgrade stressed state under the impact of new-generation cars with 270 kN axle load. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020, I. 49, pp. 343–351. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_35.
3. Kolos A., Romanov A., Shekhtman E. Bearing capacity of high embankment clay soils in terms of heavy axle load operation. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020, I. 49, pp. 403–412. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_42.
4. Lazorenko G., Kasprzhitskii A., Khakiev Z. Dynamic behavior and stability of soil foundation in heavy haul railway tracks: A review. Construction and Building Materials. 2019. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.184.
5. Kolos A., Petriaev A., Konon A. Study on railway elastic substructure vibration under heavy axle load. AIP Conference Proceedings. 2021. DOI: 10.1063/5.0063961.
6. Blazhko L. S., Shtykov V. I., Chernyaev E. V. Enhancement of Subgrade's Bearing Capacity in Low Water Permeable (Clay) Soils. Procedia Engineering. 2017, vol. 189, pp. 710–715.
7. Bogomolova N., Bryn M., Nikitchin A. The study of railway embankment deformations in cold regions. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020, I. 50, pp. 223–229. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_24.
8. Yang G. S., Bai B., Yao X. L. Study of thawing and consolidation law of ice-rich embankment. Yantu Lixue. Rock Soil Mech. 2020. Iss. 41.
9. Bogomolova N., Milyushkan Y., Shkurnikov S. Features of engineering surveys in areas of permafrost prevalence by the example of the project “northern latitudinal way”. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020, I. 50, pp. 215–221. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_23.
10. Yang G. L., Huang, X. J. Study on earth pressures in expansive soil roadbed under weather influence. Chinese J. Geotech. Eng. 2005, Iss. 27.
11. Nguyen T. T., Indraratna B., Kelly R. Mud pumping under railtracks: Mechanisms, assessments and solutions. Australian Geomechanics Journal. 2019, Iss. 54(4).
12. Leus O., Menendez Pidal I., Kolos A. Strength properties of ballast layer, created from new and recycled crushed stone ballast. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, Iss. 942(1). DOI: 10.1088/1755-1315/942/1/012026.
13. Kaushik M. K., Kumar A., Bansal A. Drainage Performance of Different Sizes Tire Chips used Alone and Mixed with Natural Aggregates as Leachate Drainage Layer Material. Geotech. Geol. Eng. 2016. doi: 10.1007/s10706-015-9937-x.
14. Shtykov V. I., Ponomarev A. B. Hydraulic calculation of non-cavity triangular cross-section drains in transient regime. Proceedings of Petersburg Transport University. Saint-Petersburg, 2019, vol. 16., I. 3, pp. 523–532. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-523-532.
15. Shtykov V., Ponomarev A., Yanko J. Hydraulic Analysis of a Sloped Trapezoidal Non-cavity Drain Improved by a Pipe Drainage. Transportation Research Procedia. 2021, I. 54, pp. 768–774. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.129.
16. Shtykov V. I., Yanko Yu. G. Hydraulic calculation of non-cavity complex cross-section drains. Bulletin of scientific research results. 2021, Iss. 1, pp. 33–49. DOI: 10.20295/2223-9987-2021-1-33-49.

Received: October 05, 2022

Accepted: November 19, 2022

Author's information:

Valeriy I. SHTYKOV — Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Doctor in Engineering, Professor; shtykov41@mail.ru

Andrey B. PONOMARYEV — PhD in Engineering, Associate Professor; pollnom@yandex.ru

УДК 624.9

К вопросу эффективности применения различных марок сталей в конструкциях быстровозводимых зданий и сооружений в северных климатических условиях на территории Российской Федерации

Д. Г. Чарник

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

Для цитирования: Чарник Д. Г. К вопросу эффективности применения различных марок сталей в конструкциях быстровозводимых зданий и сооружений в северных климатических условиях на территории Российской Федерации // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 677–684. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-677-684

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос о целесообразности использования как обычных, так и нержавеющей сталей с точки зрения применения их при строительстве зданий и сооружений из легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) в северных климатических условиях. Выявить основные преимущества и недостатки применения легких стальных тонкостенных конструкций в строительстве. Определить наиболее уязвимые места при возведении зданий из ЛСТК. **Методы:** При проведении исследований вопросов эффективности применения различных марок стали в конструкциях быстровозводимых зданий и сооружений в северных климатических условиях были использованы методы сравнения с химической и физической точек зрения. **Результаты:** Обоснована целесообразность и эффективность использования сталей марки AISI 201. Указаны преимущества стали AISI 201 не только с химической точки зрения, но и с механической. Описаны уязвимые места данной стали при возведении конструкций и сооружений в процессе эксплуатации. Определены способы для защиты конструкций из углеродистых и низколегированных сталей в зависимости от их назначения и условий эксплуатации. **Практическая значимость:** Результаты исследования показывают, сталь AISI 201 является наиболее эффективной с экономической точки зрения. Необходимо использовать методы защиты стальных строительных материалов при возведении и эксплуатации сооружения, а также различные виды стали в зависимости от области применения.

Ключевые слова: Конструкционные низколегированные стали, нержавеющей стали, ЛСТК, ударная вязкость стали, тонкостенные конструкции.

Основными задачами для решения проблем возведения конструкций и сооружений в северных районах Российской Федерации являются стойкость сооружений к низким температурам, компактность и экономический эффект.

Требуемый набор промышленных зданий и сооружений и различных их типов, в который входят размеры, сроки службы, объемы строительства этих сооружений, определяется областью использования различных (стационарных и

нестационарных) систем расселения в сложных северных условиях, а также масштабом развития различных отраслей промышленности и производств в этой области [1].

Северные климатические зоны определяют специальные требования к проектированию, строительству и эксплуатации различных сооружений. В случае несоблюдения данных требований сооружение может оказаться мало-пригодным для эксплуатации, подвергаться деформации в разной степени, разрушаться и, соответственно, быть не только непригодным с точки зрения техники безопасности, но и экономически невыгодным.

В процессе создания проекта застройки необходимо учитывать различные факторы, например снегоперенос в зимний период и ветровой режим. Соответственно, целесообразно отказаться от сложных конфигураций сооружений и конструкций, уменьшить площадь застекления, по возможности блокировать уязвимые узлы от внешних негативных условий среды.

Необходимо учитывать, что Крайний Север имеет ряд особенностей, которые влияют на разработку и обустройство. Во-первых, это удаленность от развитых промышленных регионов, плохое развитие инфраструктуры, что влечет за собой проблемы, связанные с транспортировкой строительных материалов, рабочей силы, необходимого оборудования.

Что касается геолого-климатических условий, то продолжительный зимний период, жесткий температурно-ветровой режим, заболоченность затрудняют не только проезд строительной техники, но и само производство строительно-монтажных работ.

Вопросы строительства в северных районах страны должны включать не только то, какие материалы конструкции лучше всего использовать при возведении зданий и сооружений в условиях низких температур [1]. Так, сокращение тру-

довых затрат при строительстве является одним из ключевых аспектов. Также следует принимать во внимание условия и способы транспортировки комплектующих.

Вес элементов должен быть максимально уменьшен, целесообразно использовать новые типы конструкций, изготовленные с применением современных легких материалов.

Все больше и больше в строительстве используются легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК). Они производятся методом холодного формообразования на профилегибочных станках из прокатного листового металла [2]. Скорость возведения панельно-каркасных строений существенно возрастает при использовании ЛТПК.

Можно использовать как перфорированный, так и неперфорированный металлопрофиль. Перфорированный профиль, в свою очередь, имеет ряд существенных преимуществ: возможно многократное сгибание и разгибание, без нарушения целостности, устойчив к внешним атмосферным воздействиям, крепление происходит посредством анкерных болтов. Ограждающими конструкциями являются специальные стеновые панели [3]. Каркасное строительство из ЛСТК экономически целесообразно, так как позволяет оптимизировать финансовые затраты на 30–40 % от сметной стоимости на материалы.

Использование конструкций из ЛТСК позволяет существенно сократить сроки строительства из-за отсутствия «мокрых процессов».

С точки зрения экологичности материала стоит отметить возможность использования данного материала неограниченное количество раз. Стальные конструкции не обладают непроницаемостью и не выделяют вредные вещества в атмосферу.

Немаловажным фактором является и то, что затраты первичной энергии, то есть необходимость подогрева бетона и его компонентов в про-

цессе приготовления, транспортировки и засты-
вании, существенно сокращены.

Одно из требований, которое предъявляется
к конструкции, — это простота изготовления.
При производстве легких стальных конструк-
ций погрешность минимальная, помимо этого,
возможно доработка при возведении без исполь-
зования сложной техники и специальных тех-
нических условий. Это обеспечивает точный и
быстрый монтаж всех элементов строения.

Легкие стальные тонкостенные конструкции
имеют ряд технических преимуществ.

Во-первых, это энергоэффективность. При
расчетах необходимо учитывать энергетические
потребности для обеспечения теплового и воз-
душного режимов. Малая толщина стен позво-
ляет увеличить внутреннюю площадь без ущерба
технологических требований.

Во-вторых — малый вес конструкции, что
дает снижение затрат при транспортировке и воз-
ведении.

В-третьих — стойкость к динамическим
нагрузкам — ветровым и сейсмическим.

В-четвертых — огнестойкость, сооружение
способно сохранять свои технические свойства
под воздействием высоких температур.

И конечно, стоит отметить долгий срок службы
строений из легких стальных тонкостенных кон-
струкций, возможность быстрого ремонта.

Можно отметить следующие недостатки —
это необходимость официального проекта кон-
структорской документации еще на стадии про-
ектирования. Также возможно повреждение
конструкций при выгрузке и транспортировке [4].

Возвращаясь к вопросу экономической целе-
сообразности, необходимо отметить, что наи-
более действенным средством снижения метал-
лоемкости и стоимости конструкций из ЛСТК
является повышение прочности сталей.

Существуют несколько способов упрочнения
материалов:

– горячая обработка давлением — уплотне-
ние структуры с ориентированным направлением
кристаллитов;

– легирование — повышение прочности улуч-
шением вязкости, пластичности, коррозионной
стойкости;

– упрочняющая термическая и химико-терми-
ческая обработка — образование неравновесных
структур с повышенной плотностью и дефор-
мированной атомно-кристаллической решеткой
посредством закалки с высоким, средним и низ-
ким отпуском;

– обработка методами холодной пластической
деформации — понижение температуры ниже
температуры рекристаллизации.

Размеры поперечных сечений многих элемен-
тов металлоконструкций, а следовательно, и их
масса существенно зависят от предела текучести
 σ_t и предела прочности σ_b (временного сопротив-
ления) металлов.

Учитывая, что стали будут использоваться при
низких температурах, для повышения ударной вяз-
кости их подвергают термообработке, состоящей из
закалки высокого отпуска. Также термообработка
сталей повышает ее прочность и пластичность.

Рассмотрим ряд сталей, используемых при
изготовлении ЛСТК. Основным нормативным
документом для проектирования зданий и соору-
жений из ЛСТК является СП 260.1325800.2016
«Конструкции стальные тонкостенные из холод-
ногнутой оцинкованных профилей и гофриро-
ванных листов» [5].

Согласно п. 6 СП 260.1325800.2016 рекоменду-
ется изготавливать ЛСТК из углеродистой стали,
оцинкованной в агрегатах непрерывного оцинко-
вания по ГОСТ 14918—2020 «Прокат листовой
горячеоцинкованный» толщиной от 1 до 4 мм с
цинковым покрытием класса от 275 до 600 [6].

Расчетная температура окружающей среды в
месте применения конструкций из ЛСТК должна
быть не ниже $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ТАБЛИЦА 1. Характерные свойства и примеры использования низколегированных сталей

№ п/п	Марка стали	Свойства	Применение
1	09Г2С (аналоги 09Г2, 09Г2ДТ, 10Г2С, 09Г2Т)	Высокая прочность, долговечность, широкий диапазон температур (от -70°C до $+425^{\circ}\text{C}$), сталь сохраняет форму при действии нагрузки, хорошо сваривается, не подвержена отпускной хрупкости	Прокат, способный работать в широком интервале температур, производство паровых котлов и других емкостей, работающих под давлением, ответственные сварные конструкции, применяемые в нефтегазовой, химической и судостроительной промышленности
2	17Г1С (аналог 17ГС)	Обладает повышенной прочностью, не имеет ограничений по свариваемости, имеет широкий рабочий интервал температур (от -40°C до $+475^{\circ}\text{C}$)	Применяется для создания сварных конструкций, работающих в экстремальных условиях температур и повышенного давления. Хладостойкость позволяет использовать ее в производстве криогенных аппаратов
3	10ХСНД (аналог 16Г2АФ)	Повышенные прочностные характеристики, коррозионная стойкость, хорошая свариваемость	В строительстве: для изготовления арок и несущих конструкций здания, мостовых металлоконструкций, включая северное исполнение. В машиностроении: детали ковшей, элементы гидравлических ножниц, сельскохозяйственной техники
4	10ХНДП	Высокая атмосферная коррозионная стойкость. Класс атмосферокоррозионностойких сталей. Хорошо свариваются	Эксплуатация на открытом воздухе без применения покрытий в качестве защиты от коррозии

Конструкционные (строительные) низколегированные стали хорошо воспринимают как статическую, так и динамическую нагрузки. Дополнительно термическая обработка для них не требуется.

Низкоуглеродистые низколегированные стали — это сплавы железа и углерода, в которых доля углерода не превышает 0,25 %. К этим сталям относятся стали: 09Г2, 09ГС, 17ГС, 10Г2С1, 14Г2, 15ХСНД, 10ХНДП и другие. Данные стали содержат до 1,8 % Mn, до 1,2 % Si, до 0,8 % Cr, до 1,7 % Ni, до 0,5 % Cu, до 0,15 % V, до 0,03 % Ti, до 0,25 % N.

Введение этих элементов способствует прочности сталей и понижению температуры перехода в хрупкое состояние, что дает возможность применения таких сталей в районах с холодным климатом. Добавление меди (Cu) повышает стойкость к атмосферной коррозии. В табл. 1 приведены характерные свойства и примеры использования низколегированных сталей.

Для защиты конструкций из углеродистых и низколегированных сталей, в зависимости от их назначения и условий эксплуатации, используют несколько способов:

Окрашивание лакокрасочными материалами.

Горячее цинкование или горячее алюминирование методом погружения в расплав.

То же, с последующим окрашиванием лакокрасочными материалами.

Газотермическое нанесение цинкового слоя или алюминиевого покрытия.

То же, с последующим окрашиванием лакокрасочными материалами.

Для конструкций из ЛСТК широко используются 2 и 4 способы защиты конструкций.

Горячее цинкование металла отличается приемлемой стоимостью технологического процесса и предоставляет высокую степень защиты. При механическом повреждении элементов конструкции происходит самовосстановление. Следует отметить, что горячее цинкование устраняет

такие дефекты, как раковины, поры и царапины. Эксплуатация изделия с нанесением горячего цинкования возможно использовать в самых неблагоприятных условиях. Срок службы увеличивается на 60–70 лет.

Газотермическое напыление цинкового слоя возможно на месте эксплуатации. Данный метод экологичен, не требует опасной подготовки поверхности. Его целесообразно применять при необходимости использования сварки металлических поверхностей. Напыление происходит по окончании сварочных работ. Оборудование для газотермического напыления мобильны, что делает данный метод доступным в любых зонах. В зависимости от толщины цинкового слоя срок службы увеличивается на 30–100 лет.

При возведении зданий из ЛСТК наиболее уязвимыми являются места болтовых соединений, где возможно повреждение цинкового покрытия от затяжки болтов, особенно, если толщина покрытия не соответствует проектной, что может привести к появлению коррозии.

Болтовые соединения считаются труднодоступными для нанесения защитного слоя — соответственно, высока вероятность образования ржавчины. При устройстве болтовых соединений необходимо проводить процесс герметизации для защиты от попадания влаги на контактные поверхности.

Перед установкой все соединительные материалы необходимо очистить от консервирующей заводской смазки и грязи, просушить, подогнать и смазать герметизирующим составом по всей длине нарезки болта.

Рассмотрим использование металлопроката из нержавеющей стали для изготовления ЛСТК. Нержавеющая сталь является незаменимым материалом в строительстве и может применяться в различных областях.

Данная сталь имеет высокие качества и существенно отличается от других аналогов своими

эксплуатационными характеристиками. Нержавеющие сплавы делятся на три группы: коррозионностойкие стали, жаростойкие стали, жаропрочные стали. Коррозионностойкие стали активно используются в простых промышленных и бытовых условиях. Жаростойкая сталь имеет устойчивость к ржавлению при высоких температурах и в агрессивных средах. От жаропрочной стали требуется повышенная прочность при высокой температуре. По химическому составу нержавеющие сплавы делятся на три вида: хромистые, хромоникелевые, хромомарганцево-никелевые.

Металлопрокат из нержавеющей сталей обладает рядом преимуществ, делающих его незаменимым в ряде случаев для строительной промышленности, а именно:

устойчивость к коррозии — не требует регулярного обновления защиты поверхностей ЛСТК;

длительный срок службы материала увеличивает время активной эксплуатации конструкций из него;

высокая устойчивость к механическим воздействиям обуславливает востребованность этой разновидности проката для создания конструкций, функционирующих в условиях перепадов температуры, плохой погоды и штормового ветра.

Нержавеющая сталь марки AISI 201 (аналог по ГОСТ 12Х15Г9НД) — это хромоникелевый высоколегированный сплав. Нержавеющая сталь типа 201 представляет собой сплав, который содержит половину никеля и больше марганца и азота, чем другие стали. Несмотря на то, что он дешевле некоторых других сплавов (из-за низкого содержания никеля), его не так легко обрабатывать и формировать. Тип 201 является аустенитным металлом, поскольку это немагнитная нержавеющая сталь с высоким содержанием хрома и никеля и низким содержанием углерода. Особенности ее химического состава обуславливают такие характеристики, как:

— высокая пластичность;

ТАБЛИЦА 2. Химический состав сталей AISI 201, AISI 304, 12X15T9НД

Марка стали	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N	Cu
AISI 201	0,12	8,5–10,5	0,66	0,03	0,75	14–16,5	1,0–1,5	0,2	2,0
12X15T9НД	< 0,12	8–10	< 0,08	0,045	< 1	13–16	0,5–1,5	0,25	1,3–2,5
AISI 304	max 0,08	2,0	0,045	0,03	1,0	18–20	8–10,5		

ТАБЛИЦА 3. Механические свойства сталей AISI 201, AISI304, 12X15T9НД (ГОСТ 4543—2016)

Марка стали	Предел текучести, МПа (max)	Предел прочности, МПа (min)	Относительное удлинение, % min	Твердость НВ, max
AISI 201	310	640	≥ 40	217
AISI 304	205	515	40	201
12X15T9НД	280	600	40	

- устойчивость к различному виду нагрузок (в том числе комбинированных);
- коррозионная стойкость в агрессивных средах;
- устойчивость к перепадам температур окружающей среды;
- повышенная твердость;
- хорошая свариваемость [7].

Основным преимуществом стали типа 201 является то, что марка не имеет порога хладноломкости, ее можно использовать при экстремально низких температурах. С понижением температуры предел прочности стали уменьшается незначительно, что дает возможность сопротивляться деформации и разрушению.

Свойства нержавеющей стали типа 201 заключаются в следующем:

- плотность (фунтов на дюйм³): 0,283;
- модуль упругости при растяжении (фунтов на дюйм² × 10⁶): 28,6;
- удельная теплоемкость (BTU/фунтов/градус Фаренгейта): 0,12 при 32–212 градусах Фаренгейта;
- теплопроводность (BTU/час/фут/градусов Фаренгейта): 9,4 при 212 градусах Фаренгейта;
- диапазон температур плавления: 2550–2650 градусов по Фаренгейту.

В табл. 2 представлен химический состав сталей AISI 201, AISI 304, 12X15T9НД.

Сталь марки AISI 201 легирована хромом, марганцем, никелем, азотом и медью в оптимальных пропорциях. Добавленный азот позволяет добиться стабильности аустенитной структуры и уменьшить количество других стабилизирующих элементов — марганца и никеля. Такой сбалансированный химический состав обеспечивает AISI 201 высокую механическую прочность и хорошую способность к холоднокатанному деформированию. В табл. 3 представлены механические свойства некоторых сталей.

Физические свойства AISI 201 — плотность стали составляет 7,71 г/см³.

Стали AISI 201 наиболее дешевые по сравнению с другими нержавеющими сталями (на 30–35 %), что достигается использованием новых технологий изготовления (вместо никеля используется смесь из азота и марганца), а также сбалансированным химическим составом.

Очевидно, что для ответственных сооружений из ЛСТК в сложных климатических условиях можно рекомендовать использовать прокат из стали AISI 201, что дает экономический эффект.

Следует отметить, что марка сталей для изготовления конструкций ЛСТК выбирается для конкретных условий, где они будут использоваться, что позволяет выбрать наиболее эффективное и простое решение.

Современные технологии позволяют применять различные типы стали при возведении зданий в северных климатических зонах. Главные преимущества данной технологии — сезонность постройки, отсутствие мокрых процессов, простота монтажа, возможность прокладки коммуникации внутри стен, низкие затраты на эксплуатацию, монтаж и демонтаж, возможность вторичной переработки [8]. Использование в ЛСТК холодногнутых оцинкованных профилей гарантирует сооружению высокие показатели огнестойкости, сейсмоустойчивости, энергоэффективности, звука изоляции и экономичности.

Важно точно следовать нормативно технической базе, принимать во внимание все существующие нормы и правила, которые обеспечивают высокие технологические параметры строения [9].

Библиографический список

1. Линейцев А. А. Проблемы строительства сооружений в Арктике / А. А. Линейцев // Молодой ученый. — 2021. — № 5(347). — С. 74–78. — URL: <https://moluch.ru/archive/347/77997/>.
2. Трубина Д. А. Местная потеря устойчивости стальных холодногнутых профилей в условиях поперечного изгиба / Д. А. Трубина, Л. А. Кононова, А. А. Кауров и др. // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2014. — № 4(19). — С. 109–127.
3. Советников Д. О. Легкие стальные тонкостенные конструкции в многоэтажном строительстве / Д. О. Советников, Н. В. Виденков, Д. А. Трубина // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2015. — № 3(30). — 153 с.
4. Нежданов К. К. Анализ состояния и причин обрушений строительных конструкций в промышленных зданиях / К. К. Нежданов, А. Н. Жуков // Региональная архитектура и строительство. — 2011. — № 1.
5. ГОСТ 14918—2020. Прокат листовой горячеоцинкованный. Технические условия.
6. СП 260.1325800.2016. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов.
7. Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу ограждающих и несущих конструкций из стальных гнутых профилей повышенной жесткости. — М.: ЦНИИПСК Мельникова, 1999. — 32 с.
8. Жуков А. Н. Проблемы и перспективы развития металлических конструкций в промышленных зданиях / А. Н. Жуков, В. О. Булавенко, Д. Х. Саидов // Молодой ученый. — 2011. — № 3(26). — Т. 1. — С. 44–47. — URL: <https://moluch.ru/archive/26/2830/>.
9. Эксплуатация металлических конструкций. — URL: <http://domremstroy.ru/da/zdanie27.html>.

Дата поступления: 17.08.2022

Решение о публикации: 21.11.2022

Контактная информация:

ЧАРНИК Дмитрий Геннадьевич — аспирант; charnik_dmitriy@mail.ru

On Effectiveness Issue of Steel Various Grade Use in the Structures of Prefabricated Constructions and Buildings in Northern Climatic Conditions on Russian Federation Territory

D. G. Charnik

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

For citation: Charnik D. G. On Effectiveness Issue of Steel Various Grade Use in the Structures of Prefabricated Constructions and Buildings in Northern Climatic Conditions on Russian Federation Territory // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 677–684. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-677-684

Summary

Purpose: To consider the issue on feasibility of using both conventional and stainless steels from the point of view of their application at the construction of buildings and structures made of Light Steel Thin-Walled Structures (LSTWS) in Northern climatic conditions. To identify main advantages and disadvantages in the use of light steel thin-walled structures in construction. To determine the most vulnerable spots at building construction from LSTWS. **Methods:** When conducting research on the effectiveness of steel various grade application for prefabricated construction and building structures in Northern climatic conditions, comparison methods were used from chemical and physical points of view. **Results:** The expediency and efficiency of using AISI 201 grade steels are substantiated. AISI 201 steel advantages not only from chemical but also from mechanical look are indicated. The vulnerabilities of the given steel at structure and building construction during exploitation are described. Ways to protect structures made of carbonaceous and low-alloy steels, depending on their assignment and operating conditions, have been defined. **Practical significance:** Study results show that AISI 201 steel is the most efficient from economic point of view. It is necessary to apply protection approaches for steel building materials at structure construction and exploitation as well as to use steel various types against an application sphere.

Keywords: Constructional low-alloy steels, stainless steels, LSTWS, steel impact strength, thin-walled structures.

References

1. Linejcev A. A. Problemy stroitel'stva sooruzhenij v Arktike [Problems of building structures in the Arctic]. *Molodoj uchenyj* [Young scientist]. 2021, I. 5(347), pp. 74–78. Available at: <https://moluch.ru/archive/347/77997/>. (In Russian)
2. Trubina D. A., Kononova L. A., Kaurov A. A. Mestnaya poterya ustojchivosti stal'nyh holodnogmutykh profilej v usloviyah poperechnogo izgiba [Local buckling of steel cold-formed profiles under conditions of transverse bending]. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij* [Construction of unique buildings and structures]. 2014, I. 4(19), pp. 109–127. (In Russian)
3. Sovetnikov D. O., Videnkov N. V., Trubina D. A. Legkie stal'nye tonkostennye konstrukcii v mnogoetazhnom stroitel'stve [Light steel thin-walled structures in high-rise buildings]. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij* [Construction of unique buildings and structures]. 2015, I. 3(30), 153 p. (In Russian)
4. Nezhdanov K. K., Zhukov A. N. Analiz sostoyaniya i prichin obrushenij stroitel'nyh konstrukcij v promyshlennyh zdaniyah [Analysis of the state and causes of collapse of building structures in industrial buildings]. *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction]. 2011, I. 1. (In Russian)
5. GOST 14918—2020. Prokat listovoj goryacheo-cinkovannyj. Tekhnicheskie usloviya [GOST 14918-2020. Rolled sheet hot-dip galvanized. Specifications]. (In Russian)
6. SP 260.1325800.2016. Konstrukcii stal'nye tonkostennye iz holodnogmutykh ocinkovannykh profilej i gofirovannykh listov [SP 260.1325800.2016. Thin-walled steel structures made of cold-formed galvanized profiles and corrugated sheets.]. (In Russian)
7. Rekomendacii po proektirovaniyu, izgotovleniyu i montazhu ograzhdayushchih i nesushchih konstrukcij iz stal'nykh gnutykh profilej povyshennoj zhestkosti [Recommendations for the design, manufacture and installation of enclosing and load-bearing structures made of steel bent profiles of increased rigidity]. Moscow: CNIIPSK Mel'nikova Publ., 1999, 32 p. (In Russian)
8. Zhukov A. N., Bulavenko V. O., Saidov D. H. Problemy i perspektivy razvitiya metallicheskih konstrukcij v promyshlennyh zdaniyah [Problems and prospects for the development of metal structures in industrial buildings]. *Molodoj uchenyj* [Young scientist]. 2011, I. 3(26), vol. 1, pp. 44–47. Available at: <https://moluch.ru/archive/26/2830/>. (In Russian)
9. Ekspluatatsiya metallicheskih konstrukcij [Operation of metal structures]. Available at: <http://domremstroy.ru/da/zdanie27.html>. (In Russian)

Received: August 17, 2022

Accepted: November 21, 2022

Author's information:

Dmitriy G. CHARNIK — Postgraduate Student; charnik_dmitriy@mail.ru

УДК 53.087, 681.2.08

Проблемы измерения потоков энергии излучения на объектах транспортной инфраструктуры с излучающей плазмой

В. Ф. Лапшин

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

Для цитирования: *Лапшин В. Ф.* Проблемы измерения потоков энергии излучения на объектах транспортной инфраструктуры с излучающей плазмой // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 685–692. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-685-692

Аннотация

Цель: Объекты транспортной инфраструктуры включают в себя многочисленные технические устройства, содержащие излучающую плазму. К их числу относятся источники видимого и спектрального излучения, коммутационные аппараты на тяговых подстанциях, высокотемпературные теплообменники и камеры сгорания. При экспериментальном исследовании таких устройств проводят измерения мощности и спектрального состава излучения, испускаемого плазмой. Для этого, как правило, используют фотодиоды небольших размеров, устанавливаемые на некотором расстоянии от плазменного образования. Цель настоящей работы состоит в установлении связи между мощностью излучения плазмы и величиной потока излучения, падающего на рабочую поверхность фотодиода. **Методы:** Для решения поставленной задачи в работе используется метод прямого интегрирования уравнения переноса излучения в предположении однородной структуры плазмы, но в отсутствии предположения о наличии локального термодинамического равновесия. Рассматриваются случаи отражающих и поглощающих поверхностей, ограничивающих плазму. **Результаты:** Найдены явные выражения для потока излучения, выходящего с поверхности плазменного образования, и потока, падающего на поверхность фотодиода. Численно исследована зависимость отношения величин этих потоков излучения от геометрических размеров и оптической толщины плазмы. Для случая отражающих поверхностей, ограничивающих плазму, найдено простое асимптотическое выражение для величины отношения потоков и определена область его применимости. **Практическая значимость:** Соотношения, устанавливающие связь между мощностью излучения плазмы и величиной мощности потока излучения, падающего на рабочую поверхность фотодиода, позволяют решить основную задачу экспериментального исследования плазменных образований — восстановления характеристик плазмы по результатам измерения фототока. Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при экспериментальном исследовании технических устройств, содержащих излучающую плазму.

Ключевые слова: Измерение потока излучения, излучающая плазма, уравнение переноса излучения.

Введение

Развитие объектов транспортной инфраструктуры требует решения большого числа технических задач. Одной из них является задача обеспечения надежной работы технических устройств, содержащих излучающую плазму. К таким устройствам относятся газоразрядные источники интенсивного видимого и селективного излучения, используемые для освещения объектов железнодорожной инфраструктуры, для обеззараживания воды в системах водоснабжения, для отвердевания строительных смесей в транспортном и гражданском строительстве и других целей. Излучающая плазма используется в высокотемпературных теплообменниках и камерах сгорания. Интенсивно излучающие дуги возникают в силовых электрических цепях: контактной сети электрифицированных железных дорог, в выключателях высокого напряжения, в коммутационных аппаратах на тяговых подстанциях и других устройствах [1–4]. В соответствии с широким применением технических устройств, включающих в себя излучающую плазму, ведется непрерывная работа по исследованию возможности улучшения их характеристик [5–7]. Центральное место в этих исследованиях занимает экспериментальное изучение. Плазменные образования всегда излучают в окружающее пространство значительную часть вложенной в них энергии. Измерения интенсивности и спектрального состава этого излучения позволяют получать разнообразную информацию о процессах, протекающих в технических устройствах. Для измерения мощности и спектра излучаемых плазмой электромагнитных волн используются фотодетекторы [8, 9]. Основной проблемой здесь является установление связи между энергией, поглощаемой фотодиодом, и энергией, излучаемой плазменным образованием. Сложность решения этой задачи связана с тем, что плазменный источник

излучения является протяженным и объемным, имеет конечную оптическую толщину и, кроме того, ограничен поверхностью, которая может быть отражающей или поглощающей. Цель настоящей работы состоит в том, чтобы установить связь между мощностью излучения плазменного образования в техническом устройстве и мощностью излучения, поглощаемого фотодиодом.

Решение уравнения переноса излучения

В работе рассматривается характерная для технических устройств цилиндрическая геометрия плазменного образования. Кроме того, поскольку в целом ряде случаев [9] свечение плазмы является однородным по объему, то поставленная задача решается в рамках модели однородной плазмы. Геометрия задачи изображена на рис. 1. Ось Z совмещена с осью плазменного цилиндра радиуса R , основания которого имеют координаты $z = -h/2$ и $z = h/2$. Фотодиод с небольшой по площади поверхностью S_d располагается перпендикулярно радиусу плазменного цилиндра на расстоянии L от его оси. При этом фотодиод расположен напротив плазменного образования так, что координата z_d его геометрического центра находится в пределах $-h/2 \leq z_d \leq h/2$. Размеры рабочей поверхности фотодиода обычно малы по сравнению с размерами излучающей плазмы. По этой причине поверхность S_d фотодиода можно считать освещенной равномерно. Мощность P_d потока излучения, падающего на фотодиод, задается в этом случае соотношением [10]:

$$P_d(\lambda) = S_d \int_{\Delta\Omega} (\vec{\Omega} \cdot \vec{n}) I_\lambda(\vec{\Omega}) \Big|_{S_d} d\Omega, \quad (1)$$

где I_λ — спектральная интенсивность излучения, падающего на поверхность фотодиода;
 $\Delta\Omega$ — телесный угол, в пределах которого фотоны достигают поверхности фотодиода.

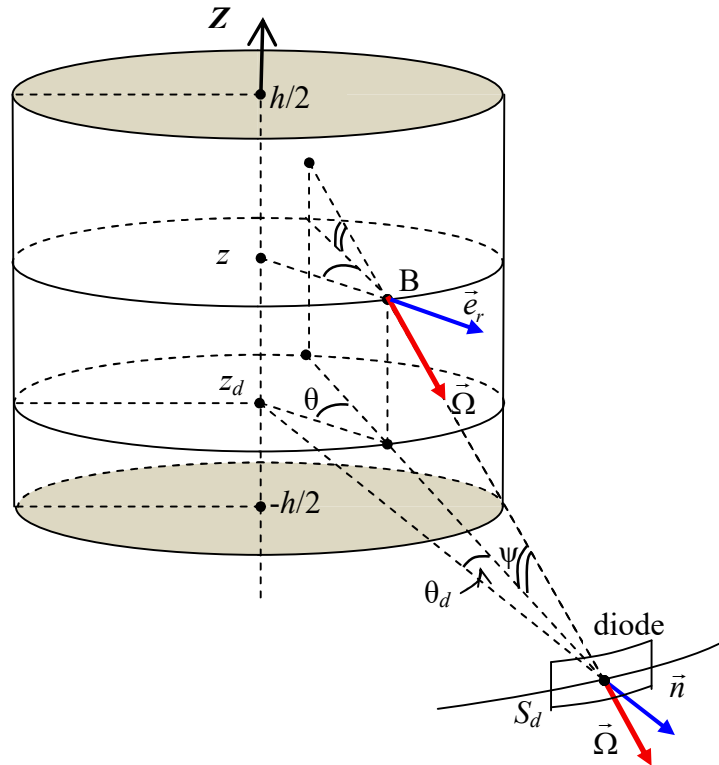


Рис. 1. Геометрия плазменного столба:

Ω — вектор единичной длины в направлении полета фотона; e_r — вектор единичной длины в радиальном направлении; n — нормаль к поверхности фотодиода

Отметим, что полярный и азимутальный углы θ_d и ψ_d вектора Ω , задающего направление полета фотона на поверхности фотодиода S_d , связаны с углами θ и ψ этого же вектора на поверхности S_{pl} плазменного цилиндра (см. рис. 1) соотношениями:

$$L \sin \theta_d = R \sin \theta \text{ и } \psi_d = \psi. \quad (2)$$

Как видно из рис. 1, телесный угол $\Delta\Omega$ определяется возможными значениями азимутального и полярного углов θ_d и ψ : $-\theta_{d \max} \leq \theta_d \leq \theta_{d \max}$ и $\psi_{\min} \leq \psi \leq \psi_{\max}$. Предельные значения углов задаются при этом соотношениями (см. рис. 1):

$$\sin \theta_{d \max} = R / L, \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \psi_{\min} = -\frac{0,5h + z_d}{L \cos \theta_d \mp R \cos \theta}, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \psi_{\max} = \frac{0,5h - z_d}{L \cos \theta_d \mp R \cos \theta}. \quad (5)$$

Здесь верхний знак в знаменателе соответствует случаю, когда поверхности, ограничивающие плазму сверху и снизу, являются отражающими (коэффициент отражения $\alpha = 1$), то есть когда фотоны могут прилетать на поверхность фотодиода S_d из любой точки на боковой поверхности плазмы S_{pl} . Нижний знак соответствует случаю поглощающих поверхностей, ограничивающих плазму (коэффициент отражения $\alpha = 0$). При этом основной вклад в поток излучения на диод вносят только те лучи, которые выходят из

точек на боковой поверхности цилиндра, противоположной от диода.

Для определения спектральной интенсивности I_λ в работе используется стационарное уравнение переноса излучения в однородной плазме [11, 12]:

$$\vec{\Omega}\nabla I_\lambda(r, z, \vec{\Omega}) = u_\lambda - k'_\lambda I_\lambda(r, z, \vec{\Omega}), \quad (6)$$

где u_λ — спектральная испускательная способность единицы объема плазмы в единичный телесный угол;

r — радиальная переменная;

k'_λ — коэффициент поглощения плазмы с учетом поправки на вынужденное излучение [13, 14].

Отметим здесь, что поглощением и излучением среды, окружающей плазменный объем, можно пренебречь. В этом случае, как следует из (6), величина спектральной интенсивности I_λ во внешней среде остается постоянной вдоль каждого направления: $I_\lambda(\Omega) = \text{const}$. Соответственно, задача определения мощности излучения, падающего на фотодиод, сводится к определению спектральной интенсивности излучения I_λ , выходящего с поверхности плазменного образования.

Для определения I_λ на поверхности плазмы в работе решается уравнение переноса излучения (6). При постановке граничных условий на боковой поверхности S_{pl} плазменного цилиндра считается, что излучение не входит в плазму через ее боковую поверхность: $I_\lambda(\Omega)|_{S_{pl}} = 0$ при $\Omega \cdot e_r < 0$. При постановке граничных условий на верхней и нижней поверхностях, ограничивающих плазменный столб, рассматриваются два случая: случай полностью отражающих ($\alpha = 1$) и полностью поглощающих ($\alpha = 0$) поверхностей. В этих условиях решение (6) имеет вид:

$$I_\lambda(z, \theta, \psi)|_{S_{pl}} = \frac{u_\lambda}{k'_\lambda} \left[1 - \exp\left(-\frac{k'_\lambda L(z, \theta, \psi)}{\cos \psi}\right) \right], \quad (7)$$

где $L(z, \theta, \psi) = 2R\cos\theta$ для $\alpha = 1$. Для $\alpha = 0$ $L(z, \theta, \psi) = 2R\cos\theta$ при $-\psi_1 < \psi < \psi_2$, $L(z, \theta, \psi) = (0,5h + z)\text{ctg}|\psi|$ при $-\pi/2 < \psi < -\psi_1$, $L(z, \theta, \psi) = (0,5h - z)\text{ctg}|\psi|$ при $\psi_2 < \psi < \pi/2$. Здесь $\text{tg}\psi_1 = -(0,5h + z)/2R\cos\theta$ и $\text{tg}\psi_2 = (0,5h - z)/2R\cos\theta$, $-0,5h \leq z \leq 0,5h$.

Вывод основных соотношений

Расчетную формулу для мощности P_d потока излучения, падающего на фотодиод, получим, подставляя в исходное выражение (1) решение уравнения переноса излучения (7):

$$P_d(\lambda) = 2 \frac{u_\lambda}{k'_\lambda} S_d \int_0^{\theta_d \max} d\theta_d \cos \theta_d \int_{\psi_{\min}}^{\psi_{\max}} d\psi \cos^2 \psi \times \left[1 - \exp\left(-\frac{k'_\lambda L(z, \theta, \psi)}{\cos \psi}\right) \right]. \quad (8)$$

Как видно из (4) и (5), пределы интегрирования в (8) имеют величину порядка $\psi_{\min} \sim \psi_{\max} \sim h/L$. При дальнейшем рассмотрении учтем, что в экспериментах обычно располагают фотодиод на расстоянии существенно большем, чем размеры плазменного образования, т. е. что $h/L \ll 1$. По этой причине во внутреннем интеграле в (8) с точностью до членов порядка $(h/L)^2$, можно положить $\cos \psi \approx 1$. Тогда, переходя с помощью (2) к интегрированию по переменной θ , получаем:

$$P_d(\lambda) = \frac{S_d}{4\pi L^2} \pi \frac{u_\lambda}{k'_\lambda} S_{pl} f_\lambda. \quad (9)$$

Здесь

$$f_\lambda = 4\pi^{-1}(1-b^2)^{-1} \int_0^{\pi/2} d\theta \cos \theta [1 - \exp(-\tau_D \cos \theta)] \times \left[(1-b^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \pm b \cos \theta \right],$$

где $\tau_D = 2Rk'_\lambda$ — оптическая толщина плазменного столба;

$b = R/L$. Знак « $\pm$ » в последнем выражении по-прежнему означает два случая граничных условий: знак « $+$ » соответствует случаю $\alpha = 1$, а знак « $-$ » — случаю $\alpha = 0$.

Теперь найдем мощность потерь энергии на излучение P_{pl} через боковую поверхность плазменного столба S_{pl} . Величина P_{pl} выражается через спектральную интенсивность излучения на этой поверхности:

$$P_{pl}(\lambda) = \int_{S_{pl}} dS \int_{(2\pi)} (\vec{\Omega} \cdot \vec{e}_r) I_\lambda(z, \vec{\Omega}) \Big|_{S_{pl}} d\Omega.$$

Используя здесь для величины I_λ выражение (7), получаем:

$$P_{spl} = \pi S_{pl} \frac{u_\lambda}{k'_\lambda} \varepsilon_\lambda, \quad (10)$$

где $S_{pl} = 2\pi R h$ — площадь излучающей поверхности плазмы. Величина ε_λ имеет смысл спектральной степени черноты и для случая отражающих поверхностей, ограничивающих плазму ($\alpha = 1$), имеет вид

$$\varepsilon_\lambda(\tau_D) = 1 - \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} d\theta \cos \theta \int_0^{\pi/2} d\psi \cos^2 \psi \exp \times \left(-\frac{\tau_D \cos \theta}{\cos \psi} \right), \quad (11)$$

а для поглощающей поверхности ($\alpha = 0$):

$$\varepsilon_\lambda(\tau_D, \delta) = \frac{2}{\pi} \int_0^1 dx \int_0^{\pi/2} d\theta \cos \theta \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\psi \cos^2 \psi \times [1 - \exp(-\tau_D g(x, \theta, \psi))]. \quad (12)$$

Здесь $\delta = h/4R$, $x = z/(0,5h)$, $g = \delta(1+x)/\sin(|\psi|)$ при $-\pi/2 < \psi < -\psi_1$, $g = \cos \theta / \cos \psi$ при $-\psi_1 < \psi < \psi_2$ и $g = \delta(1-x)/\sin \psi$ при $\psi_2 < \psi < \pi/2$.

Связь между мощностью P_{pl} излученной плазменным образованием, и мощностью P_d , поглощаемой фотодиодом, задается соотношением:

$$\frac{P_d}{P_{pl}} = \frac{S_d}{4\pi L^2} \gamma(\tau_D, R/L, \delta), \quad (13)$$

где $\gamma = f_\lambda/\varepsilon_\lambda$ — безразмерная функция, зависящая от оптической толщины τ_D и геометрических параметров R/L и $\delta = h/4R$.

Теперь отметим, что в экспериментах по исследованию излучения плазменных образований фотодетекторы располагают, как правило, на значительных расстояниях от плазмы. Сама плазма, имея небольшие размеры, в большинстве случаев является оптически прозрачной. Это позволяет, используя малость величин R/L и τ_D , разложить подынтегральные функции в (11) и (12) в ряды по этим параметрам. Соответствующие интегралы вычисляются и в случае $\alpha = 1$ приводят к явному выражению для γ :

$$\gamma = \frac{c_0 - c_1 \tau_D + c_2 \tau_D^2}{(1 - 2\tau_D / 3 + 0,125 \tau_D^2 (a - \ln \tau_D))}. \quad (14)$$

Здесь $c_0 = 1 + 8b/3\pi + 7b^2/8$, $c_1 = 4(1 + 9\pi b/32 + 0,9b^2)$, $c_2 = 0,125(1 + 128b/45 + 11b^2/12)$, $a = 1,25 + 2\ln 2 - C_E = 2,059079$, $C_E = 0,5772157$ — постоянная Эйлера. Отметим, что при выводе выражения (13) пренебрегалось членами порядка $(h/L)^2$, а при записи (14), кроме того, опущены величины порядка $(R/L)^4$ и $(\tau_D)^3$.

Результаты вычислений и обсуждение

Приступая к обсуждению результатов, прежде всего отметим, что величина $S_d / 4\pi L^2$ в (13) представляет из себя зависимость отношения P_d / P_{pl} от расстояния L для простейшего случая точечного изотропного источника. Соответственно, величина γ в (13) характеризует отличие этой зависимости от простейшего случая, обусловленное конечностью геометрических размеров и оптической толщины плазмы, а также свойствами поверхностей, ограничивающих плазму. На рис. 2 приведены результаты расчета зави-

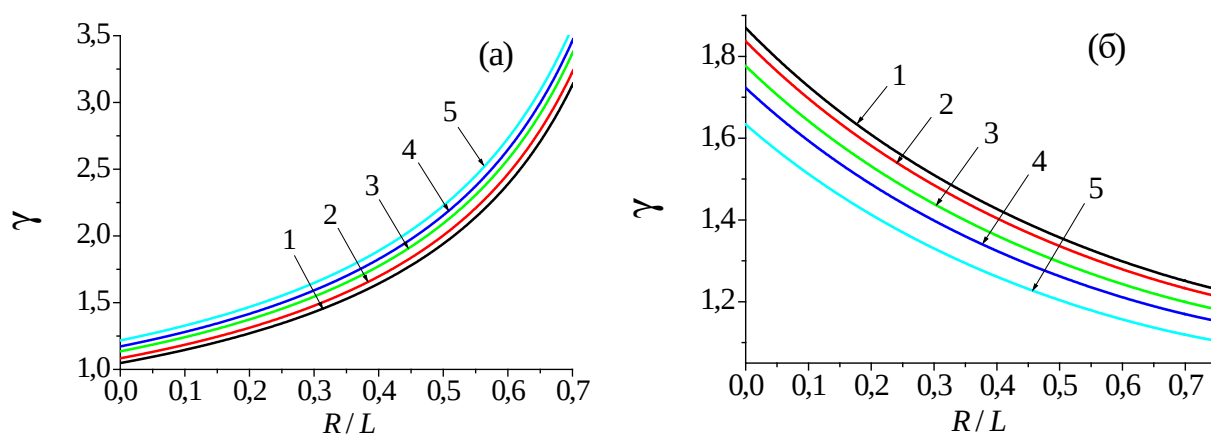


Рис. 2. Зависимость величины γ от отношения R/L в случае отражающих (а) и поглощающих (б) оснований плазменного цилиндра при разных значениях оптической толщины столба плазмы τ_D : 1 — 0,1; 2 — 0,5; 3 — 1,0; 4 — 1,5; 5 — 2,5

симости величины $\gamma = f_\lambda / \varepsilon_\lambda$ от геометрического параметра R/L для случаев, когда поверхности, ограничивающие плазменный цилиндр сверху и снизу, являются отражающими (рис. 2, а, $\alpha = 1$) и поглощающими (рис. 2, б, $\alpha = 0$, $h = R$). Хорошо видно, что величина γ слабо зависит от оптической толщины столба плазмы τ_D : при изменении τ_D в 25 раз (от 0,1 до 2,5) γ меняется в пределах 20 %. Также отметим здесь, что характер зависимости от расстояния L для случаев $\alpha = 0$ и $\alpha = 1$ существенно отличается. По мере удаления фотодиода от излучающей плазмы, при $\alpha = 1$ (отражающие основания плазменного цилиндра) отношение P_d / P_{pl} стремится к значению, соответствующему точечному источнику. При $\alpha = 0$ (поглощающие основания), наоборот, при удалении от плазменного излучателя величина P_d / P_{pl} все более отличается от значения для точечного источника.

Заключение

В настоящей работе рассмотрена задача, возникающая при измерении потерь энергии на излучение в технических устройствах, содержащих излучающую плазму. Решено уравнение переноса излучения в условиях, характерных для экспериментального исследования излучательных

свойств плазмы. Получены соотношения, устанавливающие связь между мощностью излучения плазмы и величиной мощности потока излучения, падающего на рабочую поверхность фотодиода. Выполнены расчеты зависимости отношения этих мощностей от геометрических размеров плазменного образования и его оптической толщины. Для случая отражающих поверхностей, ограничивающих плазму, получена простая асимптотическая формула. Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при экспериментальном исследовании технических устройств, содержащих излучающую плазму.

Библиографический список

1. Райзер Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. — Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. — 736 с.
2. Lapshin V. F. Eco-friendly sun lamp for railway facilities / V. F. Lapshin // J. Phys.: Conf. Ser. — 2021. — Vol. 2131(4). — P. 042092.
3. Zabello K. K. Anode Surface State and Anode Temperature Distribution after Current Zero for Different AMF-Contact Systems / K. K. Zabello, I. N. Poluyanov, A. A. Logachev et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. — 2019. — Vol. 47. — № 8(1). — Pp. 3563–3571.
4. Logachev A. A. Cathode Surface State and Cathode Temperature Distribution after Current Zero of Different

AMF-Contacts / A. A. Logachev, I. N. Poluyanov, K. K. Zabello et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. — 2019. — Vol. 47. — № 8(1). — Pp. 3516–3524.

5. Wang L. J. Simulation results of influence of constricted arc column on anode deformation and melting pool swirl in vacuum arcs with AMF contacts / L. J. Wang, X. Zhang, X. Huang et al. // Phys. Plasmas. — 2017. — Vol. 24(11). — P. 113511

6. Li T. Simulation of Electric Arc Characteristics Based on MATLAB/Simulink / T. Li, H. Li // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. — 2018. — Vol. 452(4). — P. 042080.

7. Litvinova V. V. Stochastic model of thermal processes in the contact network at arc discharges occurring at high speeds of movement / V. V. Litvinova, V. I. Moiseev, E. V. Runev // CEUR Workshop Proceedings. — 2020. — Vol. 2803. — Pp. 84–91.

8. Poluyanov I. N. Measurements of Thermal Radiation Brightness of Anode Surface After Current Zero for a Range of Current Levels / I. N. Poluyanov, K. K. Zabello, A. A. Logachev et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. — 2017. — Vol. 45. — № 8(2). — Pp. 2119–2125.

9. Баринов Ю. А. Мощность излучения сильноточной вакуумной дуги, стабилизированной аксиальным магнитным полем, в видимой и ультрафиолетовой областях спектра / Ю. А. Баринов, К. К. Забелло, А. А. Логачев и

др. // Письма в ЖТФ. — 2021. — Т. 47. — Вып. 3. — С. 18–20

10. Lapshin V. F. Radiative heat transfer in plasma of pulsed high pressure caesium discharge / V. F. Lapshin // J. Phys.: Conf. Ser. — 2016. — Vol. 669. — P. 012035.

11. Зельдович Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. — М.: Физматлит, 2008. — 656 с.

12. Abaszadeh M. Analysis of radiative heat transfer in two-dimensional irregular geometries by developed immersed boundary-lattice Boltzmann method / M. Abaszadeh, A. Safavinejad, A.A. Delouei et al. // JQSRT. — 2022. — Vol. 280. — P. 108086.

13. Baksht F. G. Modeling of the Plasma Waveguide on the Basis of the Pulse-Periodic High-Pressure Cesium Discharge / F.G. Baksht, V.F. Lapshin // Plasma Phys. Rep. — 2020. — Vol. 46. — Pp. 846–849.

14. Loginov A. V. Radiative Constants in the W VII Ion Spectrum / A. V. Loginov, V. I. Nikitchenko // Optics and Spectroscopy. — 2020. — Vol. 128(8). — Pp. 1078–1081.

Дата поступления: 21.06.2022

Решение о публикации: 08.08.2022

Контактная информация:

ЛАПШИН Владимир Федорович — д-р физ.-мат. наук, проф.; lapshinvf@mail.ru

Problems of Radiation Energy Flux Measurement at Transport Infrastructure Facilities with Radiating Plasma

V. F. Lapshin

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

For citation: Lapshin V. F. Problems of Radiation Energy Flux Measurement at Transport Infrastructure Facilities with Radiating Plasma // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 685–692. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-685-692

Summary

Purpose: Transport infrastructure objects comprise numerous technical devices containing radiating plasma. They include visible and spectral radiation sources, switching devices at traction substations, high-temperature heat exchangers and combustion chambers. During experimental study of such devices, the measurements of power and spectral composition of radiation emitted by plasma are carried out. For this, as a rule, photodiodes of small sizes are used, installed at a certain distance from plasma formation. The purpose of the present work is to establish relationship between plasma emission power and radiation flux amount incident on photodiode working surface. **Methods:** To solve the set task, the method of direct integration of radiation transfer equation

in homogeneous plasma structure assumption, but in the absence of local thermodynamic equilibrium presence assumption, is used. The cases of reflecting and absorbing surfaces, limiting a plasma, are considered. **Results:** Explicit expressions are found for radiation flux which exits plasma formation surface and for flux incident on photodiode surface. The dependence for the ratio of the values of these radiation fluxes to plasma geometric sizes and optical thickness is numerically studied. For the case of reflecting surfaces that bound plasma, simple asymptotic expression is found for ratio value for the fluxes and applicability field of the expression is determined. **Practical significance:** The ratios, which establish relationship between plasma radiation power and power value for radiation flux incident on photodiode working surface, make it possible to solve the main task of the experimental study of plasma formations — the restoration of plasma characteristics according to photocurrent measurement results. Obtained in the work results can be used at experimental study of technical devices containing emitting plasma.

Keywords: Measurement of radiation flux, radiating plasma, radiative transfer equation.

References

1. Rayzer Yu. P. *Fizika gazovogo razryada* [Physics of gas discharge]. Dolgoprudnyy: «Intellekt» Publ., 2009. 736 p. (In Russian)
2. Lapshin V. F. Eco-friendly sun lamp for railway facilities. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021, vol. 2131(4), pp. 042–092.
3. Zabello K. K., Poluyanov I. N., Logachev A. A., Begal D. I., Shkol'nik S. M. Anode Surface State and Anode Temperature Distribution after Current Zero for Different AMF-Contact Systems. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2019, vol. 47, I. 8 (1), pp. 3563–3571.
4. Logachev A. A., Poluyanov I. N., Zabello K. K., Barinov Yu. A., Shkol'nik S. M. Cathode Surface State and Cathode Temperature Distribution after Current Zero of Different AMF-Contacts. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2019, vol. 47, I. 8 (1), pp. 3516–3524.
5. Wang L. J., Zhang X., Huang X., Jia S. L. Simulation results of influence of constricted arc column on anode deformation and melting pool swirl in vacuum arcs with AMF contacts. *Phys. Plasmas.* 2017, vol. 24 (11), pp. 113–511.
6. Li T., Li H. Simulation of Electric Arc Characteristics Based on MATLAB/Simulink. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018, vol. 452 (4), p. 042080.
7. Litvinova V. V., Moiseev V. I., Runev E. V. Stochastic model of thermal processes in the contact network at arc discharges occurring at high speeds of movement. *CEUR Workshop Proceedings.* 2020, vol. 2803, pp. 84–91.
8. Poluyanov I. N., Zabello K. K., Logachev A. A., Yakovlev V. V., Shkol'nik S. M. Measurements of Thermal Radiation Brightness of Anode Surface After Current Zero for a Range of Current Levels. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2017, vol. 45, I. 8(2), pp. 2119–2125.
9. Barinov Yu. A. Moshchnost' izlucheniya sil'notochnoy vakuumnoy dugi, stabilizirovannoy aksial'nym magnitnym polem, v vidimoy i ul'trafioletovoy oblastiakh spektra [Radiation power of a high-current vacuum arc stabilized by an axial magnetic field in the visible and ultraviolet regions of the spectrum]. *Pis'ma v ZhTF* [Letters to ZhTF]. 2021, vol. 47, I. 3, pp. 18–20. (In Russian)
10. Lapshin V. F. Radiative heat transfer in plasma of pulsed high pressure caesium discharge. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016, vol. 669, pp. 012–035.
11. Zel'dovich Ya. B., Rayzer Yu. P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy* [Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2008. 656 p. (In Russian)
12. Abaszadeh M., Safavinejad A., Delouei A. A., Amiri H. Analysis of radiative heat transfer in two-dimensional irregular geometries by developed immersed boundary–lattice Boltzmann method. *JQSRT.* 2022, vol. 280, pp. 108086.
13. Baksht F. G., Lapshin V. F. Modeling of the Plasma Waveguide on the Basis of the Pulse-Periodic High-Pressure Cesium Discharge. *Plasma Phys. Rep.* 2020, vol. 46, pp. 846–849.
14. Loginov A. V. Radiative Constants in the W VII Ion Spectrum. *Optics and Spectroscopy.* 2020, vol. 128(8), pp. 1078–1081.

Received: June 21, 2022

Accepted: August 08, 2022

Author's information:

Vladimir F. LAPSHIN — Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor; lapshinvf@mail.ru

УДК 528.486.3

Определение точности геодезических измерений при реконструкции исторических объектов

Н. Н. Богомолова

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

Для цитирования: Богомолова Н. Н. Определение точности геодезических измерений при реконструкции исторических объектов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 693–701. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-693-701

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос назначения точности разбивочных работ на стадии реконструкции технически сложного объекта. Показать необходимость предварительного расчета точности. После назначения точности геодезических измерений осуществить проектирование геодезической сети в программном комплексе Credo.dat. Определить класс нивелирования, удовлетворяющий сформированным требованиям. **Методы:** Теория ошибок измерений, метод наименьших квадратов, параметрический способ уравнивания, моделирование геодезических сетей с использованием пакета прикладных программ. **Результаты:** Установлены требования к точности разбивочных работ на основе требований действующих нормативных документов. Рассмотрена последовательность формирования требований к точности определения положения пунктов геодезической разбивочной основы и требований к точности используемых геодезических приборов. Отдельно рассчитана точность плановой и высотной геодезических сетей. Показана возможность применения программы нивелирования III класса при создании высотной сети для удовлетворения установленных требований точности. **Практическая значимость:** На конкретном примере изложена последовательность назначения точности геодезических работ при реконструкции исторического объекта, предложенная методика может быть рекомендована к практическому использованию.

Ключевые слова: Определение точности, геодезические работы, полигонометрия, геометрическое нивелирование.

Введение

Вопрос предварительного расчета точности возникает при организации различных геодезических работ: разбивочных, исполнительных, мониторинговых. Нормативные документы содержат рекомендации по определению точности геодезических работ. Необходимая точность

геодезических наблюдений при сооружении или реконструкции объектов обеспечивается различными методами и приборами, поэтому результаты ее расчета влияют на применение тех или иных методик и средств измерений. Рассмотрим далее пример предварительного расчета точности геодезических наблюдений при реконструк-

ции исторического здания Большого драматического театра им. Товстоногова, расположенного в Санкт-Петербурге.

С 2011 по 2014 год БДТ был закрыт на капитальную реконструкцию, по окончании которой зрители увидели обновленные интерьеры и отреставрированный зал. В соответствии с проектом требовалось создание геодезической разбивочной основы для выноса осей на все горизонты реконструируемого театра.

Определение точности геодезических измерений при выносе осей в плане

В соответствии с действующими на момент реконструкции нормами было установлено, что при производстве разбивочных работ требуемая точность линейных и угловых измерений составляет 1/5000 и 20» соответственно [1]. При этом разбивочные работы планировалось производить полярным способом, опираясь на пункты геодезической разбивочной основы, которые, в свою очередь, определялись методом полигонометрии от исходных пунктов, расположенных на набережной Реки Фонтанки. Таким образом, ошибка положения выносимой в натуру точки P , закрепляющей любую из осей здания, определяется формулой [2]:

$$m_P = \sqrt{m_{P_{\text{изм}}}^2 + m_{P_{\text{исх}}}^2},$$

где $m_{P_{\text{исх}}}$ — ошибки исходных данных;

$m_{P_{\text{изм}}}$ — ошибки измерений.

Для дальнейших расчетов примем, что ввиду коротких расстояний (20 м) от пунктов сети до выносимых точек ошибки измерений будут в 2 раза меньше по сравнению с ошибками пунктов сети, т. е. $m_{P_{\text{изм}}} = 0,5m_{P_{\text{исх}}}$.

Преобразуем выражение для нахождения ошибки определения положения выносимой точки P :

$$m_P = \sqrt{\frac{1}{4}m_{\text{исх}}^2 + m_{\text{исх}}^2} = 1,1m_{\text{исх}}.$$

Ошибки измерений будут найдены как ошибки определения положения точки полярным способом [3]:

$$m_{\text{ПС}} = \sqrt{m_d^2 + d^2 m_\alpha^2 \frac{1}{\rho^2}},$$

где m_d — средняя квадратическая ошибка (далее — СКО) линейных измерений;

m_α — СКО определения углов;

d — расстояние от пункта до выносимой точки;

$\rho = 206\,265$ — число секунд в радиане.

Исходя из схемы проектирования сети (рис. 1), примем для расчетов, что максимальное удаление выносимой точки от пункта геодезической разбивочной сети не будет превосходить 20 м. Тогда СКО измерения длин линий, исходя из величины относительной ошибки 1/5000, составит 4 мм. Подставив в формулу приведенные значения, определим ошибку определения выносимой точки, она составит 4,4 мм.

Следовательно, СКО определения положения пунктов геодезической разбивочной сети не должно превышать:

$$m_{\text{исх}} = 2m_{\text{изм}} = 8,8 \text{ мм.}$$

Вычислим необходимую СКО определения положения выносимой точки:

$$m_P = 1,1m_{\text{исх}} = 9,7 \text{ мм.}$$

Проектирование плановой геодезической разбивочной основы

Для геодезического обеспечения реконструкции здания театра предполагалось создание плановой геодезической сети методом полигонометрии. Схема сети представлена на рис. 2.

В качестве исходных пунктов для проложения полигонометрического хода было принято два пункта OS6 ($x = 452,620$ м, $y = 263,571$ м) и OS9 ($x = 446,893$ м, $y = 283,147$ м), закрепленных на набережной Реки Фонтанки, с которых выпол-

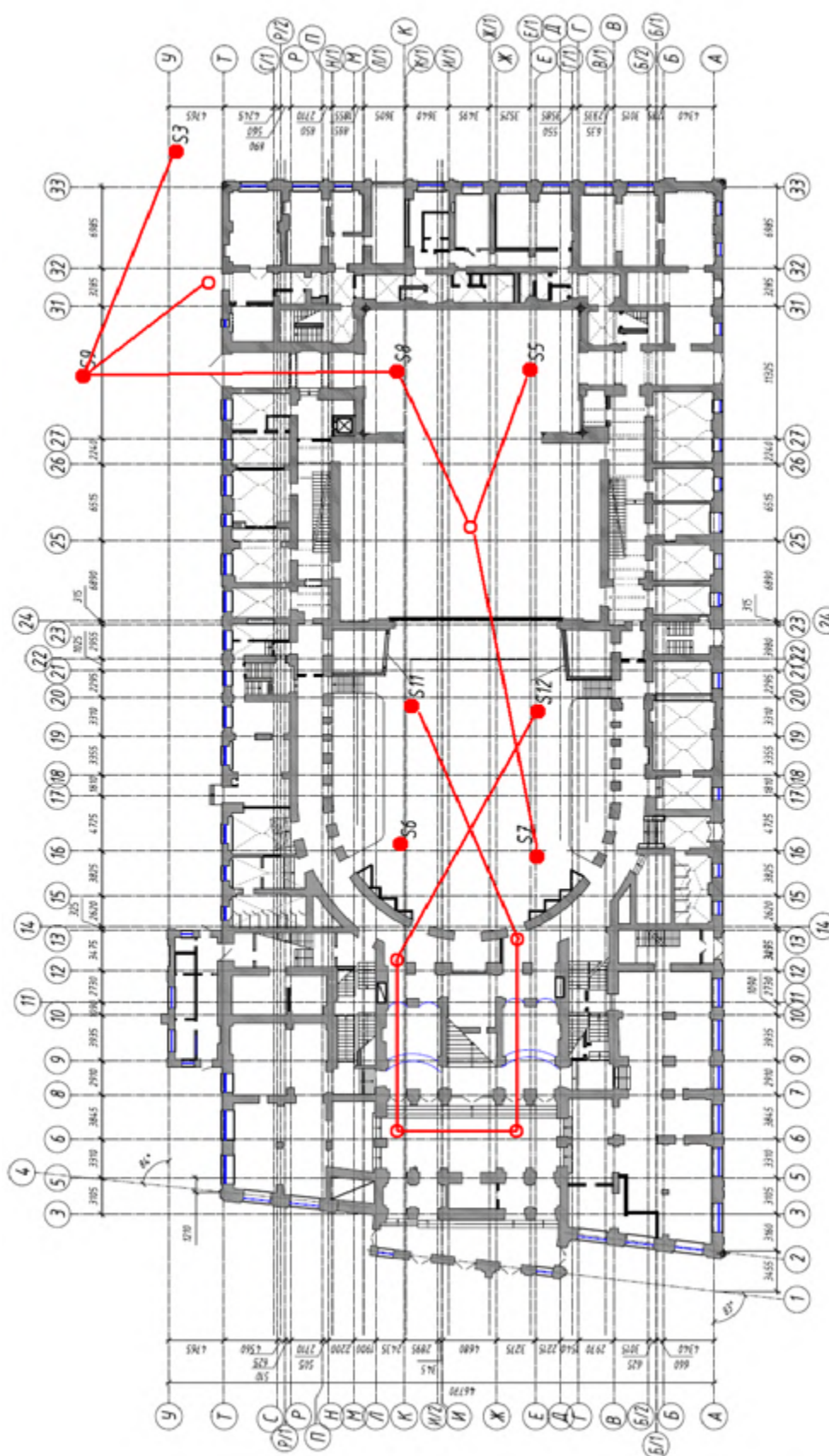


Рис. 1. Проект расположения пунктов сети на 1 этаже (закрашенные точки — пункты сети, незакрашенные точки — точки закрепляемых осей)

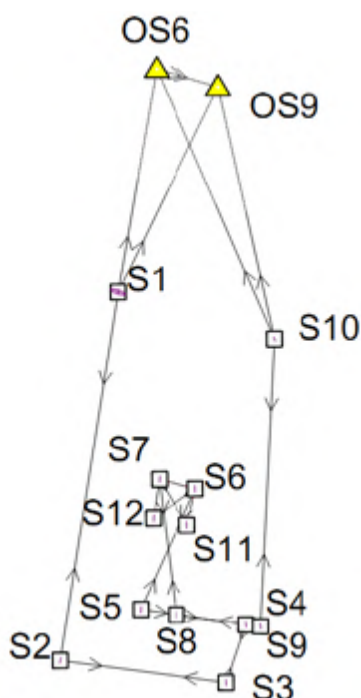


Рис. 2. Схема проектируемой сети

нялся мониторинг деформаций здания театра и окружающей застройки. Помимо двух исходных пунктов требовалось заложить 12 новых пунктов, из них 6 пунктов с внешней стороны театра и 6 пунктов внутри театра (2 на сцене, 4 в зрительном зале). Пункты предполагалось закреплять в асфальт, бетон и гранитную набережную. Для установления точности проектируемой геодезической сети по схеме были определены приближенные координаты пунктов.

При определении координат пунктов внутренней разбивочной сети предполагалось использование метода полигонометрии по трехштативной системе. На основе приближенных координат станций по вычисленным углам и расстояниям была составлена модель измерений.

Исходные пункты сети OS6, OS9 были приняты безошибочными, ожидаемые погрешности измерений: для направлений — 1", для расстояний — 1 мм. Проектирование выполнялось в программном продукте *КРЕДО ДАТ*.

В результате было установлено, что при заданной конфигурации сети средние квадратические погрешности определения положения всех пунктов сети не превышают 7 мм, а наиболее слабыми являются пункты сети S2 и S3, ошибки которой составляют: $m_x = 1$ мм, $m_y = 7$ мм и $M = 7$ мм (табл. 1, 2). В представленных таблицах: a, b — размеры полуосей эллипсов ошибок, проекции полуосей на координатные оси равны составляющим m_x, m_y , СКО положения пунктов, M — значение СКО планового положения определяемого пункта, α — угол наклона большой полуоси к оси абсцисс.

Наиболее слабой стороной является S2-S1, ее погрешность вдоль стороны — 1 мм, поперек стороны — 4 мм.

Результаты проектирования сети подтверждают возможность использования предложенной модели с обеспечением заданной точности и простотой исполнения.

Для производства работ по закреплению осей здания на 2, 3, 4 этажах, а также в подвальном и чердачном помещениях было необходимо создание геодезической основы, удовлетворяющей заявленным выше требованиям по точности. Ниже рассмотрен один из возможных вариантов построения схемы сети на втором этаже. В данном варианте сеть опирается на два исходных пункта, расположенных на набережной Реки Фонтанки, при этом при создании пунктов на втором этаже реализуется возможность передачи координат с первого этажа через оконные проемы возле сцены театра.

Технология создания сети предполагала применение трехштативной системы, схема сети второго этажа театра изображена на рис. 3, результаты предварительного расчета точности — в табл. 3.

В результате было установлено, что в предложенной модели сети наиболее слабыми пунктами будут пункты 12, 13 с ошибками $m_x = 10$ мм,

ТАБЛИЦА 1. Априорная оценка точности положения пунктов сети

Пункт	M , м	m_x , м	m_y , м	a	b	α
1	2	3	4	5	6	7
S1	0,003	0,001	0,002	0,002	0,001	108°06'37,96"
S2	0,007	0,002	0,006	0,006	0,001	102°01'02,56"
S3	0,007	0,001	0,007	0,007	0,001	85°47'41,04"
S4	0,006	0,001	0,006	0,006	0,001	83°02'43,52"
S5	0,006	0,001	0,006	0,006	0,001	94°18'18,02"
S6	0,005	0,001	0,004	0,004	0,001	87°37'42,81"
S7	0,004	0,001	0,004	0,004	0,001	92°49'06,22"
S8	0,006	0,001	0,006	0,006	0,001	89°50'59,03"
S9	0,006	0,001	0,006	0,006	0,001	80°44'01,47"
S10	0,003	0,001	0,003	0,003	0,001	67°01'04,79"
S11	0,005	0,001	0,005	0,005	0,001	89°06'58,13"
S12	0,005	0,001	0,005	0,005	0,001	93°17'45,97"

$m_y = 2$ мм и $M = 10$ мм, что превышает заданную величину 8,8 мм. Уменьшения СКО пунктов 12, 13 возможно добиться путем увеличения числа приемов при измерении углов.

Определение точности геодезических измерений при выносе осей по высоте

Согласно установленным требованиям, средняя квадратическая погрешность определения превышения на станции при производстве разбивочных работ не должна превышать 2,5 мм.

Исходя из предварительной схемы работ, закреплять оси здания театра по высоте было предложено с одной станции, передавая отметку с исходного репера. При этом заданная точность обеспечится выбором соответствующей модели нивелира.

Для определения высот точек, закрепляющих оси здания театра, должны быть проложены ходы геометрического нивелирования. Согласно предварительной схеме, длина ходов нивелирования на всех этажах здания должна составить более 1 км. Для того чтобы исключить влияние ошибок исходных данных на результаты разбивочных работ, необходимо создать геодезическую высот-

ную основу, ошибки которой пренебрежимо малы по сравнению с ошибками выноса осей театра, т. е.:

$$m_h = \frac{2,5}{3} = 0,8 \text{ мм.}$$

Определим, соблюдается ли условие, что при СКО, равной 0,8 мм, невязка не превысит 10 мм [4–7]:

$$f_h \leq 10 \text{ мм} \sqrt{L},$$

где 10 мм — предельная допустимая ошибка на 1 км хода.

Средняя квадратическая погрешность определения превышения на 1 км хода будет в 2,5 раза меньше предельной и составит 4 мм. При длине визирного луча 20 м — в 1 км нивелирного хода будет 25 установок нивелира и ошибка превышения на станции будет равна 0,8 мм.

Допустимая невязка 10 мм соответствует требованиям программы нивелирования III класса. Наиболее слабый пункт будет располагаться в середине хода, и его ошибка составит 2,8 мм.

ТАБЛИЦА 2. Каталог приближенных координат пунктов планового обоснования

Пункт	х, м	у, м	Дирекционный угол	На пункт
1	2	3	4	5
OS6	452,620	263,571		
OS9	446,893	283,147		
S1	381,500	251,300	9°47'21,82"	OS6
			25°57'59,45"	OS9
			188°52'02,09"	S2
S2	264,200	233,000	8°52'02,09"	S1
			97°32'41,24"	S3
S3	257,220	285,700	277°32'41,24"	S2
			18°46'48,97"	S4
S4	275,600	291,950	198°46'48,97"	S3
			278°17'44,68"	S5
S5	280,470	258,550	98°17'44,68"	S4
			24°19'32,68"	S6
S6	318,850	275,900	204°19'32,68"	S5
			284°40'55,08"	S7
			193°02'11,96"	S11
			235°21'18,33"	S12
S7	321,850	264,450	104°40'55,08"	S6
			172°51'31,04"	S8
			148°38'59,71"	S11
			188°50'03,08"	S12
S8	278,750	269,850	352°51'31,04"	S7
			97°51'14,54"	S9
S9	275,060	296,600	277°51'14,54"	S8
			2°45'35,09"	S10
S10	366,650	301,015	182°45'35,09"	S9
			336°27'52,55"	OS6
			347°26'47,57"	OS9
S11	307,405	273,250		
S12	309,625	262,550		

Заключение

В работе описана методика формулирования требований точности геодезических измерений на основании данных нормативных документов. В качестве них для предрасчета точности геоде-

зических измерений приняты следующие величины: относительная ошибка линейных измерений — $1/5000$, СКО угловых измерений $m_{\beta} = 20''$, СКО определения превышения на станции нивелирования $m_h = 2,5$ мм.

Библиографический список

1. СНиП 3.01.03—84. Геодезические работы в строительстве. — Утв. постановлением Госстроя СССР от 4 февраля 1985 года № 15. — М.: ФГУП ЦПП, 2006. — 28 с.
2. Зайцев А. К. Геодезические методы исследования деформаций сооружений / А. К. Зайцев, С. В. Марфенко, Д. Ш. Михелев и др. — М.: Недра, 1991. — 272 с.
3. Киселев М. И. Геодезия: учебник для проф. вузов / М. И. Киселев. — М., 2004.
4. Маркузе Ю. И. Основы уравнильных вычислений / Ю. И. Маркузе. — М.: Недра, 1990. — 240 с.
5. Маркузе Ю. И. Теория математической обработки геодезических измерений. Книга 2. Основы метода наименьших квадратов и уравнильных вычислений: учеб-

ное пособие / Ю. И. Маркузе. — М.: МИИГАиК, 2005. — 280 с.

6. Марфенко С. В. Геодезические работы по наблюдению за деформациями сооружений: учебн. пособие / С. В. Марфенко. — М.: МИИГАиК, 2004. — 36 с.

7. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. — М.: Картогеоцентр — Геодезиздат, 2004. — 226 с.

Дата поступления: 04.08.2022

Решение о публикации: 05.10.2022

Контактная информация:

БОГОМОЛОВА Наталья Николаевна — канд. техн. наук, доц.; nbogomolova@yandex.ru

Accuracy Appointment for Geodetic Measurements in Historical Object Reconstruction

N. N. Bogomolova

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

For citation: Bogomolova N. N. Accuracy Definition for Geodetic Measurements in Historical Object Reconstruction // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 693–701. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-693-701

Summary

Purpose: To consider the issue of the assignment of marking work accuracy at reconstruction stage of a technically complex object. To show the need in accuracy preliminary calculation. After the assignment of geodetic measurement accuracy, to perform geodetic network designing in Credo.dat software package. To determine leveling class that satisfies formed requirements. **Methods:** Measurement error theory, least squares method, parametric adjustment method, modeling of geodetic networks using package of applied programs. **Results:** Requirements for the accuracy of marking works were established based on the ones of current regulatory documents. The sequence of the formation of requirements for definition of accuracy in geodetic staking base locations and requirements for the accuracy of used geodetic instruments is considered. Separately, the accuracy of planned and altitudinal geodetic networks is calculated. The possibility to apply class III leveling program when creating altitudinal network to meet accuracy established requirements is shown. **Practical significance:** The sequence of geodetic work accuracy assignment during historical object reconstruction is outlined on a particular example, the proposed methodology can be recommended for a practical use.

Keywords: Appointment of accuracy, geodetic works, geodetic monitoring, polygonometry, geometric leveling.

References

1. SNiP 3.01.03-84 *Geodezicheskie raboty v stroitel'stve*. — utv. postanovleniem Gosstroya SSSR ot 4 fevralya 1985 goda N 15 [SNiP 3.01.03-84 Geodetic works in construction. — approved. Decree of the Gosstroy of the USSR of February 4, 1985 N 15]. Moscow: FGUP TsPP Publ., 2006. 28 p. (In Russian)
2. Zaytsev A. K. *Geodezicheskie metody issledovaniya deformatsiy sooruzheniy* [Geodetic methods for studying the deformations of structures]. Moscow: Nedra Publ., 1991. 272 p. (In Russian)
3. Kiselev M. I. «*Geodeziya: uchebnik dlya prof.vuzov*» [“Geodesy: a textbook for professional universities”]. Moscow, 2004. (In Russian)
4. Markuze Yu. I. *Osnovy uravnitel'nykh vychisleniy* [Fundamentals of equalizing calculations]. Moscow: Nedra Publ., 1990. 240 p. (In Russian)
5. Markuze Yu. I. *Teoriya matematicheskoy obrabotki geodezicheskikh izmereniy. Kniga 2. Osnovy metoda*

naimen'shikh kvadratov i uravnitel'nykh vychisleniy [Theory of mathematical processing of geodetic measurements. Book 2. Fundamentals of the method of least squares and equalizing calculations]. Moscow: MIIGAiK Publ., 2005. 280 p. (In Russian)

6. Marfenko S. V. *Geodezicheskie raboty po nablyudeniyu za deformatsiyami sooruzheniy* [Geodetic work on monitoring the deformations of structures]. Moscow: MIIGAiK Publ., 2004. 36 p. (In Russian)

7. *Instruktsiya po nivelirovaniyu I, II, III i IV klassov* [Instructions for leveling I, II, III and IV classes]. Moscow: Kartgeotsentr-Geodezizdat Publ., 2004. 226 p. (In Russian)

Received: August 04, 2022

Accepted: October 05, 2022

Author's information:

Natalia N. BOGOMOLOVA — PhD in Engineering,
Associate Professor; nbogomolova@pgups.ru

УДК 691.55

Дизайн состава штукатурного раствора для реставрации каменных и кирпичных памятников архитектуры

Т. Ю. Сафонова

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

Для цитирования: Сафонова Т. Ю. Дизайн состава штукатурного раствора для реставрации каменных и кирпичных памятников архитектуры // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 702–711. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-702-711

Аннотация

Цель: Исследовать возможность использования искусственного пуццолана для создания модифицированного гипсоизвесткового раствора, рекомендуемого к реставрации памятников архитектуры. **Методы:** При проведении исследований использовали ГОСТ 125—79 «Вяжущие гипсовые. Технические условия», ГОСТ 23789—79 «Вяжущие гипсовые. Методы испытаний», ГОСТ 10180—90 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», ГОСТ 24544—81 «Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести», ГОСТ 8735—14 «Песок для строительных работ. Метод испытаний» и ГОСТ 8736—14 «Песок для строительных работ. Технические условия». Установлено экспериментально, что для создания надежной матрицы, совместимой с традиционными материалами исторической кладки, эффективно применение реставрационного состава, включающего метакраолин и доломитовую муку. **Результаты:** Представлен процесс проектирования реставрационного материала для замены поврежденной штукатурки стен и потолков, обсуждаются прочностные характеристики камня различных составов на основе воздушных вяжущих, сделан вывод о необходимости разработки двух типов реставрационных материалов: на семейство известковых штукатурок и на семейство гипсоизвестковых штукатурок. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы при частичной или полной замене штукатурки, что позволит сохранить архитектурный облик сооружения.

Ключевые слова: Гипс, известь, метакраолин, заполнитель, прочность на сжатие.

Введение

Вопрос совместимости ремонтных растворов с традиционными строительными материалами является приоритетным при реставрации памятников архитектуры. Известно, что как старые, так и новые материалы должны иметь одинаковые характеристики [1]. Культовые сооружения Древнего мира возводились в основном с применением

известкового раствора, что характеризует известь как α -связующее. Большинство строительных растворов памятников архитектуры средневековой Руси (кремлей и крепостей) также является известково-песчаным [2]. Гипсовое вяжущее в классификации воздушных вяжущих можно характеризовать как β -связующее, связующее многоцелевого применения. На Руси использова-

ние гипсового вяжущего подтверждено при возведении Свято-Троицкого монастыря в Муроме. В XVIII–XIX вв. гипс использовался в казенном и дворцовом строительстве в Санкт-Петербурге [3].

Повышение эксплуатационных свойств известковых и гипсоизвестковых покрытий может быть обеспечено путем введения в их рецептуру активных добавок. В качестве добавок, модифицирующих и дополняющих основное вяжущее, используют натуральные и искусственные пуццоланы. Эффективность применения в качестве заполнителя природных карбонатных пород доказана при проектировании составов сухих строительных смесей. Рецептуру смеси для реставрации с заполнителем из доломита и известняка предложили и экономически обосновали ученые Санкт-Петербурга [4]. Согласно исследованиям А. В. Ферронской [5], особенность твердения смешанного воздушного вяжущего с пуццолановой добавкой обусловлена тем, что совместное использование компонентов вяжущего влияет на повышение скорости и степени гидратации добавки. Образующийся при твердении камень включает в себя гидросиликаты кальция, состав которых близок к составу продуктов гидратации портландцемента.

Спектр положительных характеристик метакаолина это: повышение прочности бетонов, обеспечение твердения вяжущего при отрицательных температурах, улучшенное сопротивление бетонов проникновению хлоридов, повышение стойкости бетонов в агрессивных средах, повышение прочности и износостойкости, уменьшение степени эфлоресценции и

повышение бактерицидных и инсектицидных свойств [6]. Нами предложены: модифицированное метакаолином (в дальнейшем ВМК) гипсо-известковое вяжущее повышенной прочности и водостойкости [7] и составы известковых строительных растворов с активными минеральными добавками [8]. Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что применение в рецептуре отделочных составов модифицированного вяжущего способствует повышению прочности и водостойкости отделочных покрытий, а также снижению усадки.

В продолжение дальнейших исследований поставлена цель определить физико-механические свойства известкового и гипсового вяжущих, модифицированных ВМК, а также установить возможность приготовления строительных растворов с заданными характеристиками, регулируемые активной добавкой и соотношением «вяжущее — заполнитель».

Материалы

В работе применяли: известь строительную гидратную ГОСТ 9179—77 (Угловский известковый комбинат); гипс марки Г-6Б ООО «Майкопгипсстрой»; кварцевый песок (пос. Лахта, г. Санкт-Петербург) с соотношением фракций 0,63 — 0,315 мм и 0,315 — 0,16 мм соответственно 80 % : 20 %; минеральные добавки: доломитовую муку ОАО «Гипсовик» (Украина), ВМК «Metacem-85» (Индия); суперпластификатор С-3 ООО «Суперпласт» по ТУ 5745-004-43184789-05. Физико-химические характеристики минеральных добавок представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Физико-химические характеристики минеральных добавок

Минеральная добавка	Средний размер частиц, мкм	Удельная поверхность, см ² /г	Пуццолановая активность (мг Ca(OH) ₂ /г)	Содержание оксидов, мас. %				
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	H ₂ O
ВМК	1,5	12 000	1050	56,8	38,4	0,1	0,2	—
Доломитовая мука	15,4	3300	—	1,5	0,91	31,9	16,6	5,8

Влияние ВМК на физико-механические и физико-химические свойства известкового и гипсового вяжущих рассматривалось в Национальном институте прикладных наук (г. Лион, Франция) в конце прошлого столетия [9, 10]. Изменения деформации воздушной усадки камня из известково-доломитового раствора с добавками (метакаолин и микрокремнезем) и без них исследовались в работе [8].

Для придания раствору эластичности, повышения его прочности и износостойкости в известковый раствор добавляют доломитовую муку. Многие российские производители применяют в качестве наполнителя молотый кварцевый песок. Однако ведущие иностранные производители предпочитают фракционированный доломит, кубовидная форма которого способствует повышению адгезии [8].

Авторами [4] доказано, что камень из состава известкового раствора, где в качестве заполнителя выступают молотый известняк и доломит, подходит для реставрационных работ в соответствии с европейскими стандартами и совместим со строительными материалами архитектурного наследия.

Молекулы активного вещества суперпластификаторов первого поколения, к которым относится С-3, снижают прочность межфазовых контактов, однако это компенсируется увеличением абсолютной удельной поверхности новообразований гипсового камня [11]. Таким образом, при введении С-3 в гипсовое вяжущее отмечен диспергирующий эффект.

Методы

Определяли нормальную плотность теста на вискозиметре Сутгарда. Поддерживали водотвердое отношение модифицированного вяжущего постоянным: 0,56 — для гипсового вяжущего; 0,80 — для известкового вяжущего. Вводили в тесто суперпластификатор С-3 в процессе пред-

варительной подготовки вяжущего (рост процентного содержания С-3 в смесях обусловлен высокой удельной поверхностью добавки).

Выдерживали в сушильном шкафу (температура 65 °С) часть образцов (модифицированное гипсовое вяжущее) до достижения постоянной массы. Вторую часть образцов насыщали в воде при температуре 20 °С.

Выдерживали в сушильном шкафу (температура 105 °С) часть образцов (модифицированное известковое вяжущее) в течение суток. Вторую часть образцов насыщали в воде при температуре 20 °С.

Производили испытания на прочность на образцах-балочках размером 40 × 40 × 160 мм в возрасте 28 суток. Устанавливали по экспериментальным данным коэффициент размягчения (показатель водостойкости образцов), исчисляемый как отношение прочности на сжатие образцов, насыщенных водой, к прочности на сжатие сухих образцов.

Определяли прочность образцов составов 1/3 и 1/1 из смесей нормальной водопотребности. В качестве контрольного образца выбран образец из смеси без ВМК (И0). Определяли водотвердое отношение смеси по расплыву конуса на встряхивающем столике. Величина расплыва составляла 107–115 мм. Образцы-балочки уплотнялись на вибрационном столе в течение 3 минут и хранились в камере нормально-влажного твердения 28 суток.

Результаты и обсуждение

Этапы планирования эксперимента представлены на рис. 1.

На первом этапе были предложены по пять типов известковых и гипсовых смесей с ВМК, мас. %: 0, 10, 20, 30 и 40 соответственно.

При замещении извести ВМК в количестве 10, 20, 30 и 40 мас. % прочность образцов на сжатие повышается на 8, 11, 12 и 14 % по сравнению с

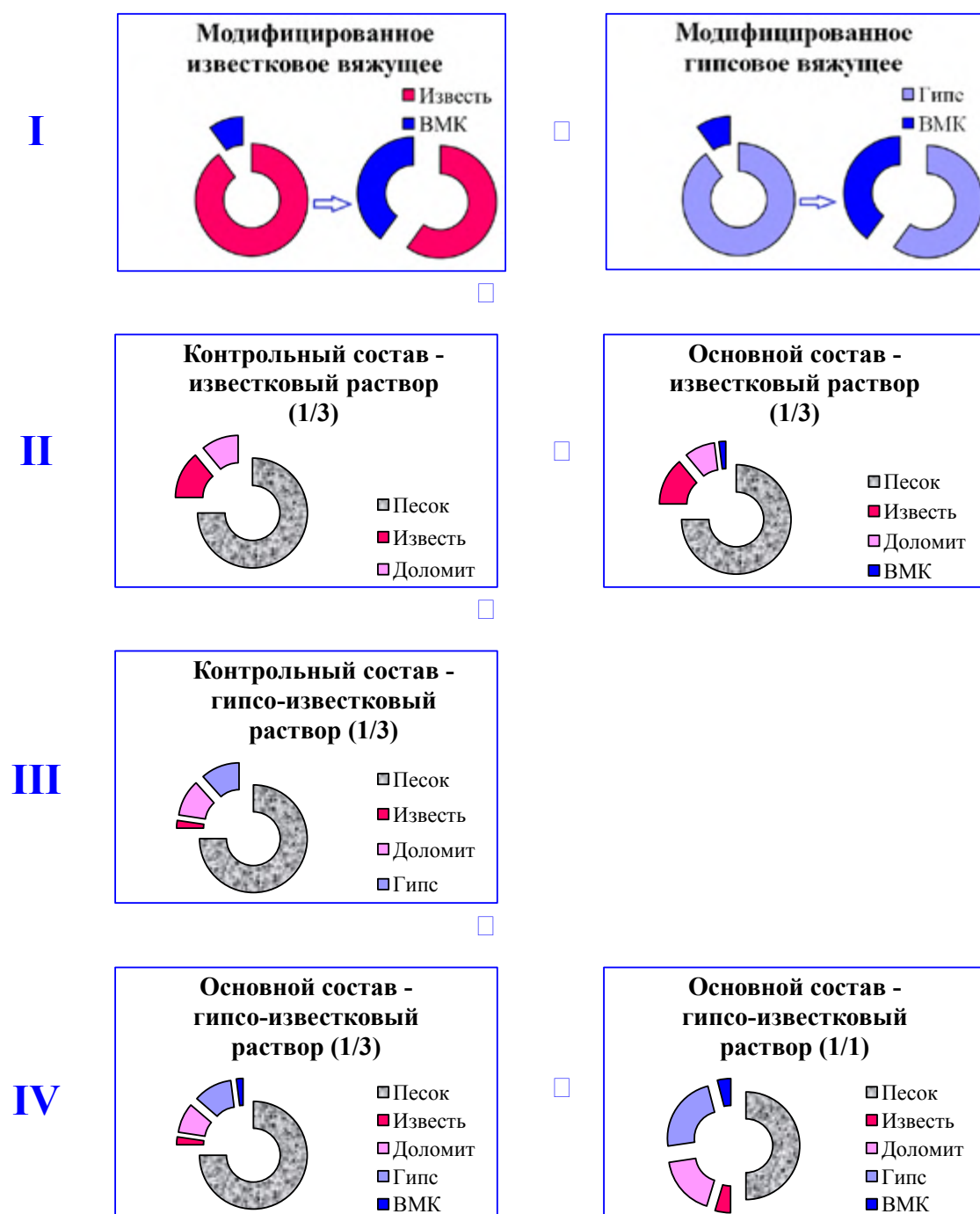


Рис. 1. Этапы планирования эксперимента

контрольным образцом (без ВМК и С-3) соответственно (рис. 2). Прочность на изгиб в тех же смесях уменьшается. Замещение извести ВМК повышает водопотребность смеси. Увеличение дозировки С-3, пропорциональное увеличению

доли ВМК в смеси, позволяет поддерживать водотвердое отношение постоянным. Возрастание доли ВМК в смеси влечет за собой повышение водостойкости камня (рис. 2). Характеризуем известковое вяжущее, модифицированное ВМК [5]:

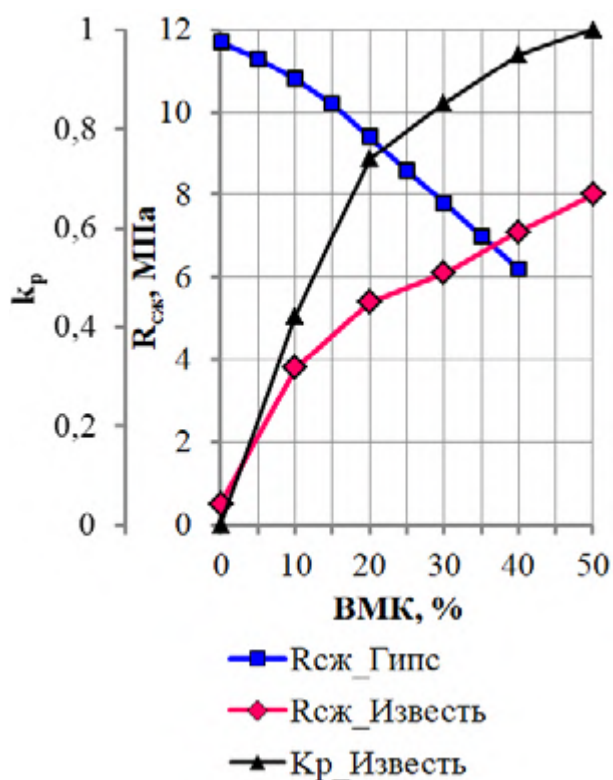


Рис. 2. Зависимости прочности на сжатие камня: а — из гипсового вяжущего от процента замещения гипса ВМК; б — из известкового вяжущего от процента замещения извести ВМК; в — коэффициента размягчения камня из известкового вяжущего от % замещения извести ВМК

при содержании ВМК в смеси менее 20 мас.% — неводостойкое вяжущее;

при содержании ВМК в смеси от 20 до 30 мас.% — вяжущее средней водостойкости;

при содержании ВМК в смеси свыше 30 мас.% — вяжущее повышенной водостойкости.

При замещении гипса ВМК в количестве 10, 20, 30 и 40 мас.% прочность образцов на сжатие понижается на 8, 20, 33 и 47 % по сравнению с контрольным образцом (без метаксаолина и С-3) соответственно (см. рис. 2). Прочность на изгиб в тех же смесях уменьшается на 9, 23, 37 и 51 % по сравнению с контрольным образцом соответственно. Замещение гипса метаксаолином зна-

чительно повышает водопотребность смеси и сокращает сроки схватывания.

На втором этапе определяли прочностные свойства и усадочные деформации камня из известкового строительного раствора на основе вяжущего с ВМК и без него [8].

Для гипсового камня усадка почти незаметна из-за небольшого расширения в раннем возрасте, которое постепенно уменьшается при сушке [5]. На втором этапе нашего эксперимента гипс не присутствует.

Существует прямая зависимость между усадкой, содержанием извести и количеством воды для затворения вяжущего. Испарение этой воды во время сушки создает пустые места в микро-структуре камня, которые напрямую связаны с величиной усадки. Увеличение объема, связанное с образованием кристаллов карбоната кальция из портландита, способствует частичному заживлению этих разрывов, образовавшихся в микро-структуре [12].

Для растворов с воздушной известью и ВМК [13] при сравнении показателя «вяжущее — заполнитель» наибольшая механическая стойкость присуща образцу, полученному при соотношении И : ВМК : П = 1 : 0,5 : 2,5. Увеличение доли заполнителя в растворе приводит к снижению прочностных характеристик. Однако было обнаружено, что эта пропорция дает раствор, весьма подверженный растрескиванию при усадке [14].

Соотношение компонентов опытных составов настоящего эксперимента представлено в табл. 2. Состав ИО, представляющий известково-доломитовую смесь без ВМК, приготовлен на витрувианской пропорции 1/3 (объем пустот просеянного песка составляет около 1/3).

При приготовлении составов И0 и И1 доля извести в известково-доломитовой смеси вяжущего оставалась постоянной. Но соотношение «вяжущее — наполнитель» изменялось. Так,

ТАБЛИЦА 2. Соотношение компонентов опытных составов

Состав	Вяжущее, кг/м ³			Наполнитель (доломитовая мука), кг/м ³	Мелкий заполнитель (песок), кг/м ³
	Известь	Гипс	Метакаолин		
И0	Известковый раствор (состав 1/3)				
	210	—	—	165	1125
И1	Известковый раствор с метакаолином (состав 1/3)				
	210	—	30	135	1125
ГИ0	Гипсоизвестковый раствор (состав 1/3)				
	35	175	—	135	1125
ГИ1	Гипсоизвестковый раствор с метакаолином (состав 1/3)				
	35	175	30	135	1125
ГИ2	Гипсоизвестковый раствор с метакаолином (состав 1/1)				
	35	175	30	135	375

в наших опытах при введении в вяжущее ВМК уменьшалось количество доломитовой муки.

Результаты испытаний камня И1, модифицированного ВМК, показывают увеличение прочности на изгиб в 3,7 и прочности на сжатие в 7,4 раза по сравнению с камнем И0 [8].

На третьем этапе определяли прочностные свойства камня ГИ0 из гипсоизвесткового строительного раствора.

Соотношение компонентов опытного состава принято на основании выводов, сделанных в работе [15]. Авторами доказано, что из трех типов вяжущих смесей с соотношением «гипс — известь», равным 1 : 1; 1 : 0,4 и 1 : 0,2 по весу, смесь с меньшим количеством известкового вяжущего показывает самый высокий прирост прочности с течением времени. Высокая начальная пористость способствует циркуляции потока углекислого газа, обеспечивая оптимальные характеристики растворов с большим образованием кальцита и улучшая прочность.

Результаты испытаний камня ГИ0 нашего эксперимента показывают увеличение прочности на изгиб в 3 раза и прочности на сжатие в 5,2 раза по сравнению с камнем И0.

На четвертом этапе показана возможность приготовления строительных растворов с задан-

ными характеристиками, регулируемые ВМК и соотношением «вяжущее — заполнитель».

Учитывая, что конечные качественные характеристики камня из гипсоизвесткового строительного раствора зависят от времени твердения, соотношения «гипс — известь», вида и количества заполнителя, в исследованиях [15] рассмотрены три соотношения «вяжущее — заполнитель»: 1/1; 1/2 и 1/3 по весу. Доказано, что образцы с меньшим количеством заполнителя показывают более высокие показатели прочности.

Разработка известкового раствора для реставрации старинных сооружений [16] подтвердила, что при соотношении «гипс — известь», равном 1 : 1, и соотношении «вяжущее — заполнитель» 1/0,75 по весу прочность камня на сжатие выше в 4,8 раза по сравнению с прочностью камня, твердеющего из раствора с соотношением «вяжущее — заполнитель» 1/1,5 по весу.

Автором [9] применена смесь вяжущего с соотношением «известь — ВМК», равным 1 : 1, при приготовлении растворов с соотношениями «вяжущее — заполнитель»: 1/0,5; 1/1; 1/2 и 1/3 по весу. Результаты испытаний показывают снижение прочностных характеристик камня с увеличением количества заполнителя в растворе (рис. 3).

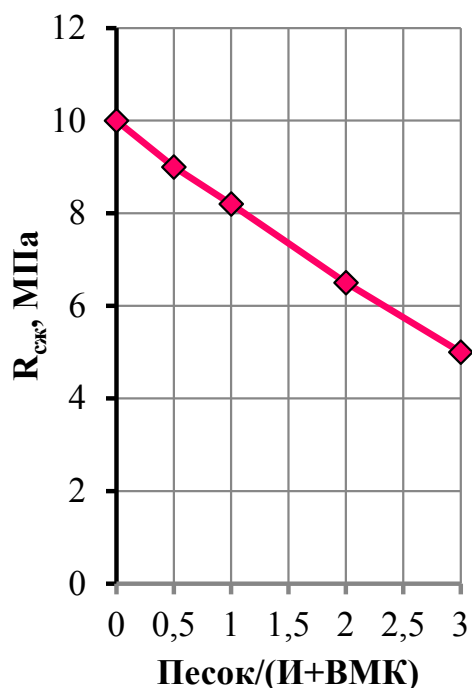


Рис. 3. Зависимость прочности на сжатие камня из известково-метакаолинового раствора [9] от соотношения «заполнитель — вяжущее» по весу

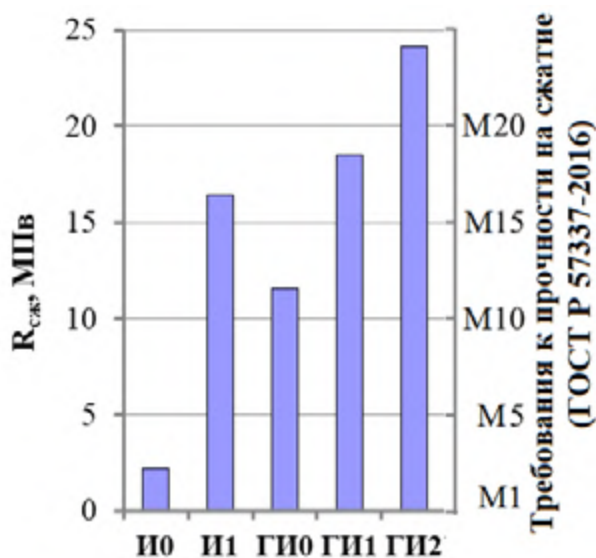


Рис. 4. Сравнение результатов прочности на сжатие со стандартными значениями (ГОСТ Р 57337—2016) для составов строительных растворов

На основании вывода, к которому пришли авторы [9, 15, 16], что прочность камня из раствора на воздушном вяжущем снижается по мере увеличения в нем доли заполнителя, были приготовлены гипсоизвестковые растворы, модифицированные ВМК, составов 1/3 и 1/1 по весу.

Результаты испытаний нашего эксперимента показывают следующее:

- для камня ГИ1 — увеличение прочности на сжатие в 1,6 раза по сравнению с камнем ГИ0;
- для камня ГИ2 — увеличение прочности на сжатие в 1,9 раза по сравнению с камнем ГИ0;
- для камня ГИ1 — незначительное снижение прочности на изгиб по сравнению с камнем ГИ0;
- для камня ГИ2 — снижение прочности на изгиб в 1,1 раза по сравнению с камнем ГИ0.

Прочность на изгиб не является важной характеристикой для отделочных растворов. Однако снижение показателя требует дальнейших исследований и объяснения.

Составы И1, ГИ1 и ГИ2, модифицированные ВМК, подходят для реставрационных работ в соответствии с ГОСТом [17] и совместимы с традиционными строительными материалами архитектурного наследия.

На рис. 4 показано сравнение результатов прочности на сжатие со стандартными значениями [17] для составов строительных растворов.

Выводы

Для камня в возрасте 28 суток:

- при замещении извести метакаолином в количестве 10, 20, 30 и 40 мас.% прочность на сжатие повышается на 8, 11, 12 и 14 % по сравнению с контрольным образцом (без метакаолина), прочность на изгиб снижается;
- при замещении гипса метакаолином в количестве 10, 20, 30 и 40 мас.% прочность на сжатие понижается на 8, 20, 33 и 47 % по сравнению с контрольным образцом (без метакаолина), прочность на изгиб снижается;

- замещение извести метаксаолином в смеси свыше 30 мас.% приводит к образованию камня повышенной водостойкости;
- упрочняющий эффект метаксаолина на известково-доломитовый раствор состава витрувианской пропорции для прочности на изгиб в 3,7 раза, для прочности на сжатие в 7,4 раза по сравнению с бездобавочным образцом;
- упрочняющий эффект метаксаолина на гипсо-известково-доломитовый раствор состава витрувианской пропорции для прочности на сжатие в 1,6 раза по сравнению с бездобавочным образцом;
- упрочняющий эффект метаксаолина на гипсо-известково-доломитовый раствор состава 1 : 1 для прочности на сжатие в 1,9 раза по сравнению с бездобавочным образцом.

Библиографический список

1. Шангина Н. Н. Особенности производства и применения сухих строительных смесей для реставрации памятников архитектуры / Н. Н. Шангина, А. М. Харитонов // Сухие строительные смеси. — 2012. — № 3. — С. 35–38.
2. Носов К. С. Строительные растворы русских крепостей XVI–XVII вв. / К. С. Носов // Российская археология. — 2009. — № 1. — С. 152–161.
3. Рахимов Р. З. Гипс в строительстве с древних веков до современности / Р. З. Рахимов // Academia. Архитектура и строительство. — 2021. — № 4.
4. Пухаренко Ю. В. Оценка применения карбонатных заполнителей в составе сухих смесей для реставрации / Ю. В. Пухаренко, Т. В. Харитонов // Вестник гражданских инженеров. — 2018. — № 4(79). — С. 121–125.
5. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение): справочник / Под общ. ред. А. В. Феррерской. — М.: АСВ, 2004. — 488 с.
6. Lea's Chemistry of cement and concrete / Ed. by P. C. Hewlett. — Oxford; Burlington (MA): Elsevier Butterworth — Heinemann. — 2005. — XXVI. — 1057 p.
7. Сафонова Т. Ю. Влияние реактивного пуццолана на свойства смешанного воздушного вяжущего / Т. Ю. Сафонова // Вестник гражданских инженеров. — 2012. — № 2(31). — С. 174–179.
8. Шангина Н. Н. Влияние минеральных добавок на усадочные деформации камня из известкового раствора / Н. Н. Шангина, Т. Ю. Сафонова // Вестник гражданских инженеров. — 2021. — № 2(85). — С. 142–149.
9. Murat M. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related materials: I. Preliminary investigation on metakaolinite / M. Murat // Cement and concrete research. — 1983. — Vol. 2(13). — Pp. 259–266.
10. Murat M. Modification of some physical properties of gypsum plaster by addition of clay minerals / M. Murat, A. Attari // Cement and concrete research. — 1991. — Vol. 2/3(21). — Pp. 378–387.
11. Шленкина С. С. Влияние пластификаторов на твердение гипсового вяжущего / С. С. Шленкина, М. С. Гаркави, Р. Новак и др. // Строительные материалы. — 2007. — № 9. — С. 61–62.
12. Freire M. T. Restoration of ancient gypsum-based plasters: Design of compatible materials / M. T. Freire, M. R. Veiga, A. S. Silva et al. // Cement and Concrete Composites. — 2021. — Vol. 120.
13. Veiga M. R. Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings / M. R. Veiga, A. Fragata, A. L. Velosa et al. // International Journal of Architectural Heritage. — 2010. — Vol. 4(2). — Pp. 177–195.
14. Veiga M. R. Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation / M. R. Veiga, A. L. Velosa, A. C. Magalhaes // Construction and Building Materials. — 2009. — Vol. 23. — Pp. 318–327.
15. Romera J. I. Assessment of the physico-mechanical behavior of gypsum-lime repair mortars as a function of curing time / J. I. Romera, S. Martinez-Ramirez, P. Lapuente et al. // Environmental Earth Sciences. — 2013. — Vol. 70. — Pp. 1605–1618.

16. Абдулмаджид М. Инновационные композитные материалы для укрепления известковых растворов в традиционных каменных конструкциях / М. Абдулмаджид, М. Кассаб, Х. Шукри и др. // Строительные материалы. — 2019. — № 8. — С. 42–47.

17. ГОСТ Р 57337—2016. Растворы строительные кладочные. ТУ.

Дата поступления: 20.09.2022

Решение о публикации: 21.11.2022

Контактная информация:

САФОНОВА Татьяна Юрьевна — ст. преподаватель;
tusafonova@list.ru

Plaster Mortar Composition Design for the Restoration of Stone and Brick Architecture Monuments

T. Yu. Safonova

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

For citation: Safonova T. Yu. Plaster Mortar Composition Design for the Restoration of Stone and Brick Architecture Monuments // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 702–711. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-702-711

Summary

Purpose: To investigate the possibility of using artificial pozzolana to create modified gypsum lime mortar, recommended for architecture monument restoration. **Methods:** At the research pursued, there were used Russia State Standard GOST 125–79 “Plaster Binders. Technical specifications”, GOST 23789–79 “Plaster Binders. Test Methods”, GOST 10180–90 “Concretes. Methods for Determining Strength by Control Samples”, GOST 24544–81 “Concretes. Methods for Determining Shrinkage and Creep Deformations”, GOST 8735–14 “Sand for Construction Works. Test Method” and GOST 8736–14 “Sand for Construction Works. Technical Conditions”. It has been established experimentally that to create reliable matrix, compatible with traditional materials of historical masonry, the use of restoration composition, including metakaolin and dolomite flour, is effective. **Results:** The process of restoration material design to replace damaged plaster of walls and ceilings is presented, strength characteristics of stones of various compositions on the basis of air binders are discussed, conclusion is made on the necessity to develop restoration material two types: for to put on lime plaster family and for — gypsum-lime plaster family. **Practical significance:** The results obtained can be used at partial or complete replacement of plaster that would allow to preserve building architectural appearance.

Keywords: Gypsum, lime, metakaolin, filler, compressive strength.

References

1. Shangina N. N., Kharitonov A. M. Osobennosti proizvodstva i primeneniya sukhikh stroitel'nykh smesey dlya restavratsii pamyatnikov arkhitektury [Features of production and application of dry building mixes for restoration of architectural monuments]. *Sukhie stroitel'nye smesi* [Dry building mixes]. 2012, I. 3, pp. 35–38. (In Russian)

2. Nosov K. S. Stroitel'nye rastvory russkikh krepostey XVI–XVII vv. [Building solutions of Russian fortresses of the XVI–XVII centuries]. *Rossiyskaya arkheologiya* [Russian Archeology]. 2009, I. 1, pp. 152–161. (In Russian)

3. Rakhimov R. Z. Gips v stroitel'stve s drevnikh vekov do sovremennosti [Gypsum in construction from ancient centuries to the present]. *Academia. Arkhitektura i*

stroitel'stvo [Academia. Architecture and construction]. 2021, I. 4. (In Russian)

4. Pukharenskiy Yu. V., Kharitonova T. V. Otsenka primeneniya karbonatnykh zapolniteley v sostave sukhikh smesey dlya restavratsii [Evaluation of the use of carbonate aggregates in dry mixes for restoration]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2018, I. 4(79), pp. 121–125. (In Russian)

5. *Gipsovye materialy i izdeliya (proizvodstvo i primeneniye): spravochnik. Pod obshch. red. A. V. Ferronskoy* [Gypsum materials and products (production and application). Ed. by A. V. Ferronskoy]. Moscow: ASV Publ., 2004. 488 p. (In Russian)

6. Lea's Chemistry of cement and concrete. Ed. by P. C. Hewlett. Oxford; Burlington (MA): Elsevier Butterworth — Heinemann. 2005, XXVI, 1057 p.

7. Safonova T. Yu. Vliyaniye reaktivnogo puttsolana na svoystva smeshannogo vozdukhnoy vyazhushchego [The influence of reactive pozzolan on the properties of a mixed air binder]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2012, I. 2(31), pp. 174–179. (In Russian)

8. Shangina N. N., Safonova T. Yu. Vliyaniye mineral'nykh dobavok na usadochnyye deformatsii kamnya iz izvestkovogo rastvora [The influence of mineral additives on shrinkage deformations of stone from lime mortar]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2021, I. 2(85), pp. 142–149. (In Russian)

9. Murat M. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related materials: I. Preliminary investigation on metakaolinite. *Cement and concrete research*. 1983, vol. 2(13), pp. 259–266.

10. Murat M., Attari A. Modification of some physical properties of gypsum plaster by addition of clay minerals. *Cement and concrete research*. 1991, vol. 2/3(21), pp. 378–387.

11. Shlenkina S. S., Garkavi M. S., Novak R. Vliyaniye plastifikatorov na tverdeniye gipsovogo vyazhushchego [The

effect of plasticizers on the hardening of gypsum binder]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 2007, I. 9, pp. 61–62. (In Russian)

12. Freire M. T., Veiga M. R., Silva A. S. Restoration of ancient gypsum-based plasters: Design of compatible materials. *Cement and Concrete Composites*. 2021, vol. 120.

13. Veiga M. R., Fragata A., Velosa A. L. Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings. *International Journal of Architectural Heritage*. 2010, vol. 4(2), pp. 177–195.

14. Veiga M. R., Velosa A. L., Magalhaes A. C. Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation. *Construction and Building Materials*. 2009, vol. 23, pp. 318–327.

15. Romera J. I., Martinez-Ramirez S., Lapuente P. Assessment of the physico-mechanical behavior of gypsum-lime repair mortars as a function of curing time. *Environmental Earth Sciences*. 2013, vol. 70, pp. 1605–1618.

16. Abdulmajid M., Kassab M., Shukri H. Innovatsionnyye kompozitnyye materialy dlya ukrepleniya izvestkovykh rastvorov v traditsionnykh kamennykh konstruktsiyakh [Innovative composite materials for strengthening lime mortars in traditional stone structures]. *Stroitel'nye materialy* [Building Materials]. 2019, I. 8, pp. 42–47. (In Russian)

17. *GOST R 57337—2016. Rastvory stroitel'nye kladochnye. TU* [GOST R 57337—2016. Masonry construction solutions. TU]. (In Russian)

Received: September 20, 2022

Accepted: November 21, 2022

Author's information:

Tatyana Yu. SAFONOVA — Senior Teacher;
tusafonova@list.ru

УДК 556.536

Построение цифровой модели русла реки Пур в верховьях для обеспечения техносферной безопасности на внутренних водных путях

Н. А. Саноцкая^{1,2}, И. А. Беликов¹

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Российская Федерация, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79

² Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Российская Федерация, 199397, Санкт-Петербург, Беринга ул., 38

Для цитирования: Саноцкая Н. А., Беликов И. А. Построение цифровой модели русла реки Пур в верховьях для обеспечения техносферной безопасности на внутренних водных путях // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 712–726. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-712-726

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопросы построения и использования цифровых моделей русел рек для обеспечения техносферной безопасности на внутренних водных путях на примере реки Пур. **Методы:** Сбор, обработка данных наблюдений за водными объектами и перевод их в электронный формат с дальнейшим анализом. **Результаты:** Для обеспечения техносферной безопасности представлена цифровая модель русла реки Пур в верховьях и обновлены метеорологические и гидрологические характеристики в исследуемом районе. Показана разность температур воздуха по действующим нормативным документам (СП 131.13330.2020 «Строительная климатология») и средним показателям за 30 лет (базовый климатический период с 1991 по 2020 г.). **Практическая значимость:** Показана необходимость уточнения метеорологических и гидрологических характеристик в условиях изменяющегося климата. Для поддержания габаритных параметров русел рек рекомендовано создание цифровых моделей. Результаты работы могут быть рекомендованы к практическому использованию. Главным выводом работы является то, что использование цифровых моделей в сфере судоходства может существенно облегчать выполнение задач. Главным преимуществом использования моделей является визуализация — с помощью модели можно легко и быстро определить проблемные участки. Получение информации с модели, например поперечного профиля, также осуществляется за пару минут. При изменении рельефа, например после проведения дноуглубительных работ, все изменения внести в модель не составит труда.

Ключевые слова: Техносферная безопасность, внутренние водные пути, цифровая модель русла реки, водный режим, река Пур.

Введение

Для обеспечения техносферной безопасности на внутренних водных путях необходимо знание водного и ледового режимов водотоков, а также о стоке наносов и русловых процессах для поддержания судоходных глубин. В связи с этим большую помощь может оказать создание цифровой модели русла реки, поскольку позволит оперативно отслеживать обстановку на водных путях и вносить корректировку при производстве дноуглубительных работ.

Внутренние водные пути имеют особое значение для Арктической зоны Российской Федерации, где обеспечение людей необходимыми товарами происходит в основном по воде.

Например, ближайшая железнодорожная станция к г. Тарко-Сале — Пурувск — расположена в 18 км от города. С Большой землей город связан аэропортом, пристанью на реке Пяку-Пур, автодорогой с твердым покрытием до города Губкинский. Дороги регионального и федерального значения по территории города не проходят [1]. Река Пур относится к водным путям Обь-Иртышского бассейна.

Водные пути Обь-Иртышского бассейна простираются от границы с Республикой Казахстан на юге до практически Карского моря на севере, по условиям плавания на них установлены все разряды внутренних водных путей. Водные пути бассейна не имеют водоподпорных и судоходных гидротехнических сооружений и находятся в естественном состоянии. Всего 8729 км водных путей бассейна [2].

Для обеспечения техносферной безопасности на внутренних водных путях проводятся путевые работы, в том числе углубление судового хода и оснащение его судоходной обстановкой. Для производства дноуглубления и выправления русел рек в современных условиях удобно проектировать указанные работы на компьютерной модели. В связи с этим в статье рассматривается методика

получения графической модели участка в верховьях реки Пур с дальнейшим анализом полученной модели.

Описание реки

Река Пур образуется от слияния рек Пякупур и Айваседапур и впадает в Тазовскую губу Карского моря. Длина реки Пур — 394 км; вместе с рекой Пякупур и ее притоком рекой Янгьягун — 1024 км, площадь водосбора — 112 000 км² (рис. 1). Общее падение реки Пур составляет 21 м, уклон реки небольшой и равен 0,054 ‰ [3].

Бассейн реки Пур характеризуется плоским рельефом местности, многочисленными озерами и сильной заболоченностью. Пойма реки преимущественно двусторонняя, изобилует старицами и озерами. Долина реки имеет ширину 5–10 км в верхнем течении, 10–12 км в среднем и 20–25 км в нижнем течении. Русло реки подвержено значительным переформированиям, особенно во время половодья. Здесь имеется много островов, осередков, побочней и кос. Ширина русла — 400–700 м [3].

Растительность в бассейне реки Пур неоднородна. На протяжении почти 160 км река протекает за Северным полярным кругом, поэтому в нижней части бассейна от устья Пура до поселка Самбург растительность представляет собой типичную кочкарную тундру, характеризующуюся безлесьем, где только по берегам встречается мелкий кустарник. Выше поселка Самбург начинается лесотундра: с мелким редколесьем по берегам. По мере продвижения вверх по реке лесистость местности возрастает.

Река Пур имеет большое транспортное значение, так как местные перевозки почти на всей территории бассейна могут осуществляться только водным транспортом. В связи с разработкой нефтегазовых месторождений в бассейне реки грузооборот значительно увеличился и транспортное значение Пура еще более возросло.

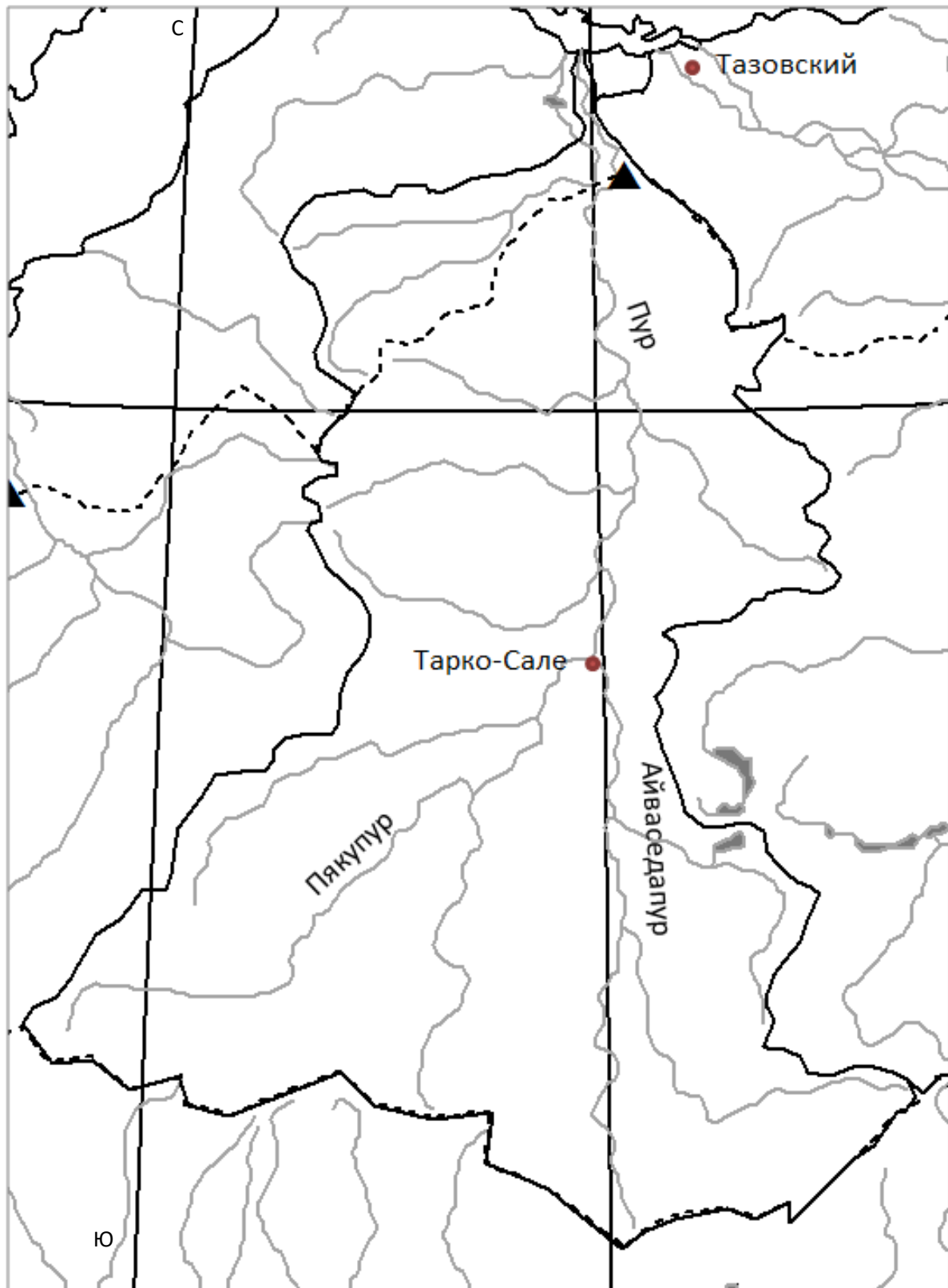


Рис. 1. Схема водосбора реки Пур

Условия судоходства

В настоящее время р. Пур от устья до Тарко-Сале является судоходной рекой. По навигационным условиям р. Пур можно разделить на два участка: верхний — от пос. Тарко-Сале до Уренгой и нижний — от Уренгой до устья. Верхний участок имеет большое количество перекатов и менее удобен для судоходства, чем нижний. При снижении уровня до меженного в средний по водности год на верхнем участке реки насчитывается 14 перекатов с глубинами ниже гарантированных. Характерной особенностью реки на этом участке является незначительная протяженность отдельных перекатов, достигающая 150–200 м при длине плесов 5–7 км. Наиболее затруднительным на верхнем участке является перекат, расположенный на 33 км ниже Тарко-Сале [3].

Нижний участок р. Пур является более благоприятным для судоходства. Глубины здесь сравнительно одинаковы и удерживаются на уровне гарантированных. Наиболее трудный перекат в многоводные годы находится на 185–187 километре вниз по течению от Тарко-Сале. В маловодные и средние по водности годы с глубинами меньше гарантированных насчитывается до пяти-шести перекатов.

На нижнем участке Пякупура и на Пуре русло рек извилистое, судовой ход во многих местах

узкий, ведет среди отмелей. На отдельных участках характер подводного рельефа сильно изменяется даже в течение одной навигации, что затрудняет судоходство. Гарантированные габариты судового хода на таких участках реки поддерживаются систематическими дноуглубительными работами.

Габариты судовых ходов рассчитываются и регулярно обновляются Федеральным агентством морского и речного транспорта Российской Федерации.

Для реки Пур габаритные характеристики приведены в табл. 1 [4].

Река Пур по интенсивности судоходства относится к водным путям III группы.

В протоке Пыринтояха (125 км) на левом берегу расположено место выгрузки. Здесь на подбазе производится складирование и накопление грузов для последующей отправки их вверх по Пуру на судах с малой осадкой.

Гидрометеорологическая изученность

На водосборе реки Пур, на главной реке и ее притоках располагается 6 действующих гидрологических постов (табл. 2). Три из них расположены непосредственно на самой реке Пур: пгт. Уренгой, с. Самбург, г. Тарко-Сале. Остальные три расположены на притоках реки: р. Еркал-

ТАБЛИЦА 1. Габаритные характеристики судового хода на реке Пур

Наименование водного пути	Протяженность, км	Гарант. глубина, м	Гарант. ширина, м	Гарант. радиус, м	Продолжит. навигации, дней
Река Пур	256	1.2	30	200	122

ТАБЛИЦА 2. Гидрологические посты на р. Пур и ее притоках

№ по рис. 2	Река	Пост	Расст. от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Дата открытия поста
1	Пур	г. Самбург	86	95 100	07.10.1936
2	Седэ-Яха	г. Новый Уренгой	4,10	1300	11.04.1985
3	Пур	пгт. Уренгой	245	80 400	07.09.1948
4	Пур	г. Тарко-Сале	3,4	31 400	01.08.1938
5	Хале-Савой	с. Халясавэй	1,5	822	20.08.1985
6	Еркал-Надей-Пур	с. Халясавэй	108	6600	27.08.1958

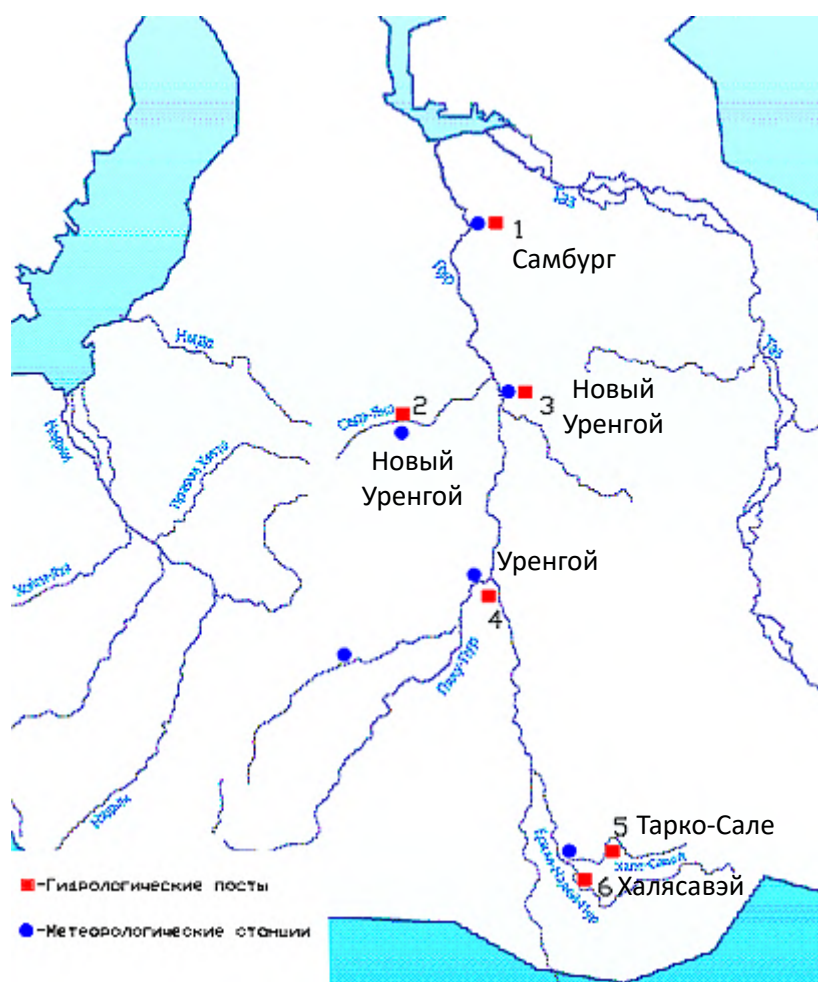


Рис. 2. Схема гидрометеорологической изученности

Надей-Пур — с. Халясавэй и р. Седэ-Яха — г. Новый Уренгой расположены на притоках первого порядка; р. Хале-Савой — с. Халясавэй на притоке второго порядка.

Также на территории водосбора реки расположено 6 метеорологических станций. Схема расположения гидропостов и метеостанций представлена на рис. 2.

Климатическая характеристика

Для климата бассейна реки Пур характерны продолжительная и суровая зима, короткое прохладное и влажное лето. Среднегодовая температура воздуха минус 4,6 °С (за период 1991–2020) в районе поселка Тарко-Сале и минус 7,3 °С на ниж-

нем участке Пура (МС Тазовск, 1991–2020) [5]. Абсолютный минимум температуры воздуха зарегистрирован минус 50 °С. Летом наблюдается много солнечных дней. Температура воздуха в это время может повышаться до 30–32 °С, а при северных ветрах понижаться до 0 °С. Заморозки на почве бывают в любое время теплого периода года. Продолжительность безморозного периода в среднем составляет 80–100 дней, а в отдельные годы 50–60 дней.

Среднемесячные и среднегодовые значения температуры воздуха по МС Тарко-Сале по СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» (1966–2018) [6] и за базовый климатический период с 1991 по 2020 г. представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Среднемесячные и среднегодовые значения температуры воздуха по МС Тарко-Сале, °С

Период	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
1966–2018	–25,2	–23,6	–14,9	–7,8	0,0	11,3	16,4	12,4	5,8	–4,3	–16,1	–21,7	–5,6
1991–2020	–23,7	–21,6	–13,0	–6,4	1,5	12,6	16,7	12,8	6,1	–3,2	–16,1	–21,4	–4,6
Разница	1,5	2,0	1,9	1,4	1,5	1,3	0,3	0,4	0,3	1,1	0,0	0,3	1,0

Разница в значениях среднемесячных температур за разные периоды осреднения (43 и 30 лет) составляет от 0,0 °С (ноябрь) до +2,0 °С (февраль). Разница среднегодовых значений достигает 1,0 °С.

При этом средние температуры второго промежутка (1991–2020) выше, чем температуры первого (1966–2018).

Из этого следует важность не только исследований в данной области, но и проведения регулярного реанализа данных.

Летом и осенью в бассейне реки Пур чаще наблюдаются ветры северного и северо-западного направлений, зимой — юго-западного и южного. Среднегодовая скорость ветра — 6,6–7,5 м/с. Штормовые ветры со скоростью 22–25 м/с бывают почти ежегодно, чаще дуют с севера и наблюдаются обычно в конце августа, в сентябре. Ураганные ветры со скоростью 30–35 м/с отмечаются редко — один раз в 20 лет. Роза ветров представлена на рис. 3.

Количество осадков за год в среднем изменяется от 530 мм (МС Тарко-Сале, 1966–2020) на юге бассейна до 477 мм (МС Тазовск, 1966–2020) — на севере. Дожди ливневого характера наблюдаются относительно редко, чаще идут затяжные дожди. Снежный покров в среднем появляется 5 октября. Устойчивый снежный покров образуется 10–12 октября, а сходит, как правило, в конце мая.

В течение навигационного периода отмечается от 10 до 30 дней с туманами. Количество дней с туманами в северной части бассейна Пура больше, чем в южной. Туманы образуются обычно в ночные часы и рассеиваются с восходом солнца; днем и вечером они бывают редко.

Данный раздел подтверждает актуальность разработки цифровой модели рельефа реки Пур, которая позволяет вносить корректировку и учитывать воздействие климатических изменений на сток реки.

Водный режим

Питание реки Пур главным образом снеговое и дождевое. По водному режиму река относится к западносибирскому типу — с сильно растянутым весенним половодьем, повышенными уровнями и расходами воды в летне-осенний период и сравнительно малым стоком в зимний период года.

Наиболее высокие уровни воды наступают в конце мая — начале июня в верховьях реки (рис. 4) и в конце первой декады июня — в ее нижнем течении. В период половодья величина подъема уровня воды над проектным возрастает сверху вниз по течению от 2,5 до 4,7 м. Спад уровня воды растягивается до конца августа — начала сентября, когда и устанавливаются низкие уровни.

В южной части Тазовской губы и на нижнем участке Пура наблюдаются сгонно-нагонные явления. Нагоны возникают в основном в летне-осенний период при ветрах северных направлений. Подъем уровня воды под действием нагонных ветров распространяется вверх от устья до поселка Самбург и достигает 1,2 м в устье и 0,6 м в районе Самбурга.

Небольшое падение реки обуславливает незначительную скорость течения. В межень скорость течения составляет 1,1–1,8 км/ч на плесах и 2,2–2,9 км/ч на перекатах. В период весеннего половодья скорость течения на реке возрастает до 4,7 км/ч [3].

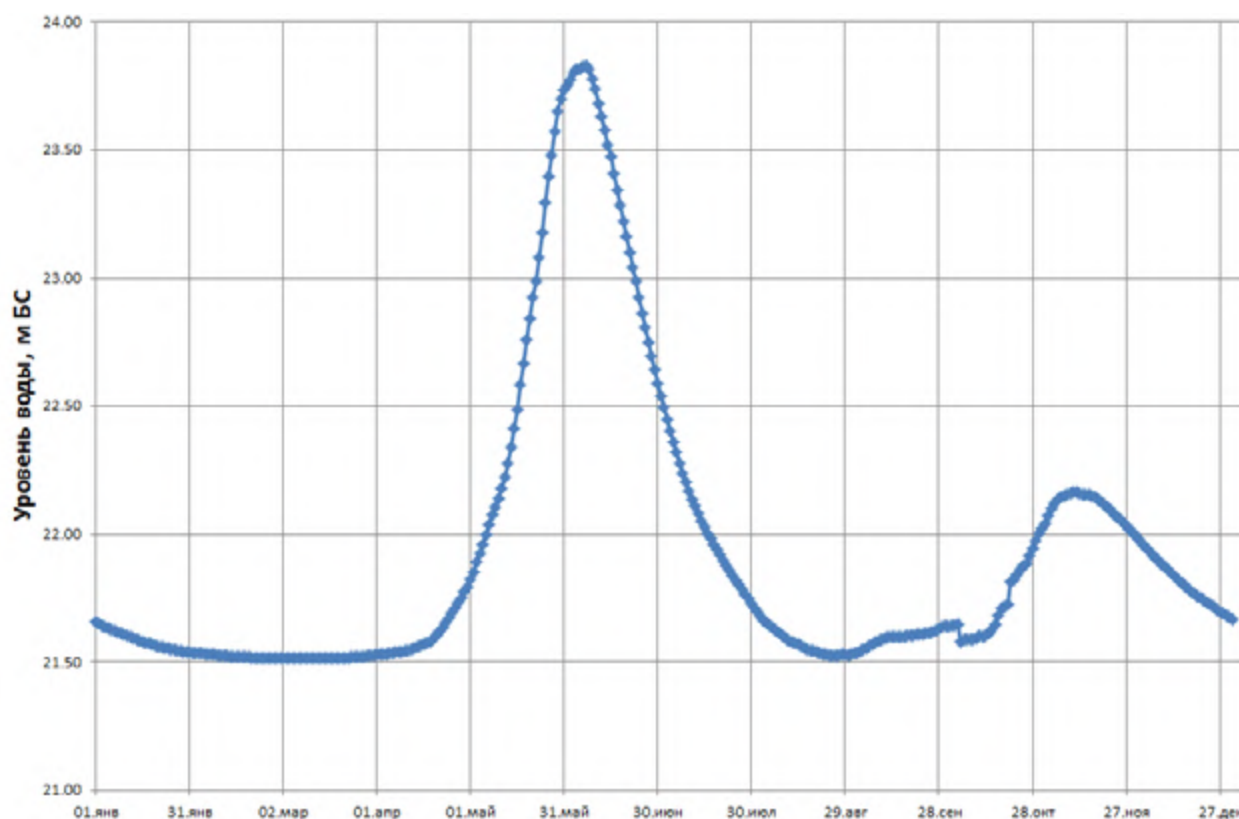


Рис. 4. Типовой гидрограф р. Пякупур — г. Тарко-Сале
(по осредненным среднесуточным уровням за период 1939–2019)

Прилегающая к гидрографическому посту Тарко-Сале местность представлена плоской заболоченной равниной, покрытой хвойным редколесьем. Долина реки выражена неясно. Склоны — пологие, сложены песчано-глинистыми грунтами, пойма двусторонняя, шириной 9–11 км, заболоченная, изрезана старицами, озерами, поросшая кустарником и хвойным лесом. Левобережная пойма сливается с поймой р. Хыльмиг-Яха, левого притока р. Пур, и затопливается при уровнях 970 см над нулем поста. Правобережная пойма, ниже г. Тарко-Сале, сливается с поймой р. Айваседа-Пур и затопливается при уровнях 635 см над нулем поста. По данным многолетних наблюдений выход воды на левобережную пойму происходит ежегодно (табл. 5). По правому берегу, вдоль города, в теплый период года намывается дамба, что спасает населенный пункт от наводнения [1].

При наступлении максимальных уровней обеспеченностями 1, 2, 5, 10 % река сильно выходит из своих берегов, затопляя прибрежную территорию. Подъем уровней воды может скрыть опасные отмели и сам судоводительский ход, в таких случаях необходимо обеспечивать путь знаками судоходной обстановки.

Ледовый режим

Льдообразование на Пуре обычно начинается во второй декаде октября с низовья и в течение нескольких дней распространяется до истоков реки. Разрушение ледяного покрова начинается во второй половине мая. Начало весеннего ледохода обычно приходится на конец мая. Весенний ледоход, средняя продолжительность которого 3–4 дня, проходит спокойно, без заторов, в период наивысших уровней воды. Река Пякупур и верховье реки Пур очищаются ото льда в среднем к

ТАБЛИЦА 4. Характеристики ряда максимальных уровней воды, р. Пякупур — г. Тарко-Сале

Средний уровень воды, $\bar{H}$, см	959
Среднее квадратическое отклонение (СКО), см	44,5
Коэффициент вариации, C_v	0,05
Коэффициент асимметрии, C_s	–0,10
C_s/C_v	–2,23

ТАБЛИЦА 5. Расчет ординат аналитической кривой обеспеченностей Пирсона III типа для максимальных уровней воды, р. Пякупур — г. Тарко-Сале

Обеспеченность, P , %	Нормированная ордината, tp	Модульный коэффициент, kp	Уровень воды, H , см
0,01	3,545	1,16	1117
0,1	2,95	1,14	1091
1	2,255	1,10	1060
5	1,61	1,07	1031
10	1,27	1,06	1016
20	0,845	1,04	997
30	0,535	1,02	983
50	0,015	1,00	960
70	–0,51	0,98	936
80	–0,835	0,96	922
90	–1,29	0,94	902
95	–1,67	0,92	885
99	–2,4	0,89	852
99,9	–3,235	0,85	815

28 мая; нижний участок реки Пур очищается ото льда обычно к 7 июня [7, 8]. Продолжительность физической навигации на Пуре по многолетним наблюдениям составляет 115–135 суток.

Обеспеченные уровни воды р. Пякупур — г. Тарко-Сале

По уровням воды, полученным из ежегодников [9–11] по гидрологическому посту Тарко-Сале, произведен расчет обеспеченных максимальных уровней и минимальных за летне-осенний период по данным с 1939 по 2019 г.

По ряду максимальных расходов рассчитаны числовые характеристики ряда, приведенные в

ТАБЛИЦА 6. Характеристики ряда минимальных за летне-осенний период уровней воды, р. Пякупур — г. Тарко-Сале

Средний уровень воды, $\bar{H}$, см	584
Среднее квадратическое отклонение (СКО), см	28,5
Коэффициент вариации, C_v	0,05
Коэффициент асимметрии, C_s	0,12
C_s/C_v	2,39

ТАБЛИЦА 7. Расчет ординат аналитической кривой обеспеченностей Крицкого — Менкеля для минимальных за летне-осенний период уровней воды, р. Пякупур — г. Тарко-Сале

Обеспеченность, P , %	Модульный коэффициент, kp	Уровень воды, H , см
0,01	1,23	719
0,1	1,18	690
1	1,13	658
5	1,09	635
10	1,07	623
20	1,04	608
30	1,03	599
50	1,00	584
70	0,97	569
80	0,96	560
90	0,94	549
95	0,92	539
99	0,89	522
99,9	0,87	506

табл. 4. Так как $C_s = -0,10$, аналитической кривой выбрана кривая Пирсона III типа.

По среднему значению исследуемого ряда, коэффициенту вариации и коэффициенту асимметрии получены ординаты аналитической кривой Пирсона III типа. Расчет сведен в табл. 5.

По полученным результатам были построены эмпирическая и аналитическая кривые, представленные на рис. 5.

По ряду минимальных уровней за период открытого русла рассчитаны характеристики, представленные в табл. 6, и ординаты аналитической кривой обеспеченности Крицкого — Менкеля (табл. 7).

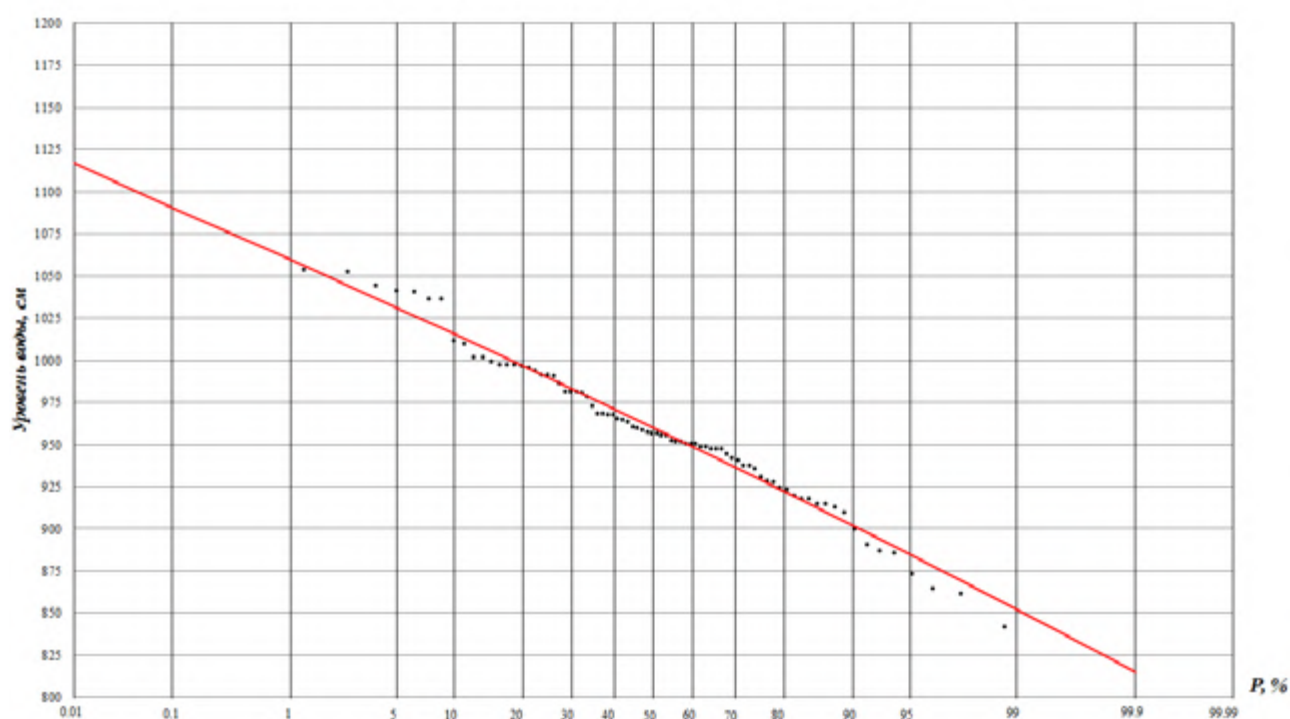


Рис. 5. Эмпирическая и аналитическая кривые обеспеченностей максимальных уровней воды, р. Пякупур — г. Тарко-Сале, 1939–2019

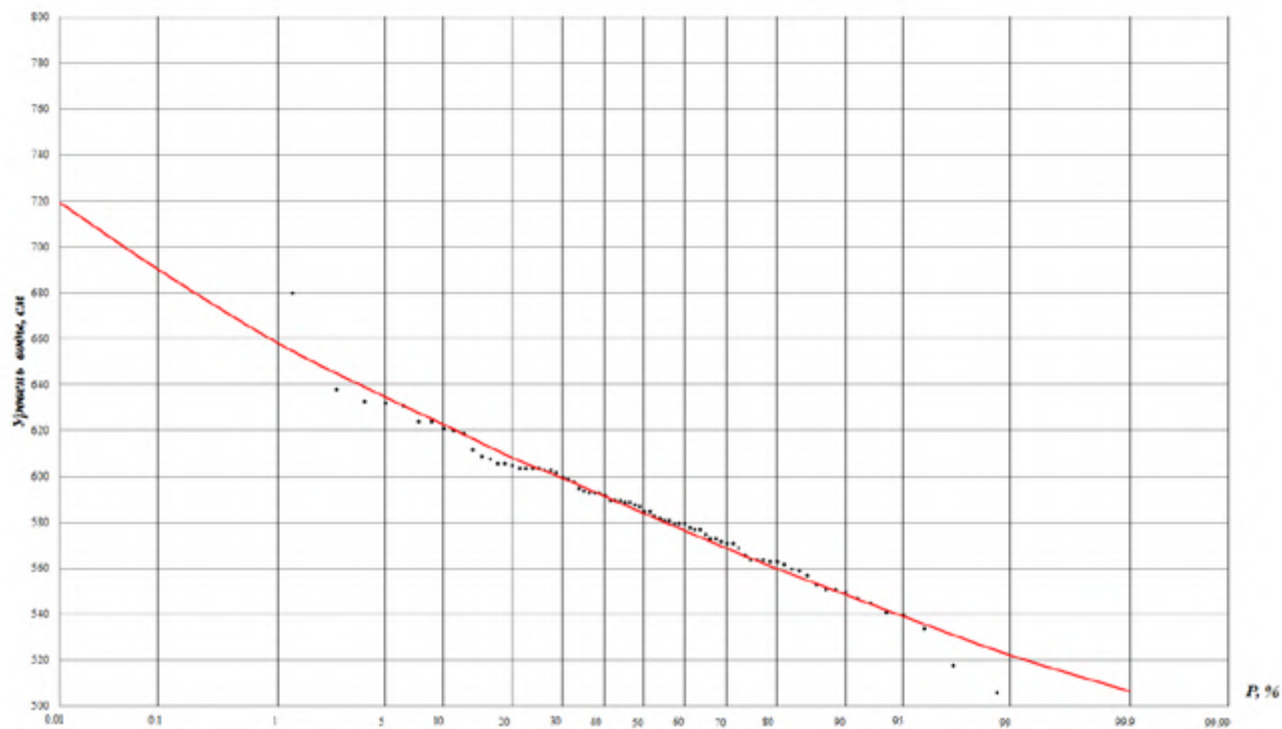


Рис. 6. Эмпирическая и аналитическая кривые обеспеченностей минимальных уровней воды летне-осенней межени, р. Пякупур — г. Тарко-Сале, 1939–2019

По табл. 7 построены аналитические кривые обеспеченности минимальных за летне-осенний период уровней воды и нанесены эмпирические значения минимальных уровней воды за период свободного русла по посту р. Пякупур — г. Тарко-Сале (рис. 6).

Построение модели судоходного участка в верховьях реки Пур

Для построения модели участка реки Пур использована программа AutoCAD Civil3D. Основной модели послужили судоходные лоции реки Пур. Точки глубин на лоциях перенесены в программу методом оцифровки (рис. 7). Необходимо внимательно настраивать масштаб листов лоций для оцифровки, чтобы модель соответствовала размерам своего реального объекта. Далее производится перенесение точек глубин в программу для дальнейшего построения. Помимо глубин производится оцифровка берегов и островов.

По оцифрованным точкам глубин и урезу воды в программе Civil3D производится постро-

ение модели участка реки. Программа строит модель в автоматическом режиме, однако требует аккуратной настройки параметров построения, а именно: задание верных границ участка построения, настройка группы точек, по которой производится интерполяция и построение, настройки горизонталей для дальнейшего их построения.

После настройки и построения модели стоит внимательно изучить результат, так как возможны ошибки в построенной модели, связанные с недостаточностью точек на участке. Проблема решается путем анализа участка и добавления новых точек глубин в модель.

Программа Civil3D позволяет наложить на модель цветовую шкалу глубин, что существенно облегчает анализ участка на предмет малых глубин или узких участков судовых ходов (рис. 8).

На полученной модели ярко выражены проблемы судоходства в верховьях реки Пур, а именно малые глубины на некоторых участках с извилистым судовым ходом.

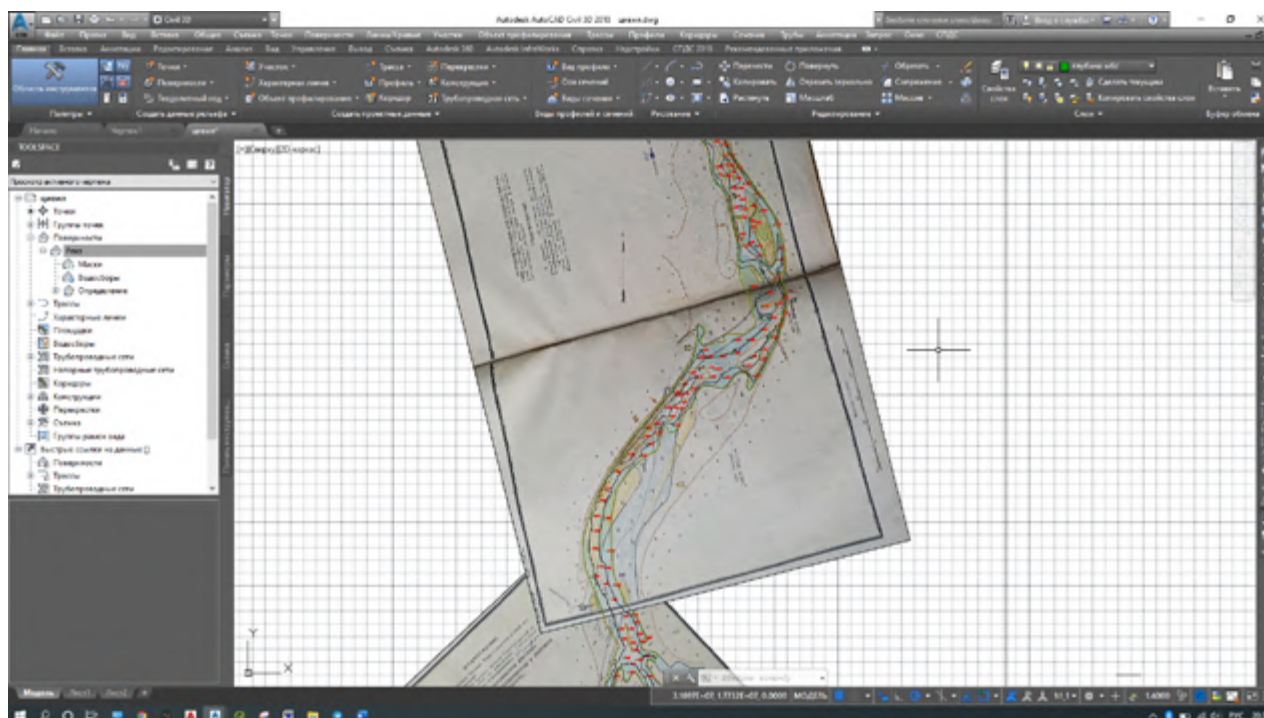


Рис. 7. Оцифровка судоходных лоций

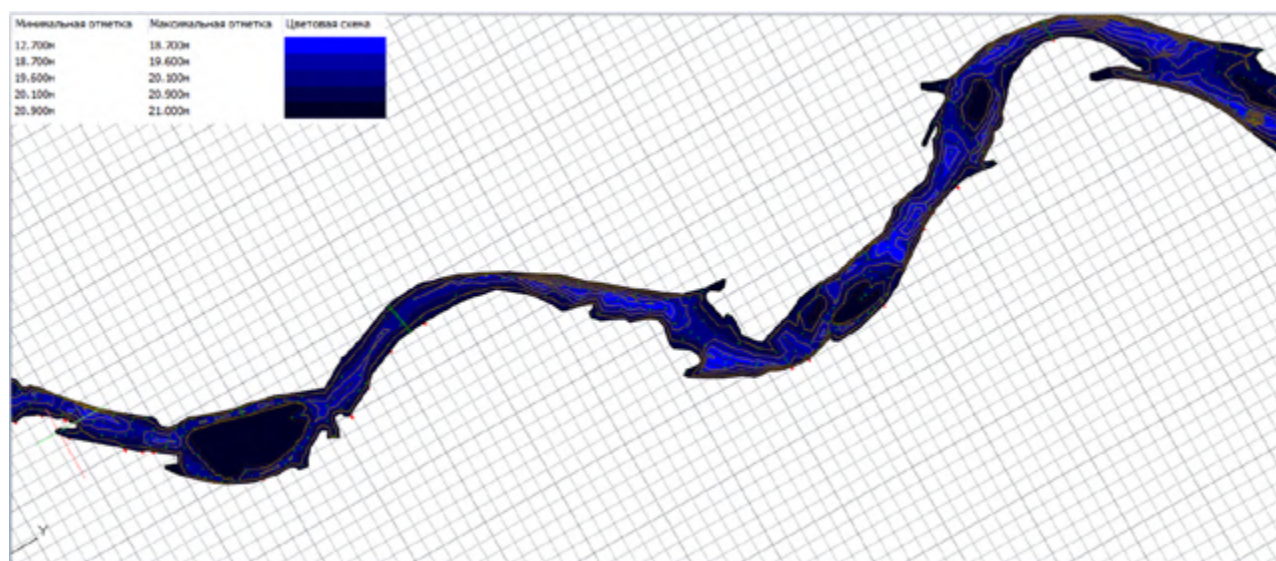


Рис. 8. Модель участка реки с наложенной цветовой шкалой глубин

На построенной модели были выявлены несколько таких участков. По данным участкам построены поперечные профили с нанесением на них рассчитанных обеспеченных минимальных уровней за летне-осенний период и гарантированной для судоходства глубины (рис. 9 и 10).

На рис. 10 видно, что минимальные уровни за летне-осенний период с обеспеченностями 95, 97 и 99 % находятся ниже гарантированной глубины. На рис. 9 уровень 95 % обеспеченности находится чуть выше гарантированной глубины, минимальные уровни воды 97 и 99 % обеспеченности находятся ниже.

При наступлении минимальных уровней, имеющих большую обеспеченность, судоходство в верховье реки Пур будет невозможно в связи с глубинами, недостаточными для судоходства на реке Пур. Следовательно, на таких участках следует проводить комплекс дноуглубительных работ, чтобы избежать прекращения судоходства.

Заключение

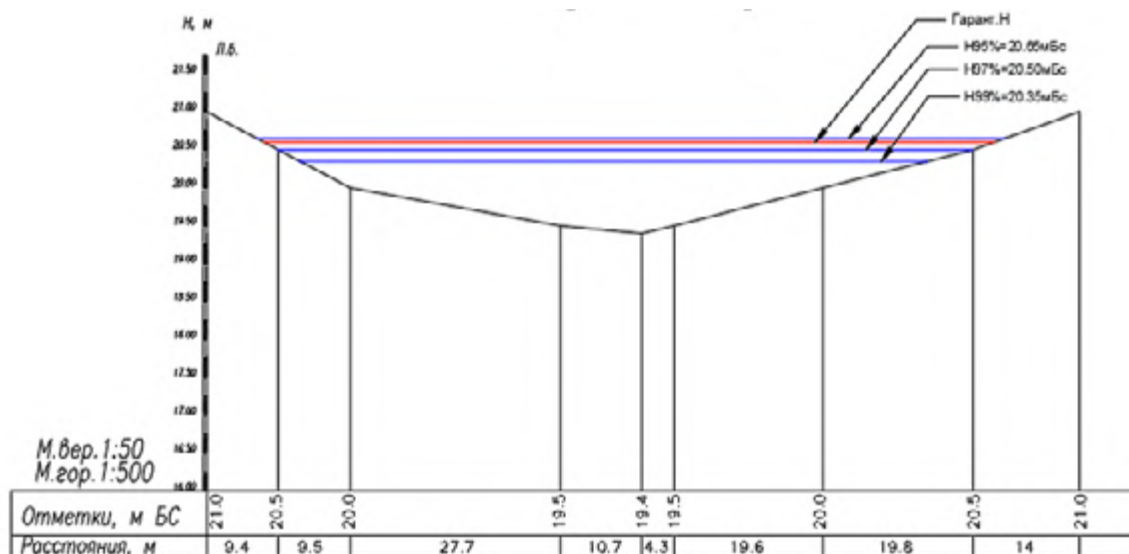
В ходе работы построена цифровая модель рельефа участка реки Пур в ее верховьях. Также рассчитаны максимальные и минимальные уровни воды различной обеспеченности. По

полученным данным выявлены участки реки, затруднительные для судоходства, и предложены мероприятия для решения проблем в зависимости от ситуации.

Главным выводом работы является то, что использование цифровых моделей в сфере судоходства может существенно облегчать выполнение задач. Главным преимуществом использования моделей является визуализация — с помощью модели можно легко и быстро определить проблемные участки. Получение информации с модели (например, поперечные профили) также осуществляется с минимальными трудовыми затратами. Кроме того, ЦМР позволяет внести корректировку при изменении рельефа, например, после проведения дноуглубительных работ.

Построенные модели можно также применять в комплексах других программ, позволяющих моделировать физические процессы. Использование моделирования для обеспечения судоходства на водных путях является актуальным в современном мире.

В заключение следует отметить, что навигационные условия в летнюю межень зависят от водности года, которая определяется рядом гидрометеорологических факторов (запасы воды

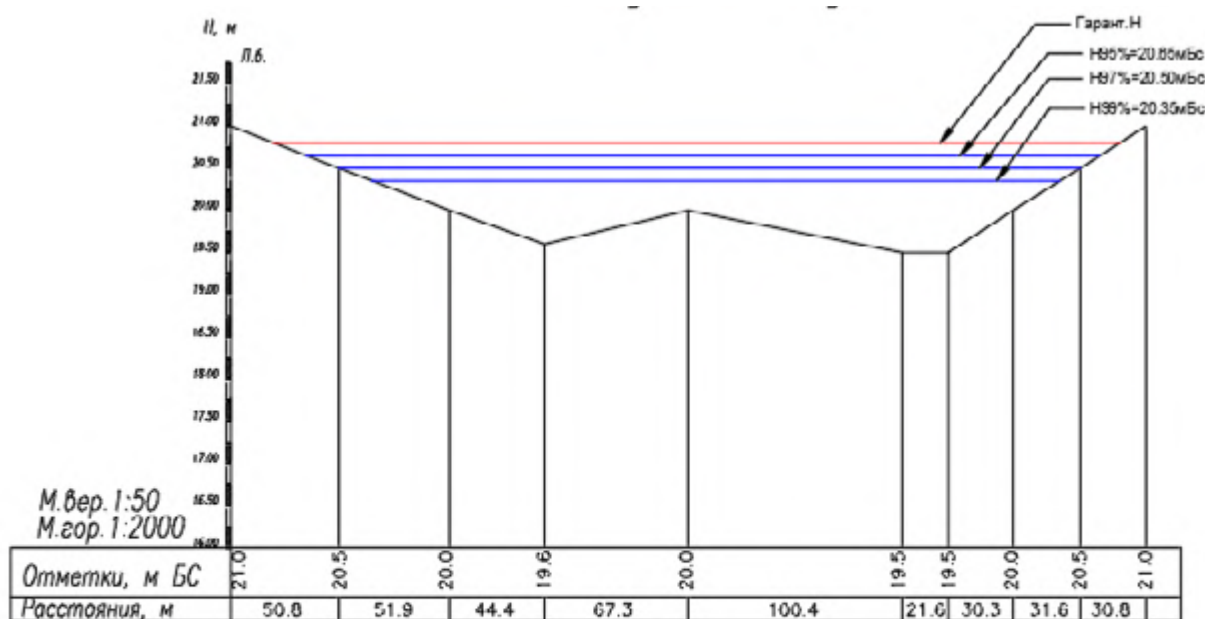


Примечание:

Система высот Балтийская

- Отметки уреза воды, м БС.
- Отметки дна, м
- Отметка гарантированной глубины, м

Рис. 9. Поперечный профиль р. Пур 398,7 км судоходного пути



Примечание:

Система высот Балтийская

- Отметки уреза воды, м БС.
- Отметки дна, м
- Отметка гарантированной глубины, м

Рис. 10. Поперечный профиль р. Пур 381,8 км судоходного пути

в снеге, количество и интенсивность дождевых осадков и т. д.). Особенно неблагоприятными для условий навигации являются в отдельные годы устойчивые понижения уровня в межень и, как следствие этого, срыв гарантированных глубин на ряде перекатов.

Для своевременного планирования распределения технических средств и проведения путевых работ на этих перекатах необходимо долгосрочное прогнозирование минимальных навигационных уровней. Кроме того, в период проведения навигации для наиболее эффективного использования гидрологических условий требуется разработка методов краткосрочных рейсовых прогнозов уровней, учитывающих дождевые паводки, а в устьевом участке — сгонно-нагонные явления.

Библиографический список

1. Генеральный план муниципального образования город Тарко-Сале Пуровского района. Материалы по обоснованию проекта. — URL: <https://www.puradm.ru/deyatelnost/gradostroitel'naya-deyatelnost/dokumenty-territorialnogo-planirovaniya/generalnyy-plan-munitsipalnogo-obrazovaniya-gorod-tarko-sale/Материалы%20по%20обоснованию%20в%20текстовой%20форме.pdf> (дата обращения: 06.07.2022).
2. Обь-Иртышский бассейн: Водные пути Западной Сибири. — URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1690/28097/> (дата обращения: 06.07.2022).
3. Соловьева З. С. Уровенный режим р. Пур / З. С. Соловьева // Труды ААНИИ. Т. 297. Проблемы гидрологии устьевых областей сибирских рек. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — С. 92–103.
4. Распоряжение Федерального агентства морского и речного транспорта от 27 декабря 2021 г. № АЛ-595-р «Об установлении категорий внутренних водных путей, определяющих для участков внутренних водных путей габариты судовых ходов и навигационно-гидрографическое обеспечение условий плавания судов, перечень судовых ходов, а также сроки работы средств навигационного оборудования и судоходных гидротехнических сооружений в навигацию 2022 года».
5. Разуваев В.Н. Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Клещенко Л.К., Кузнецова В.Н., Трофименко Л.Т., Шерстюков А.Б., Швець Н.В., Давлетшин С.Г., Зверева Г.Н. Научно-прикладной справочник «Климат России» / В. Н. Разуваев, О. Н. Булыгина, Н. Н. Коршунова. — URL: <http://aisori-m.meteo.ru/> (дата обращения: 06.07.2022).
6. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. Дата введения: 29 мая 2019 г.
7. Саноцкая Н. А. Водный и ледовый режимы реки Пур в современных условиях / Н. А. Саноцкая // Морские исследования и образование: сборник трудов X Международной научно-практической конференции. — Тверь, 2021. — С. 311–316.
8. Саноцкая Н. А. Изменения водного и ледового режима р. Пур в створе г. Уренгой / Н. А. Саноцкая, В. С. Азарян; отв. редакторы С. И. Богданов, Д. А. Субетто, А. Н. Паранина // География: развитие науки и образования: сборник статей по материалам ежегодной Международной научно-практической конференции LXXIV Герценовские чтения. — Санкт-Петербург, 2021. — С. 281–284.
9. Гидрологический ежегодник. Т. 6. Бассейн Карского моря (западная часть). Вып. 4–9. 1935–1980.
10. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. Вып. 10. Бассейны Оби (без бассейна Иртыша), Надыма, Пура, Таза. 1981–2012.
11. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). — URL: <https://gmvo.skniivh.ru>. 2013–2020.

Дата поступления: 05.07.2022

Решение о публикации: 07.09.2022

Контактная информация:

САНОЦКАЯ Надежда Александровна —

канд. физ.-мат. наук; na_san@mail.ru

БЕЛИКОВ Илья Александрович — студент;

iliy.ily148897@gmail.com

Building Digital Model of Riverbed Pur in Upper Reaches to Ensure Technosphere Safety on Inland Waterways

N. A. Sanotskaya^{1,2}, I. A. Belikov¹

¹Russian State Hydrometeorological University, 79, Voronezhskaya st., Saint Petersburg, 192007, Russian Federation

²Arctic and Antarctic Research Institute, 38, Bering st., Saint Petersburg, 199397, Russian Federation

For citation: Sanotskaya N. A., Belikov I. A. Building Digital Model of Riverbed Pur in Upper Reaches to Ensure Technosphere Safety on Inland Waterways // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 712–726. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-712-726

Summary

Purpose: To consider the issues of building and using digital models of riverbeds for to ensure technosphere safety on inland waterways on the example of river Pur. **Methods:** Collection, processing of the data of observations of water bodies and their transfer into electronic format with further analysis. **Results:** To ensure technosphere safety, digital model of riverbed Pur in the upper reaches is presented and meteorological and hydrological characteristics in the area of study are renewed. Air temperature difference is shown according to the current regulatory documents (СП 131.13330.2020 “Construction climatology”) and average for 30 years (basic climatic period is from 1991 to 2020) indicators. **Practical importance:** The need to clarify meteorological and hydrological characteristics in changing climate conditions is shown. To maintain dimensional parameters of riverbeds it is recommended to create the digital models. The work results can be recommended to practical use. The work main conclusion is that digital model use in shipping sphere can significantly facilitate tasks implementation. The main advantage of these models use is a visualization — one can easily and quickly identify problem areas with the help of the model. Obtaining information from the model, for example, of transverse profile, is being made in a couple of minutes also. When terrain changes, for example, after dredging works, it wouldn't be difficult to introduce all changes to the model.

Keywords: Technosphere safety, inland waterways, digital model of riverbed, water regime, river Pur.

References

1. *General'nyy plan munitsipal'nogo obrazovaniya gorod Tarko-Sale Purovskogo rayona. Materialy po obosnovaniyu proekta* [The master plan of the municipal formation of the city of Tarko-Sale, Purovsky district. Project justification materials]. Available at: <https://www.puradm.ru/deyatelnost/gradostroitel-naya-deyatelnost/dokumenty-territorialnogo-planirovaniya/generalnyy-plan-munitsipalnogo-obrazovaniya-gorod-tarko-sale/Materialy%20po%20obosnovaniyu%20v%20tekstovoy%20forme.pdf> (accessed: July 06, 2022). (In Russian)
2. *Ob'-Irtyskiy basseyn: Vodnye puti Zapadnoy Sibiri* [Ob-Irtys basin: Waterways of Western Siberia]. Available at: <http://www.morvesti.ru/analitika/1690/28097/> (accessed: July 06, 2022). (In Russian)
3. Solov'eva Z. S. Urovennyy rezhim r. Pur [Level regime of the river. Pur]. *Trudy AANII. Problemy gidrologii ust'evykh oblastey sibirskikh rek* [Proceedings of the AARI. Problems of Hydrology of the Mouth Areas of Siberian Rivers]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1972, pp. 92–103. (In Russian)
4. *Rasporyazhenie Federal'nogo agentstva morskogo i rechnogo transporta ot 27 dekabrya 2021 g. № AL-595-r “Ob ustanovlenii kategoriy vnutrennikh vodnykh putey, opredelyayushchikh dlya uchastkov vnutrennikh vodnykh putey*

gabarity sudovykh khodov i navigatsionno-gidrograficheskoe obespechenie usloviy plavaniya sudov, perechen' sudovykh khodov, a takzhe sroki raboty sredstv navigatsionnogo oborudovaniya i sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy v navigatsiyu 2022 goda” [Decree of the Federal Agency for Marine and River Transport dated December 27, 2021 No. AL-595-r “On the establishment of categories of inland waterways that determine the dimensions of ship passages for sections of inland waterways and navigational and hydrographic support for the navigation conditions of vessels, a list of ship passages, as well as the terms of operation of aids to navigation and navigable hydraulic structures in navigation in 2022”]. (In Russian)

5. Razuvaev V. N., Bulygina O. N., Korshunova N. N., Kleshchenko L. K., Kuznetsova V. N., Trofimenko L. T., Sherstyukov A. B., Shvets' N. V., Davletshin S. G., Zvereva G. N. *Nauchno-prikladnyy spravochnik «Klimat Rossii»* [Scientific and applied reference book “Climate of Russia”]. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/> (accessed: July 06, 2022). (In Russian)

6. SP 131.13330.2020. *Stroitel'naya klimatologiya* [SP 131.13330.2020. Building climatology. Introduction date 2019-05-29]. (In Russian)

7. Sanotskaya N. A. Vodnyy i ledovyy rezhimy reki Pur v sovremennykh usloviyakh [Water and ice regimes of the Pur River in modern conditions]. *Morskie issledovaniya i obrazovanie. Sbornik trudov X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Marine research and education. Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference]. Tver', 2021, pp. 311–316. (In Russian)

8. Sanotskaya N. A., Azaryan V. S. *Izmeneniya vodnogo i ledovogo rezhima r. Pur v stvore g. Urengoy* [Changes in

the water and ice regime of the river. Pur in the alignment of the city of Urengoy]. *Geografiya: razvitie nauki i obrazovaniya. Sbornik statey po materialam ezhegodnoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii LXXIV Gertsenovskie chteniya* [Geography: the development of science and education. Collection of articles based on the materials of the annual international scientific-practical conference LXXIV Herzen readings]. St. Petersburg, 2021, pp. 281–284. (In Russian)

9. *Gidrologicheskiy ezhegodnik. Basseyn Karskogo morya (zapadnaya chast')* [Hydrological Yearbook. Volume 6. Basin of the Kara Sea (western part)]. 1935-1980, I. 4–9, vol. 6. (In Russian)

10. *Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushy* [Annual data on the regime and resources of land surface waters]. 1981–2012, vol. 1, I. 10. Basseyn Obi (bez basseyna Irtysha), Nadyma, Pura, Taza. (In Russian)

11. *Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob'ektov (AIS GMVO)* [Automated information system for state monitoring of water bodies (AIS GMVO)]. Available at: <https://gmvo.skniivh.ru>. 2013–2020. (In Russian)

Received: July 05, 2022

Accepted: September 07, 2022

Author's information:

Nadezhda A. SANOTSKAYA — PhD in Physics and Mathematics; na_san@mail.ru

Ilya A. BELIKOV — Student;

iliy.iliy148897@gmail.com



УДК 621.62-4

Моделирование процессов термической обработки в модуле QFORM Heat Treatment

А. А. Воробьев¹, А. А. Крутько², А. М. Бадамшин²

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

²Омский государственный технический университет, Российская Федерация, 655050, Омск, Мира пр., 11

Для цитирования: Воробьев А. А., Крутько А. А., Бадамшин А. М. Моделирование процессов термической обработки в модуле QFORM Heat Treatment // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 727–735. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-727-735

Аннотация

Цель: Проведение обзора методики алгоритма добавления нового материала в базу данных модуля Qform Heat Treatment с последующей оценкой адекватности модели методом сравнения распределения ее микротвердости с экспериментальными данными. **Методы:** Разработана методика моделирования термической обработки (закалки) образцов из сталей 60 и 40X в программном модуле QFORM Heat Treatment. Приводится алгоритм добавления нового материала в базу данных программного комплекса с последующей оценкой адекватности построенной модели методом сравнения полученных данных распределения микротвердости по сечению при моделировании процесса в Qform и данных лабораторного эксперимента. **Результаты:** Модели распределения твердости по диаметральному сечению закаленных цилиндрических образцов из встроеной в базу данных QFORM Heat treatment стали 60 и адаптированной стали 40X. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными распределения твердости закаленных образцов. **Практическая значимость:** Полученные в настоящей работе результаты представляют алгоритм пополнения базы данных модуля Qform Heat Treatment, предназначенного для проведения операций термической обработки сталей и цветных сплавов. В процессе проведения эксперимента было установлено, что модель добавленного в базу данных материала обладает высокой степенью адекватности. Расширение базы данных материалов данного модуля позволит осуществлять его широкое применение в производствах, чья деятельность связана с термической обработкой.

Ключевые слова: Термическая обработка, компьютерное моделирование, Qform, закалка, микротвердость, доэвтектоидные стали.

В настоящее время наблюдается стремительный рост внедрения программных комплексов для моделирования технологических процессов машиностроения в производство [1–8]. Это связано с их эффективностью при разработке новых

технологических операций, поскольку адекватно построенные компьютерные модели позволяют в короткий срок провести многофакторный эксперимент и оценить изменение свойств исследуемого объекта [9, 10], что, в свою очередь, снижает

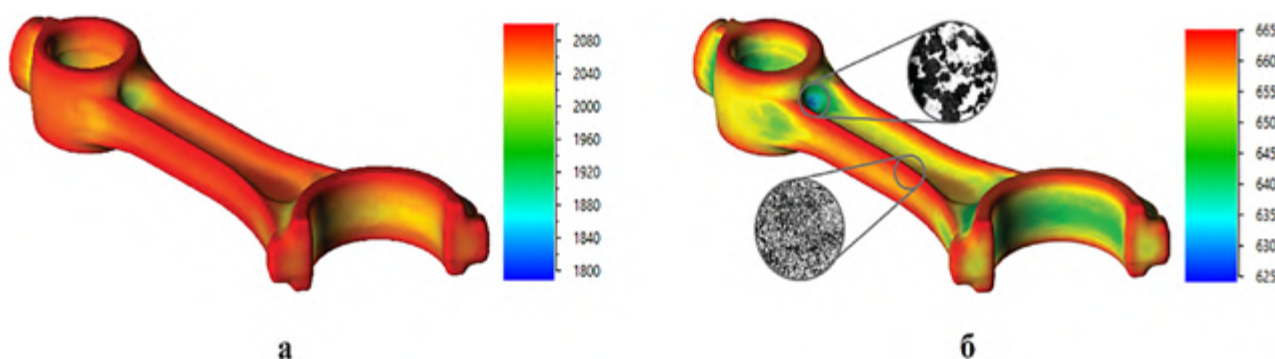


Рис. 1. Моделирование термической обработки в Qform:

a — распределение предела прочности (МПа);

б — распределение твердости по Виккерсу и оценка фазового состава

трудоемкость и длительность разработки новых технологий и их режимов.

В последних версиях программного комплекса QFORM, основное назначение которого заключается в моделировании операций обработки металлов давлением, появился новый модуль QForm Heat Treatment, позволяющий моделировать процессы термической обработки сталей и цветных сплавов [11]. Основные возможности данного комплекса заключаются в прогнозировании фазового состава и механических свойств термически обрабатываемых деталей (рис. 1).

Одним из существенных недостатков данного модуля является отсутствие встроенной широкой базы данных материалов термически обрабатываемых заготовок [12]. Несмотря на это, у пользователя имеется возможность самостоятельно пополнять данную базу методом изменения значений параметров встроенных материалов (физико-механические свойства фаз, кинетика фазовых превращений, равновесные объемные доли фаз, коэффициенты изменения объема при фазовых превращениях и т. д.). Целью настоящей работы является проведение обзора методики алгоритма добавления нового материала в базу данных модуля Qform Heat Treatment с последующей оценкой адекватности модели методом сравнения распределения ее микротвердости с экспериментальными данными.

С применением программного модуля Qform Heat Treatment проводилось моделирование процесса закалки для сталей 60 и 40X. Отсутствующий в базе данных материал — сталь 40X — был добавлен по представленной ниже методике. Температура нагрева под закалку составляла 850 °С для стали 40X и 800 °С для стали 60. Образцы имели цилиндрическую форму с диаметром $d = 12$ мм и высотой $h = 10$ мм. Для оценки адекватности модели проводилось сравнение распределения значений ее микротвердости по сечению с термически обработанными образцами в лабораторных условиях. Экспериментальные образцы имели идентичную геометрическую форму. Нагрев под закалку осуществлялся в термической печи СНОЛ-1,6,2,5.1/11-М1. После проведения термической обработки, для оценки распределения микротвердости по глубине образцы подвергались резке по диаметральному сечению на портативном дисковом отрезном станке с подводом смазочно-охлаждающей жидкости. Исследование микротвердости проводилось на микротвердомере Shimadzu HNV-2 (рис. 2).

При определении значения микротвердости нагрузка на индентор составляла 400 грамм. Время выдержки при данной нагрузке — 8 секунд.

Рассмотрим алгоритм добавления нового материала в базу данных программы на примере



Рис. 2. Микротвердомер Shimadzu HMV-2

стали 40X и последующее проведение термической обработки (закалки).

После загрузки геометрии заготовки производится выбор материала. За основу был взят имеющийся в базе данных материал — сталь 60. После чего было произведено изменение химического состава на состав стали 40X (рис. 3).

По справочным данным [13, 14] были заданы физико-механические свойства фаз материала (рис. 4) и проведена адаптация модели фазовых переходов (рис. 5).

Следующим этапом после добавления нового материала является назначение режимов термической обработки. Температура нагрева под закалку составляла 850 °С, охлаждающая среда — вода [15]. Время выдержки в охлаждающей жидкости — 1 минута. Результаты распределения твердости по диаметральному сечению модели представлены на рис. 6.

Для оценки адекватности модели в ходе исследования была проведена закалка цилиндрических образцов из стали 40X. Микротвердость по сечению определялась методом Виккерса на микротвердомере Shimadzu HMV-2 при нагрузке 50 г. Сравнение экспериментального значения твердости и модели приведено на рис. 7.

Идентичное исследование проводилось для встроенного в базу данных материала — сталь 60. Экспериментальное и моделируемое значение микротвердости представлено на рис. 8.

Из полученных зависимостей видно: результаты моделирования и экспериментальные данные хорошо согласуются.

Дальнейшее повышение качества модели возможно, в частности, при совершенствовании теплофизических характеристик, встроенных в программу охлаждающих сред для термической обработки.

Группа сплавов		3 - unalloyed quality steels with C >: Выбрать	
Базовый элемент		Fe	
	мин	макс	=
C	0.36	0.44	
Si	0.17	0.37	
Mn	0.5	0.8	
P		0.035	
S		0.04	
Cu		0.3	
Cr		0.25	
Ni		0.3	

Свойства

Химический состав

Свойства фаз

Austenite

Сопротивление деформации

Плотность

Теплопроводность

Температурный коэф. расширения

Теплоемкость

Модуль Юнга

Коэф. Пуассона

Твердость

Предел прочности

Ferrite

Рис. 3. Добавление химического состава стали 40X в Qform

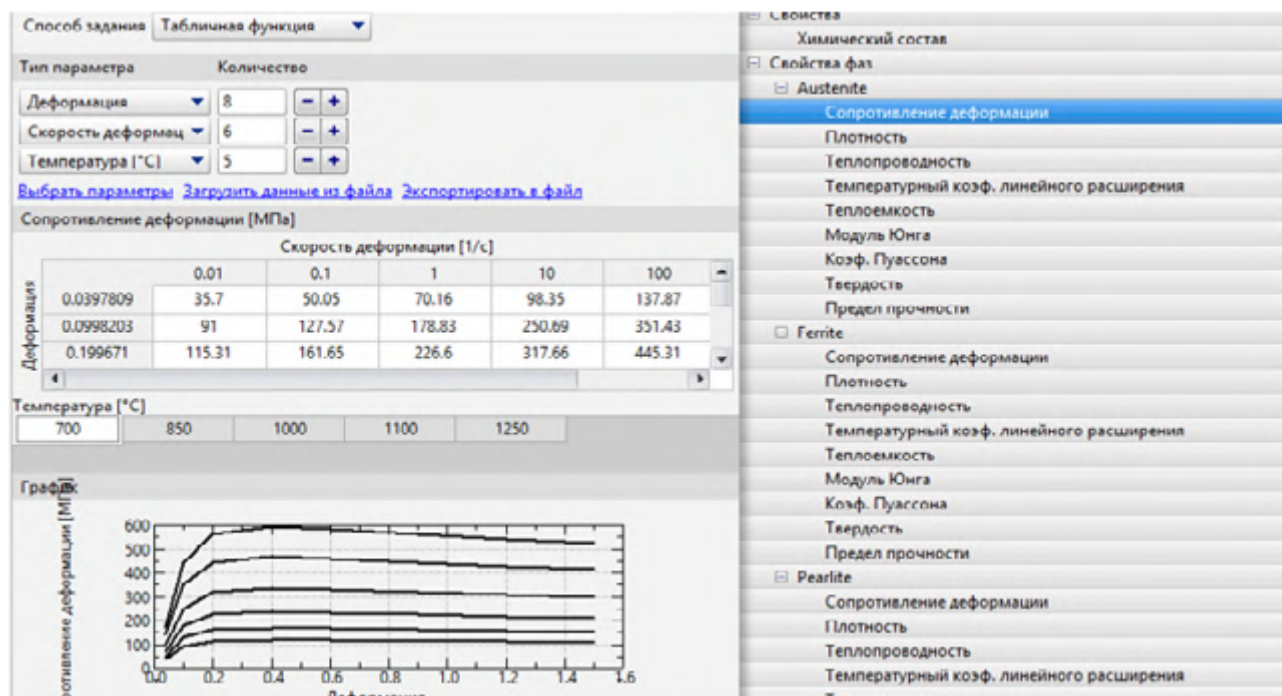
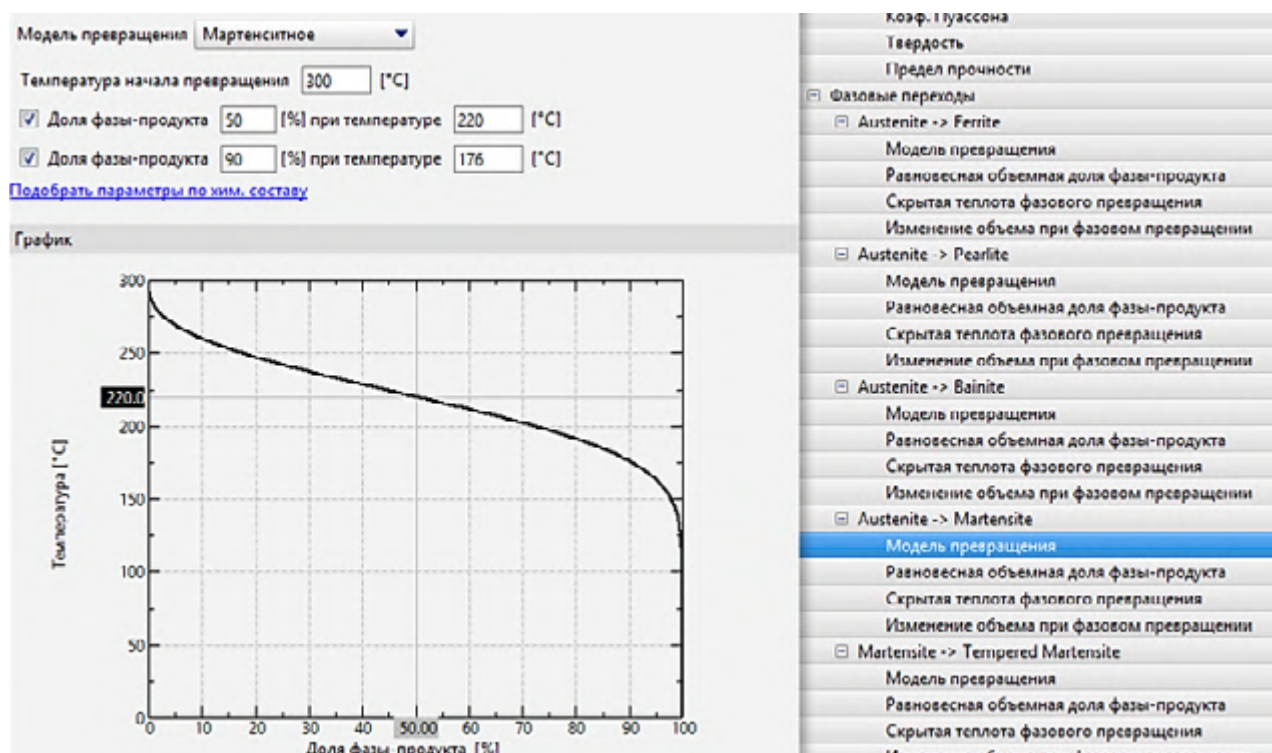


Рис. 4. Задание физико-механических свойств фаз стали 40X

Рис. 5. Адаптация фазовых переходов под сталь 40X
на примере модели мартенситного превращения

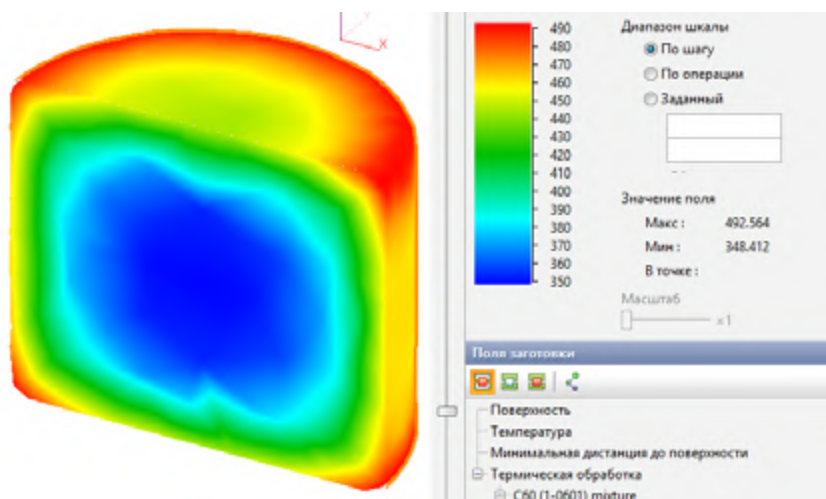


Рис. 6. Модель распределения твердости образца стали 40X после закалки

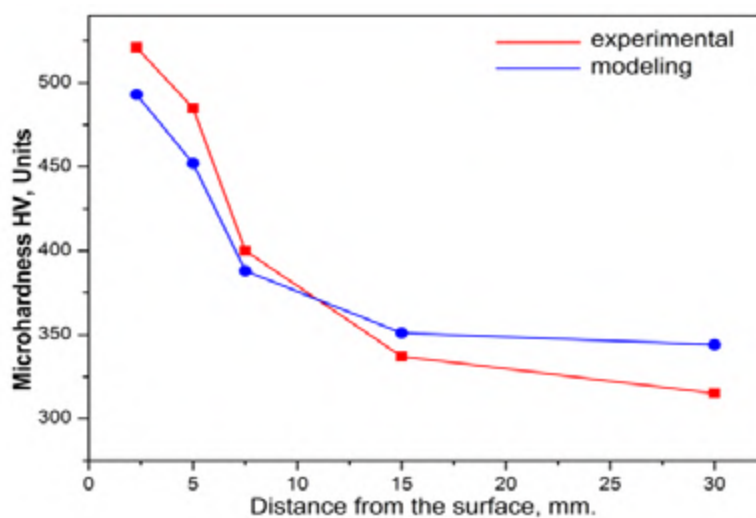


Рис. 7. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных для стали 40X

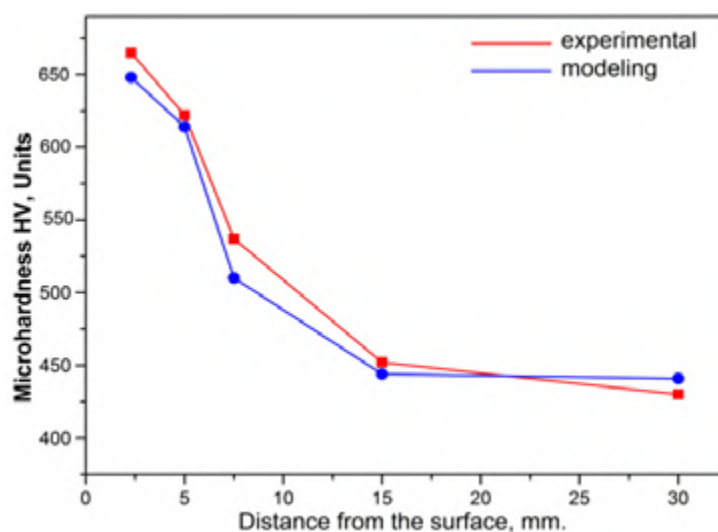


Рис. 8. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных для стали 60

Таким образом, модуль Heat Treatment программного обеспечения QForm VX является перспективным инструментом для моделирования процессов термической обработки. В процессе проведения эксперимента было установлено, что модель добавленного в базу данных материала обладает высокой степенью адекватности. В том случае, если модуль будет активно развиваться разработчиками программы — комплекс Qform имеет большие перспективы становления широко востребованной программой не только у специалистов в области обработки металлов давлением, но и в области моделирования процессов термической обработки.

Библиографический список

1. Alves Zapata J. R. Modeling and Analysis of Electromagnetism in Magnetic Forming Processes / J. R. Alves Zapata, F. Bay // IEEE Trans. Magn. — 2016. — № 5(52). — Pp. 1–12.
2. Kang S. H. Three-dimensional thermo elastic-plastic finite element modeling of quenching process of plain-carbon steel in couple with phase transformation / S. H. Kang, Y. T. Im // International Journal of Mechanical Sciences. — 2007. — № 49. — Pp. 423–439.
3. Койдан И. М. Исследование возможности моделирования формоизменения при тиксоштамповке в программном комплексе QForm / И. М. Койдан, С. А. Евсюков // Технология легких сплавов. — 2013. — № 3. — С. 104–107.
4. Воробьев А. А. Моделирование динамики подвижного состава / А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко и др. // Новые материалы и технологии в машиностроении. — 2015. — № 21. — С. 24–30.
5. Krutko A. A. Investigation of the properties of hardened steels during cutting based on the thermomechanical approach / A. A. Krutko, D. A. Sedykh, A. M. Badamshin et al. // Journal of Physics: Conference Series : IV International Scientific and Technical Conference “Mechanical Science and Technology Update”, MSTU 2020, Omsk, 17–19 марта 2020 года. — Omsk: Institute of Physics Publishing, 2020. — P. 012064.
6. Vorobev A. A. Study of the stress-strain state of the wheel pair of a freight car during braking / A. Vorobev, N. U. Shadrina, A. A. Krutko et al. // Journal of Physics: Conference Series, Omsk, 23–24 апреля 2019 года. — Omsk: Institute of Physics Publishing, 2019. — P. 072019. — DOI: 10.1088/1742-6596/1260/7/072019.
7. Кванин В. Л. Моделирование и оптимизация процесса радиального СВС-прессования цилиндрических заготовок / В. Л. Кванин, Н. Т. Балихина, П. И. Краснощекоев и др. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2005. — № 39. — С. 76–84.
8. Михайлин С. М. Моделирование процесса сверхвысокочастотной термической обработки абразивных инструментов на органических связках / С. М. Михайлин, А. Ш. Хусаинов // СТИН. — 2009. — № 1. — С. 14–20.
9. Федосов С. В. Вариативность подходов к математическому моделированию процессов термической обработки пеностеклянной шихты / С. В. Федосов, М. О. Баканов, С. Н. Никишов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2017. — № 11. — С. 110–116.
10. Орехов А. В. Моделирование процессов интенсификации пеностеклянной шихты при термической обработке / А. В. Орехов // Новая наука: Современное состояние и пути развития. — 2017. — Т. 2. — № 3. — С. 180–182.
11. Пачколина П. А. Моделирование термической обработки валков горячей прокатки в программе Qform / П. А. Пачколина // Технология машиностроения и материаловедение. — 2017. — № 1. — С. 13–14.
12. Бадамшин А. М. Моделирование процессов термической обработки в модуле QFORM HEAT TREATMENT / А. М. Бадамшин, З. Ю. Руппель, С. А. Черных и др. // Техника и технологии машиностроения: материалы IX Международной научно-технической конференции, Омск, 8–10 июня 2020 года. — Омск: Омский государственный технический университет, 2020. — С. 71–74.

13. Грост А. И. Железоуглеродистые стали и сплавы: структурообразование и свойства / А. И. Грост. — Минск: Белорус. наука, 2010. — 252 с.

14. Бернштейн М. Л. Структура и механические свойства металлов / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский. — М.: Металлургия, 1970. — 472 с

15. Бадамшин А. М. Влияние режимов термоультразвуковой обработки на механические свойства образцов из стали 40Х / А. М. Бадамшин, Д. А. Седых, З. Ю. Руппель и др. // Техника и технологии машиностроения: материалы IX Международной научно-технической конференции, Омск, 8–10 июня 2020 года. — Омск: Омский государственный технический университет, 2020.

Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Дата поступления: 27.05.2022

Решение о публикации: 30.08.2022

Контактная информация:

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, доц.; 79219751198@yandex.ru

КРУТЬКО Андрей Александрович — канд. техн. наук, доц.; andrey_904@mail.ru

БАДАМШИН Артем Маратович — ассистент; artembadamschin@mail.ru

Modeling of Heat Treatment Processes in QFORM Heat Treatment Module

A. A. Vorobyov¹, A. A. Krutko², A. M. Badamshin²

¹Petersburg Emperor Alexander I State Transport University, 190031, St. Petersburg, Moskovsky pr., 9, Russian Federation

²Omsk State Technical University, 11 Mira Ave., Omsk, 655050, Russian Federation

For citation: Vorobyov A. A., Krutko A. A., Badamshin A. M. Modeling of Heat Treatment Processes in QFORM Heat Treatment Module // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 727–735. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-727-735

Summary:

Purpose: To review algorithm methodology for the addition of a new material to Qform Heat Treatment Module database with further adequacy assessment of the model by the method of the comparison its microhardness distribution with experimental data. **Methods:** Technique for the modeling of heat treatment (hardening) of samples from steels 60 and 40Cr in QFORM Heat Treatment software module has been developed. Algorithm for new material addition into software package database with adequacy further assessment for built model by the method of comparison of obtained data on distribution of microhardness over a section while process modeling in Qform with laboratory experiment data is presented. **Results:** Models of hardness distribution over the diametrical section of hardened cylindrical samples from steel 60 and adapted steel 40X, built into QFORM Heat treatment database. Comparison of modeling results with experimental data on hardness distribution of hardened samples. **Practical significance:** The results, obtained in this work, represent algorithm for replenishing the database of Qform Heat Treatment Module, created for the purpose to carry out heat treatment procedures for steels and non-ferrous alloys. During experiment pursuing, it was established that the model of added to the database material demonstrates adequacy high degree. The expansion of the database of given materials of the given Module will allow its widespread application in the industries which activities are related to heat treatment.

Keywords: Heat treatment, computer simulation, Qform, hardening, microhardness, hypoeutectoid steels.

References

1. Alves Z J. R., Bay F., Modeling and Analysis of Electromagnetism in Magnetic Forming Processes. IEEE Trans. Magn. 2016, I. 5 (52), pp. 1–12.
2. Kang S. H., Im Y. T. Three-dimensional thermo elastic-plastic finite element modeling of quenching process of plain-carbon steel in couple with phase transformation. International Journal of Mechanical Sciences. 2007, I. 49, pp. 423–439.
3. Koydan I. M., Evsyukov S. A. Issledovanie vozmozhnosti modelirovaniya formoizmeneniya pri tiksoshtampovke v programmnom komplekse QForm [Evsyukov, Investigation of the possibility of modeling the shape change during thixo-stamping in the QForm software package]. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of light alloys]. 2013, I. 3, pp. 104–107. (In Russian)
4. Vorob'ev A. A., Budyukin A. M., Kondratenko V. G., Merochnik K. A. Modelirovanie dinamiki podvizhnogo sostava [Modeling of rolling stock dynamics]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii* [New materials and technologies in mechanical engineering]. 2015, I. 21, pp. 24–30. (In Russian)
5. Krutko A. A., Sedykh D. A., Badamshin A. M., Vorobiev A. A. Investigation of the properties of hardened steels during cutting based on the thermomechanical approach. Journal of Physics: Conference Series : IV International Scientific and Technical Conference “Mechanical Science and Technology Update”, MSTU 2020, Omsk, 17–19 marta 2020 goda. Omsk: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012064.
6. Vorobev A. A., Shadrina N. U., Krutko A. A., Badamshin A. M. Study of the stress-strain state of the wheel pair of a freight car during braking. Journal of Physics: Conference Series, Omsk, 23–24 aprelya 2019 goda. Omsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 072019. DOI 10.1088/1742-6596/1260/7/072019.
7. Kvanin V. L., Balikhina N. T., Krasnoshchekov P. I. Modelirovanie i optimizatsiya protsessa radial'nogo SVS-pressovaniya tsilindricheskikh zagotovok [Modeling and optimization of the process of radial SHS pressing of cylindrical blanks]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical sciences]. 2005, I. 39, pp. 76–84. (In Russian)
8. Mikhaylin S. M. *Modelirovanie protsessa sverkhvysokochastotnoy termicheskoy obrabotki abrazivnykh instrumentov na organicheskikh svyazkakh* [Modeling of the process of ultrahigh-frequency heat treatment of abrasive tools on organic binders]. STIN. 2009, I. 1, pp. 14–20. (In Russian)
9. Fedosov S. V., Bakanov M. O., Nikishov S. N. Variativnost' podkhodov k mate-maticheskomu modelirovaniyu protsessov termicheskoy obrabotki penostekol'noy shikhty [Variability of approaches to mathematical modeling of the processes of heat treatment of foam glass mixture]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov]. 2017, I. 11, pp. 110–116. (In Russian)
10. Orekhov A. V. Modelirovanie protsessov intensivatsii penostekol'noy shikhty pri termicheskoy obrabotke [Modeling the processes of intensification of the foam-glass charge during heat treatment]. *Novaya nauka: Sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya* [New Science: Current state and ways of development]. 2017, vol. 2, I. 3, pp. 180–182. (In Russian)
11. Pachkolina P. A. Modelirovanie termicheskoy obrabotki valkov goryachey prokatki v programme Qform [Modeling the heat treatment of hot rolling rolls in the Qform program]. *Tekhnologiya mashinostroeniya i materialovedenie* [Engineering technology and materials science]. 2017, I. 1, pp. 13–14. (In Russian)
12. Badamshin A. M., Ruppel' Z. Yu., Chernykh S. A. Modelirovanie pro-tsessov termicheskoy obrabotki v module QFORM HEAT TREATMENT [Modeling of heat treatment processes in the QFORM HEAT TREATMENT module]. *Tekhnika i tekhnologii mashinostroeniya: Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Omsk, 08–10 iyunya 2020 goda* [Engineering and technology of mechanical engineering: Proceedings of the IX International Scientific and Technical conference, Omsk, June 08–10, 2020]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet Publ., 2020, pp. 71–74. (In Russian)

13. Grost A. I. *Zhelezouglerodistye stali i splavy: strukturoobrazovanie i svoystva* [Iron-carbon steels and alloys: structure formation and properties]. Minsk: Belorus. Navuka Publ. 2010. 252 p. (In Russian)

14. Bernshteyn M. L., Zaymovskiy V. A. *Struktura i mekhanicheskie svoystva metallov* [Structure and mechanical properties of metals]. Moscow: Metallurgiya Publ. 1970. 472 p. (In Russian)

15. Badamshin A. M., Sedykh D. A., Ruppel' Z. Yu. Vliyanie rezhimov ter-moul'trazvukovoy obrabotki na mekhanicheskie svoystva obraztsov iz stali 40Kh [Influence of thermal ultrasonic processing modes on the mechanical properties of specimens made of steel 40Kh]. *Tekhnika i tekhnologii mashinostroeniya : Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Omsk, 08–10 iyunya 2020 goda* [Engineering and technology of mechanical

engineering: Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference, Omsk, June 08–10, 2020]. Omsk: Omskiy gosudar-stvennyy tekhnicheskiiy universitet Publ., 2020. (In Russian)

Received: May 27, 2022

Accepted: August 30, 2022

Author's information:

Alexander A. VOROBYEV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; 79219751198@yandex.ru

Andrey A. KRUTKO — PhD in Engineering, Associate Professor; andrey_904@mail.ru

Artem M. BADAMSHIN — Assistant; artembadamschin@mail.ru

УДК 625.02

Цифровизация железнодорожного транспорта с участием операторских компаний

В. В. Никифоров¹, Г. И. Никифорова²

¹ООО «Трансойл», Российская Федерация, 197046, Санкт-Петербург, Петроградская наб., 18

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

Для цитирования: *Никифоров В. В. Никифорова Г. И.* Цифровизация железнодорожного транспорта с участием операторских компаний // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 736–742. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-736-742

Аннотация

Цель: Исследовать вопросы практического участия и взаимодействия операторских компаний с ОАО «РЖД» в вопросах цифровизации и улучшения эксплуатационных процессов. Проанализировать состав возможного показателя комплексного уровня качества транспортных услуг. Оценить влияние операторской компании на составляющие элементы продолжительности оборота вагона с учетом цифровизационных процессов. **Методы:** Анализ состава показателей для оценки эксплуатационной работы и уровня предоставляемых транспортных услуг. Вывод формулы комплексного уровня качества транспортных услуг. **Результаты:** Представлены пути развития взаимодействия бизнеса и ОАО «РЖД», повышение уровня цифровизации технологических процессов, оценки уровня качества транспортных услуг. **Практическая значимость:** Сокращение времени оборота вагона, снижение продолжительности операций коммерческого осмотра, повышение уровня транспортных услуг позволят сократить временные затраты, увеличить прибыльность перевозок, повысить конкурентоспособность компании.

Ключевые слова: Взаимодействие ОАО «РЖД» и компании-оператора, оборот вагона, эксплуатационные показатели, комплексный уровень качества транспортной услуги, цифровизация.

Введение

В новых условиях ведения бизнеса транспортная отрасль Российской Федерации вынуждена реагировать на санкционную политику ряда стран. Однако не стоит забывать, что любой кризис содержит потенциальные точки развития и роста [1, 2]. Проблемные и «узкие» места в работе транспорта при эффективной проработке могут существенно повысить качество оказываемых услуг. В этой связи разнообразие субъектов транс-

портной отрасли следует рассматривать не только как конкурирующие стороны, а в первую очередь как игроков бизнеса с общими целями [3, 4]. Одним из возможных направлений развития является цифровизация технологических процессов [5–7]. При этом стоит понимать, что цифровизация является лишь инструментом и методом совершенствования бизнес-процессов. Основой функционирования транспортной отрасли, в особенности железнодорожного транспорта,



Рис. 1. Примеры повышения эффективности перевозочного процесса компании «Трансойл»

по-прежнему является структура, сложившаяся в советское время [8, 9]. Конечно, изменениям подверглась значительная часть железнодорожного транспорта, и это правильно, поскольку таким образом динамическая система реагирует на изменения внешней среды. К наиболее серьезным переменам следует отнести введение в отрасль компаний-операторов подвижного состава, деятельность которых вновь выстраивается на основе упомянутой структуры, сложившейся в XX веке. В частности, оценка деятельности владельцев подвижного состава выстраивается на анализе количественных и качественных эксплуатационных показателей [9]. Менеджмент компаний-операторов выстраивает бизнес-процессы с целью увеличения прибыльности, которая достигается улучшением эксплуатационных показателей, например оборота вагона. Взаимодействие с ОАО «РЖД» позволяет снижать издержки и потери, применяя ряд инструментов и методов. Цифровизация некоторых технологических операций за счет оператора позволит улучшить показатели не только компании владельца подвижного состава,

но и ОАО «РЖД». Также достаточно интересной представляется задача вывода комплексного универсального показателя уровня транспортного обслуживания, который выстраивался бы в том числе на системе классических эксплуатационных показателей.

Эффективность работы железнодорожного транспорта в современных условиях зависит от грамотного ведения бизнеса операторскими компаниями. Владельцы подвижного состава заинтересованы в удовлетворении потребностей клиентов, повышении уровня сервиса, что в конечном итоге влияет на прибыль компаний. Для оценки деятельности компании-операторы также применяют качественные и количественные эксплуатационные показатели, как и ОАО «РЖД». Поиск решений для улучшения таких показателей, например оборота вагона, приводит к созданию и успешному применению ряда технологических, операционных и информационных продуктов (рис. 1). К таким решениям можно отнести формирование операторами маршрутов длинно-составных поездов, увеличение использования

вместимости вагонов, переход на электрическую тягу, где это возможно.

Компания «Трансойл» является крупнейшим частным российским оператором по объему транспортировки нефти и нефтепродуктов в стране. География работы компании представлена на рис. 2. «Трансойл» обладает одним из самых молодых парков вагонов-цистерн в отрасли, собственным парком локомотивов серий 2ЭС4К и 2ТЭ116, имеет вагоноремонтное предприятие (ВРП) и промывочно-рециркуляционную станцию. Надежная материальная база позволяет компании занимать лидирующие позиции в бизнесе.

Стратегическими ориентирами компании являются:

- динамическое развитие транспортно-логистической группы с собственным парком и инфраструктурой;
- повышение эффективности модели бизнеса, сохранение лидирующих позиций на рынке грузовых железнодорожных перевозок;
- стабильный рост объемов перевозок и расширение номенклатуры перевозимых грузов;
- расширение географии присутствия и развитие новых перспективных маршрутов;
- внедрение инновационных технологий, разработка отраслевых ноу-хау в целях повышения эффективности деятельности;
- сохранение и развитие высоких отраслевых компетенций, надежности и высокого качества обслуживания;
- установление лучших стандартов корпоративного управления и корпоративной социальной ответственности.

Традиционно оценка качества транспортных услуг проводится по следующим группам показателей [8]: показатели перевозки груза к назначенному сроку, показатели регулярности прибытия грузов, показатели срочности перевозки грузов. Все перечисленные группы показателей целесообразно рассмотреть в составе комплексного

уровня качества предоставляемой транспортной услуги [10]:

$$\overline{Y}_p = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{P_{\delta i}}, \quad (1)$$

где P_i и $P_{\delta i}$ — значение единичного i -го показателя качества соответственно анализируемой и базовой (договорной) услуге;

n — число показателей качества услуг.

Возможно также определить комплексный уровень качества через сумму произведений весовых коэффициентов на соответствующие относительные уровни качества транспортной услуги:

$$\overline{Y}_p = \sum_{i=1}^n m_i Y_{pi}, \quad (2),$$

где Y_{pi} — относительный уровень качества транспортной услуги, определяемый значением i -го показателя качества;

m_i — коэффициент весомости i -го показателя.

Для обеспечения клиентам комплекса оптимальных логистических решений в компании ООО «Трансойл» разрабатываются оригинальные программные продукты, позволяющие на основании исходных данных реализовывать оптимальные логистические решения. К ним можно отнести ПС «Базис». Входными данными для работы программы являются: заявка заказчика, прогнозные сроки груженых и порожних рейсов, прогнозные сроки выгрузки у каждого грузополучателя, характеристики вагонного парка (тип, калибр котла и др.), наименования ранее перевозимого груза, технические характеристики конкретного вагона.

«Базис» позволяет реализовать ряд оптимальных логистических решений:

- укрупнение отправок (перевозка собственными поездными формированиями, прямыми отправительскими маршрутами, техническими маршрутами);

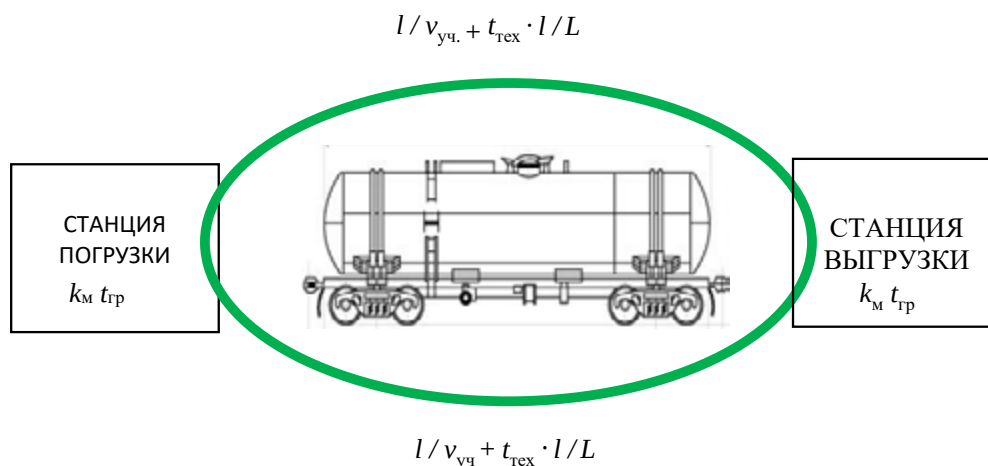


Рис. 3. Оборот вагона:

l — рейс вагона; $v_{\text{уч}}$ — участковая скорость; L — вагонное плечо;
 $t_{\text{тех}}$ — простой транзитных вагонов на технических станциях;
 k_m — коэффициент местной работы; $t_{\text{гр}}$ — простой на одну грузовую операцию

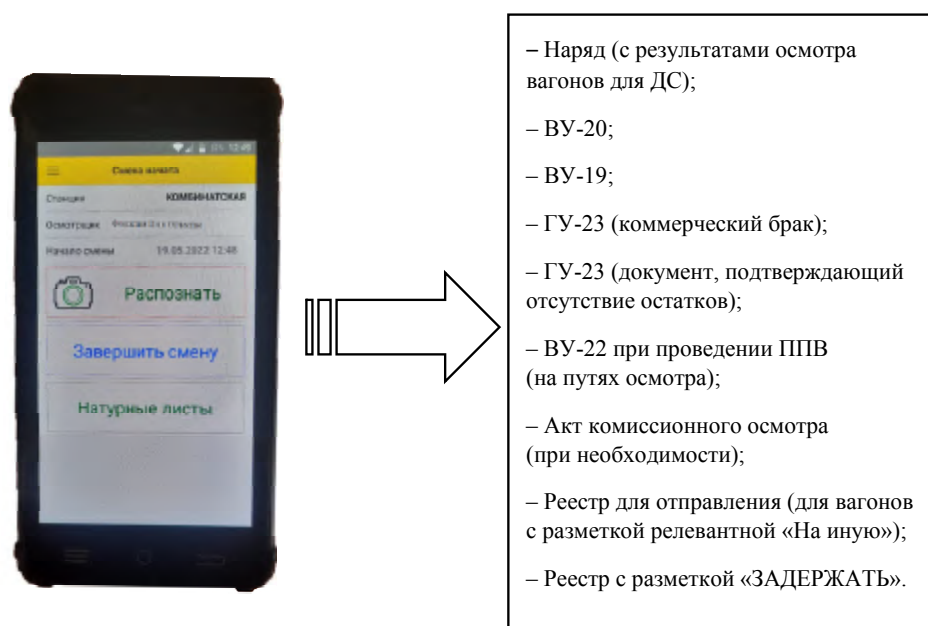


Рис. 4. Цифровизация операций при коммерческом осмотре вагона

- обеспечение заказчиков вагонами с оптимальной переподготовкой вагонов;
- сокращение порожнего пробега;
- выбор оптимальной логистики для «предотказных» и «невозвратных» вагонов.

Трехчленная формула оборота вагона определяется как сумма продолжительности операций с вагоном от погрузки до погрузки (рис. 3).

Компания-оператор подвижного состава в значительной степени может повлиять на грузовой простой и простой на технических станциях в обороте вагона (выделены на рис. 3). В связи с этим компания «Трансойл» предлагает цифровизацию операций при коммерческом осмотре вагонов-цистерн при помощи специальных планшетов. Создание программного продукта «НЛ

Осмотр», интегрированного с информационными системами компании «Трансойл», и обеспечение сотрудников мобильными устройствами с интерфейсом программного продукта позволит зафиксировать результаты осмотра вагонов (включая необходимость выполнения работ по промывке и очистке цистерн), перевести в цифровой вид алгоритм контроля и изменения разметки вагонов, обеспечить без участия человека передачу информации об осмотре и создать ряд документов (рис. 4). Стандартизация выполняемых операций позволит исключить влияние человеческого фактора на результаты фиксации и передачи сведений в информационные системы; сократить потери при фиксации результатов осмотра «в поле» с последующим оформлением результатов осмотра.

Библиографический список

1. Покровская О. Д. Генезис логистических транспортных систем уровня 5-pl в свете новых антироссийских санкций / О. Д. Покровская // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — № 2. — С. 141–163.
2. Покровская О. Д. Логистические транспортные системы России в условиях новых санкций / О. Д. Покровская // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — № 1. — С. 80–94.
3. Никифорова Г. И. Оценка возможностей транспортно-экспедиторской компании при проектировании цепи доставки груза / Г. И. Никифорова, Т. Г. Сергеева // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2022. — Т. 19. — № 2. — С. 298–304.
4. Никифорова Г. И. Выбор логистической схемы доставки груза / Г. И. Никифорова, Т. Г. Сергеева // Бюллетень результатов научных исследований. — 2021. — № 4. — С. 65–74.
5. Полиэтов Д. А. Цифровые технологии на сети железных дорог России / Д. А. Полиэтов, О. Д. Покровская // Управление эксплуатационной работой на транспорте (УЭРТ-2022): сборник трудов Международной научно-практической конференции / Под ред. А. Ю. Паньчева, Т. С. Титовой, О. Д. Покровской; отв. за выпуск А. В. Сугоровский, Г. И. Никифорова, Т. Г. Сергеева и др. — 2022. — С. 132–137.
6. Куренков П. В. Цифровая оптимизация контейнерных маршрутов / П. В. Куренков, Д. Г. Кахриманова, Н. А. Ковалева и др. // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2019. — № 9. — С. 21–36.
7. Ефимова О. В. Цифровизация интеллектуализации логистики интермодальных и мультимодальных перевозок / О. В. Ефимова, И. В. Карапетянц, П. В. Куренков и др.; под ред. А. Н. Новикова // Информационные технологии и инновации на транспорте: материалы IV Международной научно-практической конференции. — 2019. — С. 103–110.
8. Рахмангулов А. Н. Транспортная логистика: учеб. пособие / А. Н. Рахмангулов, С. В. Трофимов, С. Е. Гавришев и др. — Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2000. — 372 с.
9. Бадах В. И. Управление эксплуатационной работой на железнодорожном транспорте: учебник. Том 1: технология работы станций / В. И. Бадах, В. И. Ковалев, А. Г. Котенко и др. — М., 2015.
10. Салимова Т. А. Управление качеством: учеб. по специальности «Менеджмент организации» / Т. А. Салимова. — М.: Омега-Л, 2013. — 376 с.

Дата поступления: 05.10.2022

Решение о публикации: 12.11.2022

Контактная информация:

НИКИФОРОВ Владислав Владимирович —
директор департамента ООО «Трансойл»;
vladislavnikiforov@yandex.ru

НИКИФОРОВА Гузель Ислямовна — канд. техн. наук,
доц.; guzel.spb@mail.ru

Digitalization of Railway Transport with the Participation of Operator Companies

V. V. Nikiforov¹, G. I. Nikiforova²

¹ “Transoil” Close Corporation, 18, Petrogradskaya em., Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

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

For citation: Nikiforov V. V., Nikiforova G. I. Digitalization of Railway Transport with the Participation of Operator Companies // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 736–742. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-736-742

Summary

Purpose: To explore the issues of practical participation and interaction of operator companies with Russian Railways Ltd in the matters of operational processes digitalization and improvement. To analyze the composition of possible indicator of transport service comprehensive level quality. To assess the impact of operator company on constituent elements of car turnover duration given digitalization processes. **Methods:** The analysis of indicators composition to assess operational performance and transport services provided level. Formula derivation for transport service comprehensive level quality. **Results:** Ways to develop interaction between businesses and Russian Railways Ltd, to raise the level of technological processes digitalization, to assess transport services quality level are presented. **Practical significance:** Wagon turnover time cut, the reduction of commercial inspection operations duration and transport services level rise will allow to reduce time costs, to increase transportations profitability and to raise the company’s competitiveness.

Keywords: Interaction between Russian Railways Ltd and operator company, wagon turnover, performance indicators, transport service comprehensive level quality, digitalization.

References

1. Pokrovskaya O. D. Genezis logisticheskikh transportnykh sistem urovnya 5-pl v svete novykh antirossiyskikh sanktsiy [Genesis of 5-pl level logistics transport systems in the light of new anti-Russian sanctions]. *Byulleten’ rezul’tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2022, I. 2, pp. 141–163. (In Russian)
2. Pokrovskaya O. D. Logisticheskie transportnye sistemy Rossii v usloviyakh novykh sanktsiy [Logistic transport systems of Russia in the conditions of new sanctions]. *Byulleten’ rezul’tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2022, I. 1, pp. 80–94. (In Russian)
3. Nikiforova G. I., Sergeeva T. G. Otsenka vozmozhnostey transportno-ekspeditorskoy kompanii pri proektirovani tsepi dostavki gruzha [Assessment of the capabilities of a freight forwarding company in the design of a cargo delivery chain]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg University of Communications]. 2022, vol. 19, I. 2, pp. 298–304. (In Russian)
4. Nikiforova G. I., Sergeeva T. G. Vybor logisticheskoy skhemy dostavki gruzha [The choice of a logistics scheme for the delivery of goods]. *Byulleten’ rezul’tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2021, I. 4, pp. 65–74. (In Russian)
5. Poliektov D. A., Pokrovskaya O. D. Tsifrovye tekhnologii na seti zheleznnykh dorog Rossii [Digital technologies on the Russian railway network]. *Upravlenie ekspluatatsionnoy rabotoy na transporte (UERT–2022). Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Management of operational work in transport (UERT–2022)]. 2022, pp. 132–137. (In Russian)

6. Kurenkov P. V., Kakhrimanova D. G., Kovaleva N. A., Lin' Yu., Astaf'ev A. V. Tsifrovaya optimizatsiya konteynernykh marshrutov [Digital optimization of container routes]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection]. 2019, I. 9, pp. 21–36. (In Russian)
7. Efimova O. V., Karapetyants I. V., Kurenkov P. V., Magomedova N. G., Safronova A. A. Tsifrovizatsiya intellektualizatsii logistiki intermodal'nykh i mul'timodal'nykh perevozok [Digitalization of intellectualization of intermodal and multimodal transportation logistics]. *Informatsionnye tekhnologii i innovatsii na transporte. Materialy 4-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Information technologies and innovations in transport. Materials of the 4th International Scientific and Practical Conference]. 2019, pp. 103–110. (In Russian)
8. Rakhmangulov A. N., Trofimov S. V., Gavrishev S. E., Makarov A. M. *Transportnaya logistika* [Transport logistics]. Magnitogorsk: MGТУ im.G.I. Nosova Publ., 2000. 372 p. (In Russian)
9. Badakh V. I., Kovalev V. I., Kotenko A. G., Kudryavtsev V. A., Mokeychev E. Yu., Strelkov M. V. *Upravlenie ekspluatatsionnoy rabotoy na zheleznodorozhnom transporte* [Management of operational work on railway transport]. Moscow, 2015, vol. 1. (In Russian)
10. Salimova T. A. *Upravlenie kachestvom* [Quality management]. Moscow: Omega – L Publ., 2013. 376 p. (In Russian)

Received: October 05, 2022

Accepted: November 12, 2022

Author's information:

Vladislav V. NIKIFOROV —Director Department of Transoil LLC; vladislavnikiforov@yandex.ru

Guzel I. NIKIFOROVA — PhD in Engineering, Associate Professor; guzel.spb@mail.ru

УДК 654.165

Математическая модель канала управления стандарта радиосвязи GSM-R

А. М. Болдинов, А. А. Привалов

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

Для цитирования: Болдинов А. М., Привалов А. А. Математическая модель канала управления стандарта радиосвязи GSM-R // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 743–751. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-743-751

Аннотация

Цель: Разработать модель для оценки и анализа качества функционирования логических каналов управления (КУ) стандарта радиосвязи GSM-R. **Методы:** Процесс функционирования совмещенного канала управления представляется в виде стохастической сети с дальнейшим получением эквивалентной функции, среднего времени и функции распределения времени передачи информации в канале передачи данных. **Результаты:** Разработана математическая модель процесса функционирования совмещенных КУ, соответствующая алгоритму установления соединения подвижного пользователя с базовой станцией сети. Результаты моделирования позволяют сделать вывод об адекватности модели и оценить степень влияния помех различной природы в заданном районе, в том числе и создаваемых постановщиками помех нарушителя. Показана целесообразность сокращения времени анализа параметров сигналов, передаваемых от подвижной к базовой станции, а также необходимость повышения помехозащищенности сигналов контроля вхождения в связь, уровня и качества принимаемого сигнала. **Практическая значимость:** Данная модель может быть использована для оценки и анализа эффективности функционирования каналов управления реальных систем подвижной радиосвязи стандарта GSM-R.

Ключевые слова: Радиосвязь, GSM-R, канал связи, канал управления, кадр, стандарт связи, модель.

Актуальность

На основе стандарта связи GSM был разработан стандарт связи, применяемый на железных дорогах, — GSM-R. Стандарт GSM-R разработан для создания сотовых систем подвижной связи (ССПС) в следующих частотных диапазонах: 890–915 МГц — для передачи подвижными стан-

циями; 935–960 МГц — для передачи базовыми станциями [1].

Каждая из полос, выделенных для сетей GSM, разделяется на частотные каналы. Разнос каналов составляет 200 кГц, что позволяет организовать в сетях GSM 124 частотных канала. Каждая частотная несущая содержит 8 физи-

ческих каналов, размещенных в 8 временных окнах в пределах TDMA кадра и в последовательности кадров. Каждый физический канал использует одно и то же временное окно в каждом временном TDMA кадре. До формирования физического канала сообщения и данные, представленные в цифровой форме, группируются и объединяются в логические каналы двух типов: каналы связи — для передачи кодированной речи или данных (ТСН); каналы управления — для передачи сигналов управления и синхронизации (ССН) [2]. Каналы управления (ССН) обеспечивают фактическое соединение между абонентами — установление сигнала и непрерывность соединения.

Каналы управления обеспечивают предоставление подвижным пользователям следующие услуги: коммутация цифровых каналов ПС; обслуживание всех типов вызовов как к подвижным абонентам, так и от них в объеме услуг, предоставляемых каналом; управление радиоресурсами сети в процессе вызова; отработка протоколов сигнализации с подсистемой базовых станций (БС); регистрация и определение местоположения ПС; обеспечение непрерывности связи между подвижными абонентами как при перемещении подвижной станции из одной сети в другую, так и функции роуминга; маршрутизация входящих вызовов и обмен информацией с регистрами постоянной приписки; управление передачей данных между ПС и стационарными абонентами с использованием сигналов тонального набора, передача коротких сообщений; перенос параметров шифрования; обработка многочастотной сигнализации и т. д.

Различают четыре вида каналов управления:

- BCCH (Broadcast Control Channels) — каналы передачи сигналов управления, такие как: FCCH — канал подстройки частоты несущей,

SCH — канал временной синхронизации и опознавания, BCCH — канал управления передачей;

- CCCH (Common Control Channels) — общие каналы управления, такие как: PCCH — канал вызова, RACH — канал параллельного доступа, AGCH — канал разрешенного доступа;

- SDCCCH (Stand-alone Dedicated Control Channels) — индивидуальные каналы управления, такие как: SDCCCH/4 — индивидуальный канал управления, состоящий из 4 подканалов, SDCCCH/8 — индивидуальный канал, состоящий из 8 подканалов;

- ACCH (Associated Control Channels) — совмещенные каналы управления, такие как: FACCH — быстрый совмещенный канал (эстафетная передача), SACCH — медленный совмещенный канал управления [2].

Из указанных каналов управления наиболее значимыми являются (Broadcast Control Channels) и CCCH (Common Control Channels).

Так как данные каналы подвержены воздействию как случайных, так и преднамеренных помех, то оценка качества его функционирования представляет значительный научный и практический интерес.

В работе [3] описывается методика оценки качества услуг передачи речи и видеотелефонии. При этом оценка качества сети проводится по среднему времени установления соединения.

В работе [4] анализируется качество передачи речи, в сети GSM-R, в зависимости от типа применяемого речевого кодека и уровня битовых ошибок в канале связи, на который влияние оказывают различного рода внутрисистемные и межсистемные помехи. На основе полученных данных производится частотно-территориальное планирование сети GSM-R.

В работе [5] представлен анализ основных методов математического моделирования про-

цесса доведения сообщений по низкоскоростным каналам связи с протоколами, поддерживающими процедуру «скользящее окно». На основе выявленных закономерностей процессов передачи информации описан подход по выявлению вероятностно-временных характеристик информационного обмена по каналам сети радиосвязи между смежными узлами коммутации. Применение операторного метода математического моделирования протоколов управления логическим каналом передачи данных позволяет получить вероятностно-временные характеристики процесса доведения многопакетных сообщений.

Представленные работы позволяют оценить качество передачи отдельных команд управления, но не учитывают их взаимосвязи при установлении и поддержании соединения в процессе сеанса связи в условиях деструктивных воздействий нарушителя, а значит, актуализируется задача расчета времени успешной передачи данных в канале управления.

В настоящей статье предлагается модель, основанная на представлении процесса функционирования каналов ВССН в виде стохастической сети с последующим определением функций распределения времени успешного установления соединения между подвижной и базовой станцией.

Анализ алгоритма установления соединений в GSM-R и функционирования каналов управления позволили сформулировать следующую задачу.

Постановка задачи

Пусть имеется совмещенный канал управления, предназначенный для передачи информации, необходимой подвижной станции (ПС), для обеспечения фактического установления соединения и непрерывности соединения между абонентами. Положим, что в некоторый

момент времени ПС А инициировала установление соединения с ПС Б. В этом случае ПС А осуществляет прием кадров по каналам, обеспечивающим вхождение в связь (КВС) в течение некоторого времени t_v с функцией распределения $B(t)$. При этом с вероятностью P_1 кадр КВС будет принят правильно с первого раза. В противном случае с вероятностью $(1 - P_1)$ кадр КВС будет передавать кадр повторно.

Если кадр КВС принят правильно, то от ПС А к обслуживающей его базовой станции (БС) передаются вычисленные значения параметров: уровень принимаемого сигнала (УПС), качество принимаемого сигнала (КПС) и дистанция, которые с вероятностью P_2 принимаются БС с заданным качеством. С вероятностью $(1 - P_2)$ один из переданных ПС сигналов не будет принят БС с требуемым качеством, тогда в течение некоторого времени t_u с функцией распределения $U(t)$ осуществляется управление уровнем излучаемой мощности (УИМ) ПС.

При этом с вероятностью P_3 сигналы УПС, КПС и дистанции передают повторно. В случае дефицита бюджета мощности с вероятностью $(1 - P_3)$ пользователь ПС А получает отказ от этой БС и начинает прием кадров КВС от другой БС в течение некоторого времени t_r с функцией распределения $R(t)$, и описанный процесс возобновляется. Процесс установления связи по каналу управления с пользователем ПС Б аналогичен вышеописанному.

Требуется определить среднее время и функцию распределения времени успешного установления соединения.

Решение

Для решения поставленной задачи представим процесс функционирования канала управления в виде стохастической сети (рис. 1).

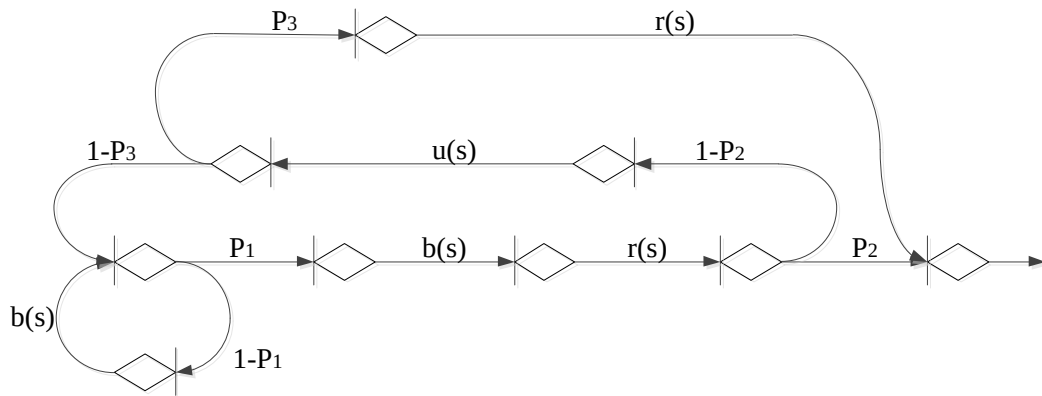


Рис. 1. Стохастическая сеть канала управления системы GSM-R:

P_1 — вероятность успешного приема кадра КВС; P_2 — вероятность успешного приема УПС, КПС и дистанции; P_3 — вероятность успешного приема БС сигналов УПС, КПС и дистанции после регулирования мощности; $b(s)$, $r(s)$ и $u(s)$ — преобразования Лапласа — Стильтьеса функции распределения соответствующих случайных величин, т. е.:

$$b(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} d[B(t)]; r(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} d[R(t)]; u(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} d[U(t)]. \quad (1)$$

Используя уравнения топологического преобразования стохастических сетей, определим эквивалентную функцию стохастической сети:

$$h(s) = \frac{p_1 \frac{b(s)}{b(s)+s} \frac{r(s)}{r(s)+s} \left[p_2 + (1-p_2) \frac{u(s)}{u(s)+s} p_3 \frac{r(s)}{r(s)+s} \right]}{1 - (1-p_1) \frac{b(s)}{b(s)+s} - (1-p_2) \frac{u(s)}{u(s)+s} (1-p_3) p_1 \frac{b(s)}{b(s)+s} \frac{r(s)}{r(s)+s}}. \quad (2)$$

Полагая, что время передачи соответствующих команд имеет экспоненциальное распределение, представим выражение (2) в виде суммы вычетов:

$$h(s) = \sum_{i=0}^3 \frac{[(bp_1r) \left[(s_i^2)^2 A1 + s_i B1 + C1 \right]]}{(s_i)^3 4 + (s_i)^2 3A2 + (s_i) 2B2 + C2} \cdot \left(\frac{1}{s - s_i} \right), \quad (3)$$

где $A1 = p_2$; $A2 = 2r + u + bp_1$; $B1 = p_2r + p_2u$; $B2 = r^2 + 2ru + 2bp_1r + bp_1u$;

$C1 = p_2ru + p_3ru - p_2p_3ru$; $C2 = r^2u + bp_1r^2 + bp_1ru + bp_1p_2ru + bp_1p_3ru - bp_1p_2p_3ru$;

$D2 = bp_1p_2r^2u + bp_1p_3r^2u - bp_1p_2p_3r^2u$ — коэффициенты разложения многочленов числителя и знаменателя эквивалентной функции (2).

Осуществляя переход в пространство оригиналов, получим функцию плотности распределения вероятностей:

$$h(t) = \sum_{i=0}^3 \frac{[(bp_1r) \left[(s_i^2)^2 A1 + s_i B1 + C1 \right]]}{(s_i)^3 4 + (s_i)^2 3A2 + (s_i) 2B2 + C2} \cdot e^{s_i t}. \quad (4)$$

Интегрируя выражение (4), определим функцию распределения времени установления соединения между ПС и БС:

$$H(t) = \sum_{i=0}^3 \frac{[bp1r[(s_i)^2 A1 + s_i B1 + C1]](1 - \exp(-ts_i))}{[(s_i)^3 4 + (s_i)^2 3A2 + (s_i) 2B2 + C2](-s_i)}, \quad (5)$$

Кроме того, с использованием (4) можно определить и среднее время установления соединения:

$$T = \int_0^{\infty} t h(t) dt = \sum_{i=0}^3 \frac{[bp1r[(s_i)^2 A1 + s_i B1 + C1]]}{[(s_i)^3 4 + (s_i)^2 3A2 + (s_i) 2B2 + C2](-s_i)^2}. \quad (6)$$

Таким образом, поставленная задача решена.

Пример расчета:

По полученным соотношениям проведены расчеты при следующих исходных данных:

- длительность 51-кадрового мультикадра составляла 0,235385 с;
- длительность управления уровнем излучаемой мощности БС $t_u = 0,2$ с;
- время приема БС значений параметров УПС, КПС и Д $t_r = 1,5$ с;
- значение вероятностей: $P_1 = P_2 = P_3 = 0,95$.

Правомерность выбранных данных подтверждается соответствием временных параметров реально действующим стандартам.

Результаты моделирования представлены в виде графиков на рис. 2–6.

Указанным исходным данным соответствуют кривые 2 на рис. 2–6. Кривые 1 и 3 (рис. 2) соответствуют значениям t_r , равным 1,0 и 2,0 с соответственно. Значительное увеличение вероятности успешного установления соединения при

уменьшении времени анализа и передачи сигналов УПС, КПС и ДИСТАНЦИИ t_r показывает на целесообразность сокращения времени анализа параметров, передаваемых от ПС к БС, а также длительности передачи данных сигналов. Это может быть достигнуто за счет расширения спектра передаваемых сигналов.

Сравнение кривых 1 и 3 (рис. 3), соответствующих значениям P_1 , равным 0,5 и 0,95, показало, что при увеличении P_1 вероятность успешного установления соединения также несущественно увеличивается. Что обусловливается малой длительностью 51-кадрового мультикадра и высокой вероятностью наличия в любой момент времени доступной подвижному пользователю базовой станции.

На рис. 4 кривые 1 и 3 соответствуют значениям P_2 , равным 0,5 и 0,95 соответственно. Здесь обращает на себя внимание существенная зависимость вероятности успешного установления соединения от значения вероятности успешного приема сигналов УПС, КПС и дистанции (P_2), что подтверждает необходимость увеличения помехозащищенности передаваемых сигналов УПС, КПС и дистанции при неизменной скорости их передачи.

Незначительная зависимость вероятности успешного установления соединения от значений времени и вероятности успешного приема БС сигналов УПС, КПС и дистанции после регулирования мощности (рис. 5, 6) показывают, что при высокой помехоустойчивости этих сигналов вероятность включения алгоритма управления мощностью небольшая. Однако в условиях сильных помех (даже с учетом использования помехоустойчивого кодирования) следует ожидать значения P_1 и P_2 на уровне 0,6–0,7 и, соответственно, увеличение веса времени и вероятности успешного управления мощностью, что определяет одно из направлений борьбы с сильными радиопомехами различной природы.

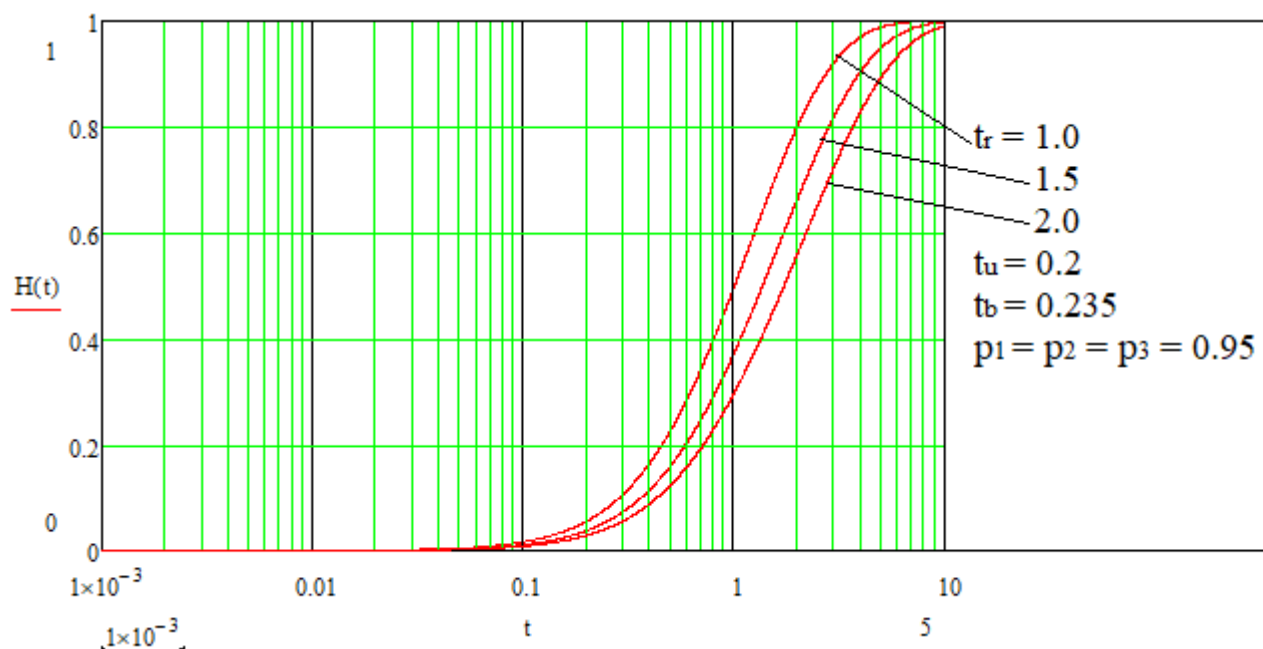


Рис. 2

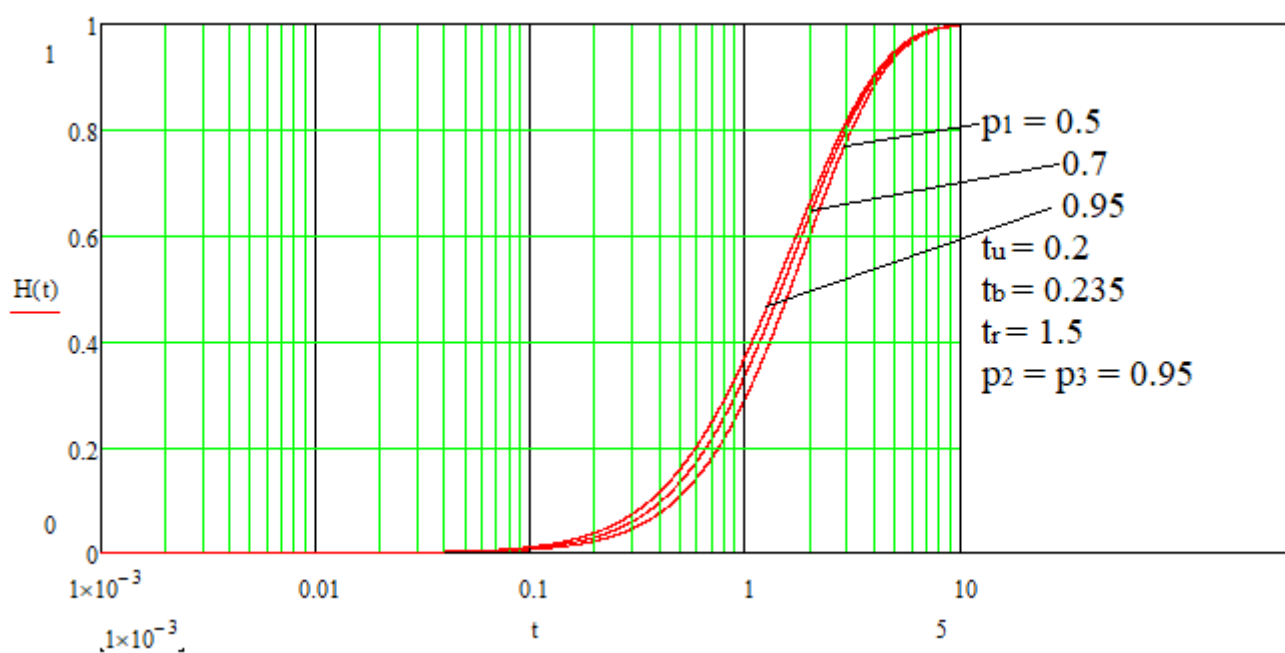


Рис. 3

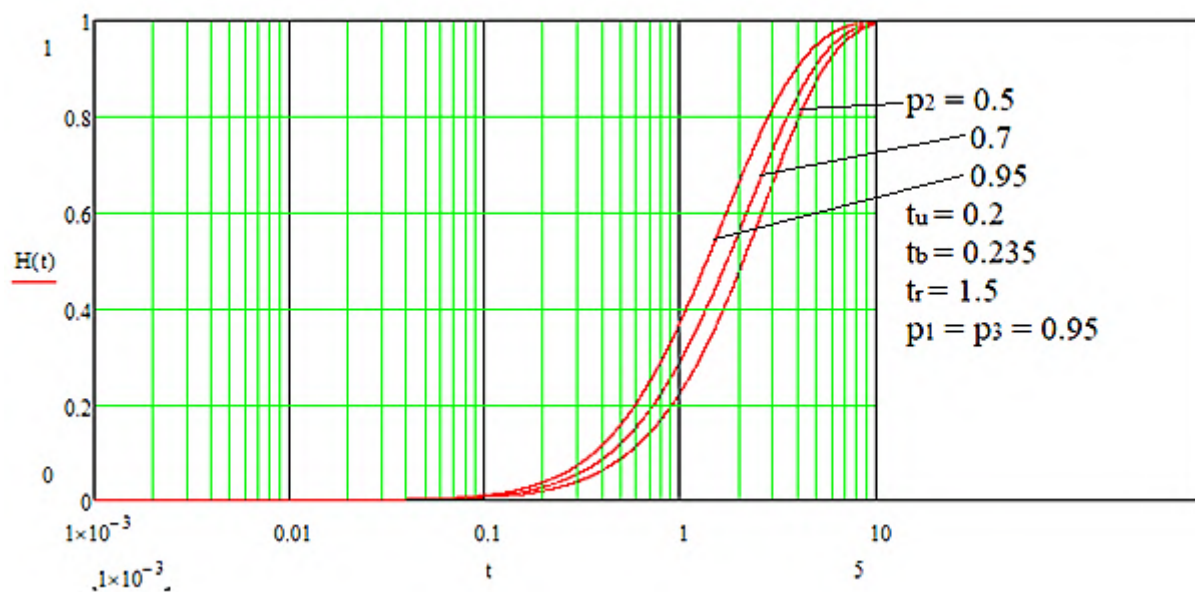


Рис. 4

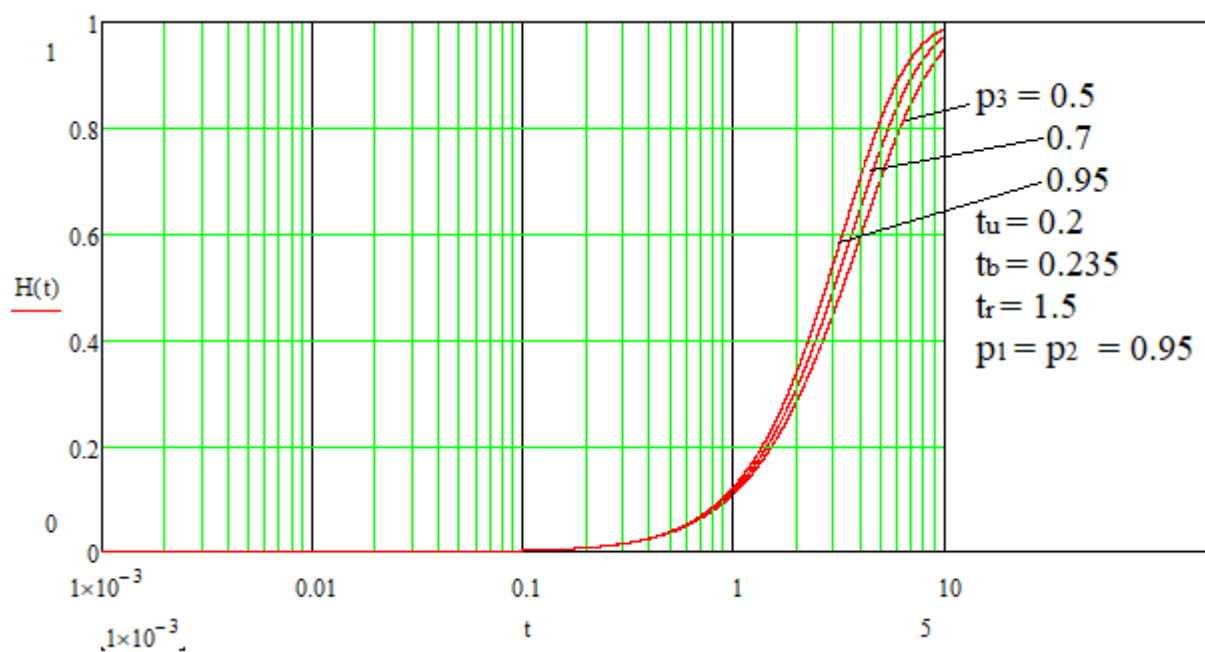


Рис. 5

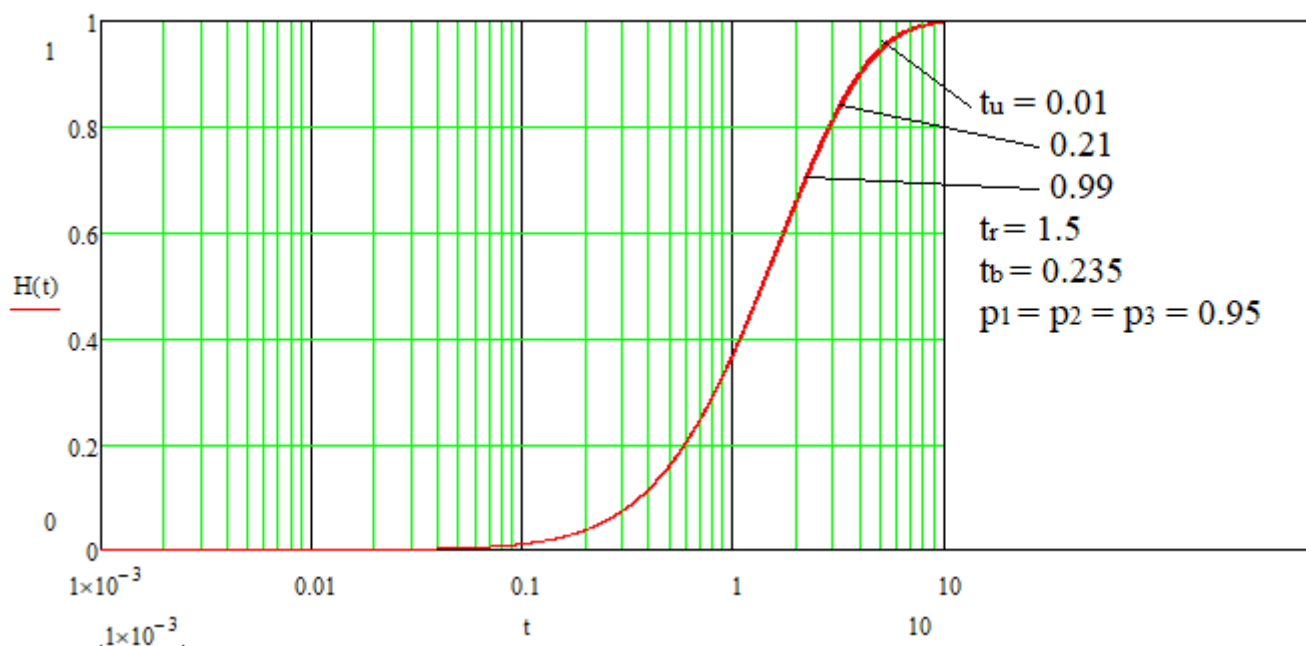


Рис. 6

Выводы

1. Таким образом, разработана математическая модель процесса функционирования совмещенных КУ, обеспечивающих установление и поддержание установленного соединения существующей системы подвижной радиосвязи GSM-R в условиях воздействия помех, а также приведены основные результаты моделирования.

2. Анализ результатов моделирования показал, что модель адекватно отображает взаимосвязь между параметрами КУ и характеристиками условий функционирования системы подвижной радиосвязи, результаты не противоречат логике исследуемых процессов.

3. Следовательно, разработанная модель может быть использована для оценки и анализа эффективности функционирования каналов управления реальных систем подвижной радиосвязи.

Библиографический список

1. Громаков Ю. А. Организация физических и логических каналов в стандарте GSM / Ю. А. Громаков // Электросвязь. — 1993. — № 10. — С. 9–12.

2. Громаков Ю. А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи / Ю. А. Громаков // Мобильные Телесистемы; Эко-Трендз. — М., 1997. — С. 230.

3. Гаврилов А. В. Оценка качества обслуживания в сетях UMTS/GSM / А. В. Гаврилов, А. М. Морозов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. — 2011. — Вып. 11. — С. 276–279.

4. Саенко А. С. Экспериментальное исследование влияния внутрисистемных помех по основному каналу приема на качество связи стандарта GSM-R / А. С. Саенко // Збірник наукових праць ДонІЗТ. — 2008. — № 14.

5. Потапов С. Е. Операторный метод математического моделирования протоколов управления логическим каналом передачи данных / С. Е. Потапов // Известия Института инженерной физики. — 2019. — № 4(54). — С. 65–72.

Дата поступления: 15.09.2022

Решение о публикации: 18.11.2022

Контактная информация:

БОЛДИНОВ Алексей Максимович — аспирант;
23boldinov98@gmail.com

ПРИВАЛОВ Андрей Андреевич — д-р воен. наук,
проф.; aprivalov@inbox.ru

Mathematical Model for Control Channel of GSM-R Radiocommunication Standard

A. M. Boldinov, A. A. Privalov

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

For citation: Boldinov A. M., Privalov A. A. Mathematical Model for Control Channel of GSM-R Radiocommunication Standard // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 743–751. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-743-751

Summary

Purpose: To develop a model for the evaluation and analysis of control logical channels (CC) performance quality of GSM-R radiocommunication standard. **Methods:** Performance process of shared control channel is presented in the form of a stochastic network with further obtaining equivalent function, average time and the function of distributing the time of information transfer in data transmission channel. **Results:** Mathematical model of shared CC performance process has been developed, corresponding to the algorithm of establishing connection of a mobile user with a network base station. The modeling results allow to conclude on the model adequacy and to assess the degree of various kind interference impact in a given area, including those created by violator's jammers. The feasibility of reducing analysis time of the parameters of signals, transmitted from a mobile to base station, as well as the need to increase the noise immunity of signals for the control of entry into communication, received signal level and quality are shown. **Practical significance:** This model can be used to evaluate and analyze performance efficiency of control channels of GSM-R standard mobile radiocommunication real systems.

Keywords: Radiocommunication, GSM-R, communication channel, control channel, frame, communication standard, model.

References

1. Gromakov Yu. A. Organizatsiya fizicheskikh i logicheskikh kanalov v standarte GSM [Organization of physical and logical channels in the GSM standard]. *Elektrosvyaz'* [Telecommunication]. 1993, I. 10, pp. 9–12. (In Russian)
2. Gromakov Yu. A. Standarty i sistemy podvizhnoy radiosvyazi [Mobile Radio Standards and Systems]. *Mobil'nye Telesistemy; Eko-Trendz* [Mobile TeleSystems; Eco-Trends]. Moscow, 1997, p. 230. (In Russian)
3. Gavrilov A. V., Morozov A. M. Quality of Service Assessment in UMTS/GSM Networks [Quality of Service Assessment in UMTS/GSM Networks]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems]. 2011, I. 11, pp. 276–279. (In Russian)
4. Saenko A. S. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya vnutrisistemnykh pomekh po osnovnomu kanalu priema na

kachestvo svyazi standarta GSM-R [Experimental study of the effect of intrasystem interference on the main reception channel on the quality of GSM-R communication]. *Zhurnal naukovikh prats' DonIZT* [Collection of science practices DonIZT]. 2008, I. 14. (In Russian)

5. Potapov S. E. Operatornyy metod matematicheskogo modelirovaniya protokolov upravleniya logicheskimi kanalom peredachi dannykh [Operator's method of mathematical modeling of logical data channel control protocols]. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki* [Proceedings of the Institute of Engineering Physics]. 2019, I. 4(54), pp. 65–72. (In Russian)

Received: September 15, 2022

Accepted: November 18, 2022

Author's information:

Alexey M. BOLDINOV — Postgraduate Student;
23boldinov98@gmail.com

Andrey A. PRIVALOV — Doctor of Military Sciences,
Professor; aprivalov@inbox.ru

УДК 625.032.37

Расчет кривой сцепления для проектирования противоюзových и противобоксовочных систем

М. Ю. Изварин¹, В. Е. Андреев²

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

²ОАО «РЖД», Москва, Новая Басманная ул., 2

Для цитирования: Изварин М. Ю., Андреев В. Е. Расчет кривой сцепления для проектирования противоюзových и противобоксовочных систем // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 752–762. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-752-762

Аннотация

Цель: Создание математического аппарата для расчета кривой сцепления при проектировании противоюзových и противобоксовочных устройств. Необходимо получить формулу, пригодную для расчета зависимости коэффициента сцепления от абсолютной и относительной скоростей проскальзывания колесных пар по рельсам и скорости движения ЭПС. **Методы:** Анализ результатов испытаний различных типов ЭПС по данным из открытых источников и полученных в результате этих испытаний характеристик сцепления с использованием методов математической статистики. **Результаты:** В результате работ удалось представить зависимость для расчета коэффициента сцепления в виде «сшивки» двух функций. **Практическая значимость:** Возможность использования результатов работы при проектировании противоюзово-противобоксовочного устройства УПЗ-М.

Ключевые слова: Электрический подвижной состав, сила сцепления, скольжение колесных пар, юз, боксование, противоюзово-противобоксовочное устройство.

В настоящее время в связи с увеличением мощности электровозов и весов поездов все чаще в режиме тяги локомотив работает на грани срыва сцепления, особенно на участках со сложным профилем. Поэтому все современные электровозы оснащаются противобоксовочными системами, которые, обладая высокой точностью, позволяют максимально реализовать сцепные свойства. Новые электровозы, оборудованные асинхронными тяговыми электродвигателями (ТЭД), имеют микропроцессорные системы

управления, которые могут отслеживать закон сцепления в режиме реального времени, в ходе регулирования момента на валу в тяге или в торможении.

Однако традиционная противоюзово-противобоксовочная система все равно необходима для защиты от юза в режиме пневматического торможения. Кроме того, в эксплуатации еще много электровозов, как пассажирских, так и грузовых, которые требуют модернизации, так как их конструкция позволяет продлить срок службы еще на

15–20 лет, а альтернативы зачастую нет. К таким машинам относятся пассажирские электровозы постоянного тока ЧС200, ЧС7, переменного тока ЧС8, грузовые ВЛ11 и ВЛ15. Такие электровозы при выпуске с завода были оборудованы простейшей релейной системой защиты от боксования и юза, а пассажирские — еще и электронной аналоговой. После длительной эксплуатации аналоговые электронные противоюзные системы вышли из строя и не используются, поэтому стоит также вопрос о модернизации.

Известно, что сила сцепления в зависимости от скорости проскальзывания колеса по рельсу зависит нелинейно. От положения данной кривой зависят параметры современных точных противоюзно-противобоксовочных систем, позволяющие полноценно реализовывать силу тяги и торможения по условиям сцепления. Однако при этом встает вопрос о получении функции сцепления.

Когда речь идет о реализации сил сцепления, обычно вращающий момент представляется парой сил F_k , одна из которых приложена в месте касания колеса и рельса, а вторая — в точке сцепления буксового узла (рис. 1).

Предполагается, что колесо радиусом R катится по рельсу с линейной скоростью v_3 , при этом вращаясь с угловой скоростью ω . На колесо действует вертикальная сила P , создающая за счет деформаций пятно контакта в точке касания с рельсом. Вращающий момент M_k реализуется парой сил F_k , численно равной силе $F_{сц}$, возникающей за счет взаимодействия частиц металла колеса и рельса в пятне контакта. Сила $F_{сц}$ является внешней для системы «колесо — рельс» и имеет определенное предельное значение, определяющееся физикой контактного взаимодействия. Соответственно, сила F_k не может превышать величину $F_{сц}$ и через элементы механической части (поводки) от точки «0» передается на конструкцию электровоза и вызывает его ускорение. Если ТЭД создаст момент, превышаю-

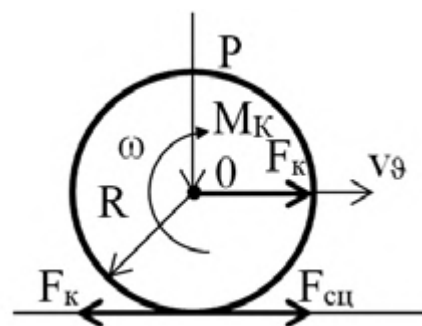


Рис. 1. Реализация силы сцепления

щий величину предельной силы $F_{сц}$, то величина F_k не станет больше, а разовьется боксование и энергия, вырабатываемая ТЭД, будет переходить не в механическую энергию движения поезда, а в кинетическую энергию вращающихся частей.

Одним из основных понятий теории тяги является «коэффициент сцепления», представляющий собой отношение:

$$\Psi = \frac{F_k}{P}, \quad (1)$$

где P — вес подвижного состава, приходящийся на одно колесо;

F_k — сила тяги, реализуемая колесом, численно равная $F_{сц}$.

Чаще в качестве $F_{сц}$ принимают силу, реализуемую двумя колесами (осью), а в качестве P используют нагрузку на ось. Коэффициент сцепления может быть как мгновенным, реализуемым в определенный момент времени в конкретных условиях, так и средним (среднестатистическим), определяемым по эмпирическим формулам.

При реализации силы сцепления скорость движения подвижного состава и линейная скорость по кругу катания никогда не равны, кроме случая движения на выбеге. При реализации же силы тяги или торможения всегда имеется разница линейных скоростей, представляющая собой скольжение и обозначаемая $\Delta v_{ск}$:

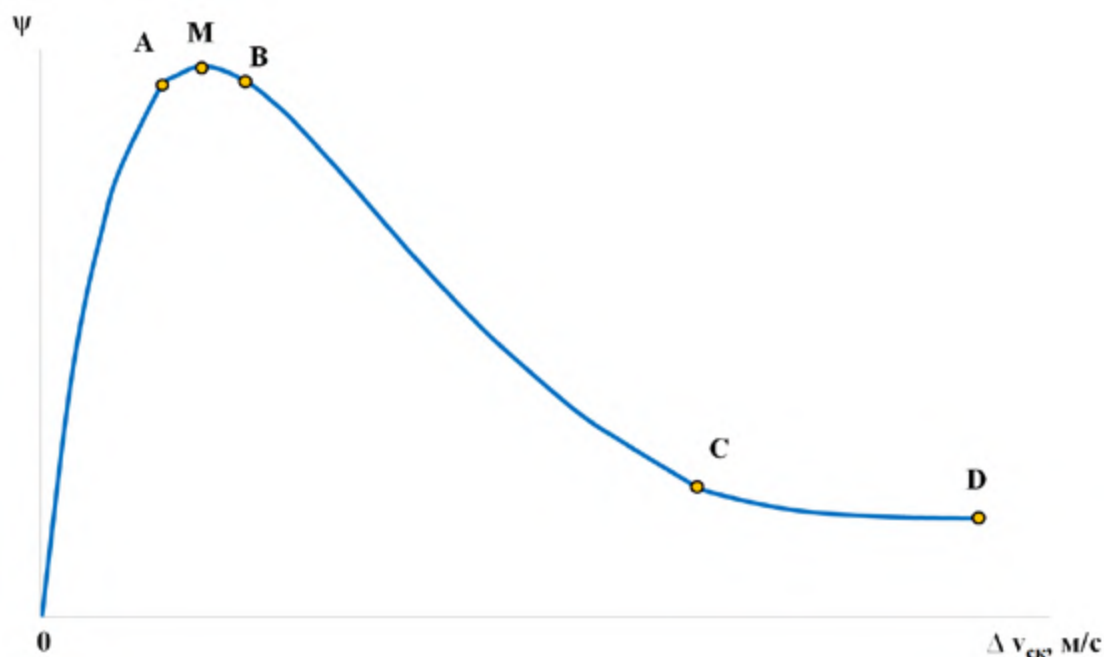


Рис. 2. Кривая сцепления для чистых и сухих условий контакта

$$\Delta v_{(ск)} = v_{\vartheta} - v = v_{\vartheta} - R, \quad (2)$$

где v_{ϑ} — скорость движения подвижного состава;

$$v_{ск} = \frac{\Delta v}{v_{\vartheta}} = \frac{v_{\vartheta} - v}{v_{\vartheta}} = 1 - \frac{v}{v_{\vartheta}}. \quad (3)$$

Для расчета силы сцепления обычно определяют «функцию сцепления» или «кривую сцепления», представляющую собой зависимость величины Ψ от относительной или абсолютной скорости проскальзывания.

Приблизительная зависимость коэффициента сцепления от величины проскальзывания представлена в большом количестве работ [1–13], внешний вид кривой изображен на рис. 2.

В ряде работ [4–8] и других на кривой сцепления выделяются характерные участки и точки:

- участок нарастания коэффициента сцепления (отрезок [0A]);
- участок, на котором реализуется максимально возможный коэффициент сцепления, предшествующий срыву сцепления (отрезок [AM]);

– точка реализации максимального значения коэффициента сцепления (точка M) [14];

– нестабильный участок с небольшим значением скорости скольжения при срыве сцепления (отрезок [MB]);

– нестабильный участок с резко падающим значением коэффициента сцепления (отрезок [BC]);

– стабильный участок с примерно постоянным значением коэффициента сцепления и значительной скоростью проскальзывания (отрезок [CD]).

В то же время для резко ухудшающихся условий сцепления кривая носит принципиально иной характер и имеет такой вид, как представлен на рис. 3.

В данном случае кривая также имеет экстремум, однако он не так явно выражен. На отрезке [0M] наблюдается нарастание коэффициента сцепления, на участке [MD] — небольшое снижение.

Скорость проскальзывания, определенная по формуле (2), в литературе именуется как крип (или псевдоскольжение) — на участке [0M], на

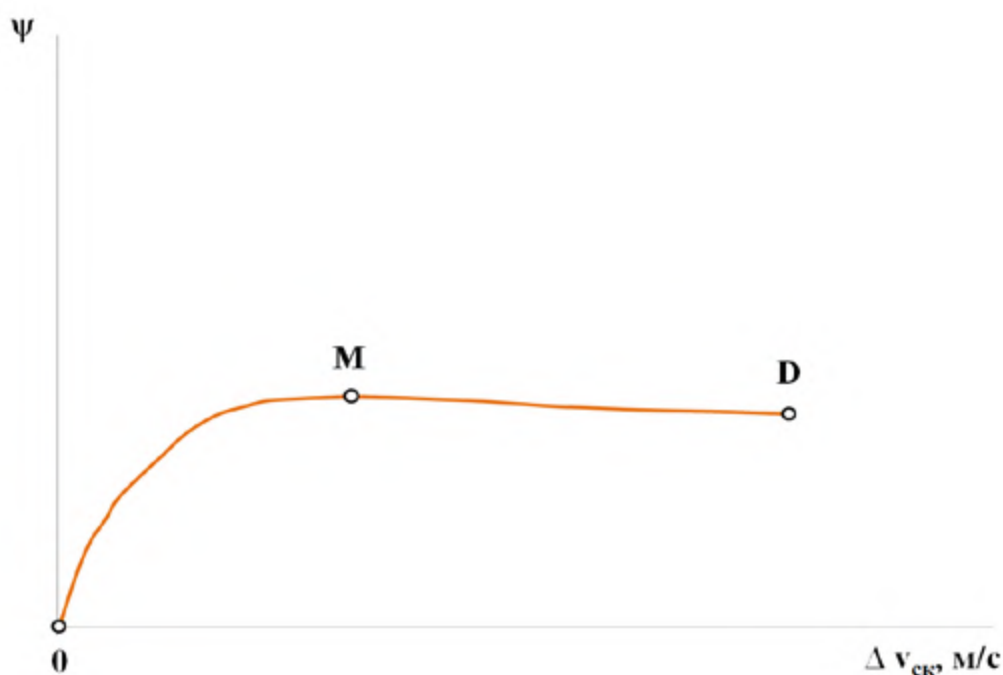


Рис. 3. Кривая сцепления для влажного контакта колесо — рельс

участке [MD] — скорость скольжения, или проскальзывания. Тем не менее в связи с тем, что устоявшейся терминологии в вопросе, что именовать крипом, в настоящее время не сложилось, понятие «крип» в большинстве случаев относится только к кривой на рис. 2.

При создании противоюзовых систем задачей работы являются не теоретические изыскания в области сцепления колеса и рельса, а на основании выполненных отечественных работ по созданию математического аппарата для аналити-

ческого описания кривой сцепления, для последующего использования при моделировании тяги (торможения). Кроме этого, данная математическая функция может быть использована и непосредственно в противоюзовых устройствах. Для того чтобы получить функцию кривой сцепления, можно использовать опытные данные либо определенные теоретически [14, 15].

В настоящее время в инженерной практике имеется несколько способов определения положения кривой сцепления. К таковым относятся:



Наиболее точные данные с точки зрения измерений получаются на катковых станциях, однако при этом почти всегда геометрия контакта отличается от электрического подвижного состава (эпс) на реальном пути. На действующем эпс провести испытания в режиме скольжения крайне затратно, так как надо устанавливать в механическую часть систему измерений тяговых (тормозных) усилий отдельных осей. Затраты на создание подобных установок и проведение испытаний могут превысить эффект от повышения точности противоюзных систем.

Теоретические методы позволяют с достаточной точностью определить положение кривой сцепления, хотя эти методы более справедливы для условий «чистого» контакта.

Считается, что впервые теоретическое обоснование было получено в работе Дж. Калкера (J. J. Kalker) On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction («О катящемся контакте двух упругих тел при наличии сухого трения») [2]. Калкер обобщил теорию на случай качения продольного крива, поперечного крива и малого поворотного крива [16]. Однако расчет подобным методом представлял значительную сложность. Поэтому был разработан алгоритм FASTSIM решения касательной контактной задачи, предложенный Калкером в 70-х годах прошлого века, нашедший широкое применение в программах компьютерного моделирования динамики железнодорожных экипажей [17]. В то же время данный способ не позволяет получить единого выражения для кривой сцепления и справедлив только для случая крива, исключая зону больших скоростей скольжения. Метод, позволяющий получить теоретическое выражение для силы тяги (торможения) по сцеплению как для кривов, так и для больших скольжений, встречается в публикациях О. Полоха (Oldrich Polach). Общий алгоритм в данном случае выражается следующей последовательностью действий:

1. Определяются нарастающая и спадающая части кривой сцепления от величины абсолютного или относительного скольжения либо эмпирическим путем (т. е. через проведение опыта) для какого-либо типа ЭПС, либо определяется только нарастающая часть кривой с использованием алгоритма FASTSIM.

2. Вычисляется приближенная нарастающая и спадающая части с использованием предложенных автором аналитических выражений.

3. Выполняется корректировка кривой с использованием корректирующих коэффициентов.

Для расчета нарастающей части используется выражение, приведенное в [4]:

$$F = \frac{2P\mu}{\pi} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{1 + (\varepsilon)^2} + \arctg \varepsilon \right), \quad (4)$$

где F — сила сцепления;

P — нагрузка на колесо;

μ — коэффициент трения;

ε — градиент касательных напряжений в области сцепления.

При этом величину ε предлагается определять по формулам, приведенным в [3, 4] как:

$$\varepsilon = \frac{2}{3} \cdot \frac{C \cdot \pi a^2 b}{P \cdot \mu} \cdot s, \quad (5)$$

где C — коэффициент контактной эластичности;

a, b — геометрические размеры пятна контакта;

s — величина крива.

Величину крива можно определить из значений продольного и поперечного кривов:

$$s = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}. \quad (6)$$

Для упрощенной оценки Поперечным кривом можно пренебречь.

Из теории контакта двух цилиндрических поверхностей известно, что геометрическая

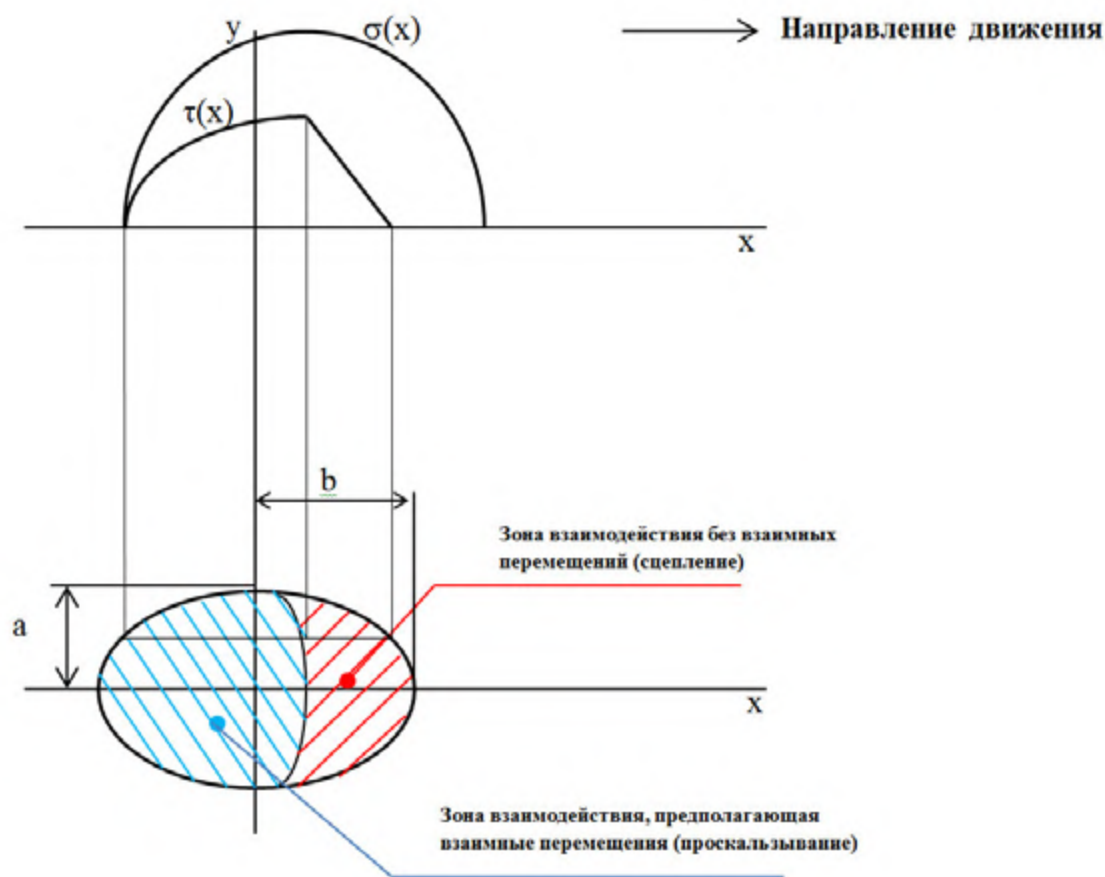


Рис. 4. Геометрия пятна контакта и распределение нормальных (σ) и тангенциальных (τ) напряжений в зоне контакта в соответствии с [3]

фигура пятна контакта представляет собой эллипс (рис. 4). Геометрическое положение эллипса определяется величинами его полуосей a и b .

На рис. 4 показано также и распределение нормальных и продольных касательных напряжений сдвига, создающих силы тяги и торможения [2, 4, 12].

Величины a и b можно определить по формулам, предложенным Герцем [18].

Спадающую ветвь кривой сцепления, характерную для больших значений скольжения, Полах предлагает определять как экспоненту [3, 4]:

$$\mu = \mu_0 [(1 - A)e^{-Bw} + A], \quad (7)$$

где μ_0 — условный коэффициент трения покоя в размерности коэффициента сцепления;

A — коэффициент, введенный О. Полахом.

Записав в другой форме, можно получить:

$$\mu_2 = \mu_0 (1 - A) e^{\frac{-v}{G_2}} + A, \quad (8)$$

где G_2 — «постоянная» снижения;

A — коэффициент, предложенный Полахом.

$$A = \frac{\mu_\infty}{\mu_0} \approx \frac{1}{K_\psi}, \quad (9)$$

где μ_∞ — установившийся коэффициент сцепления при большой скорости скольжения;

μ_0 — условный коэффициент сцепления («трения») покоя;

K_ψ — «кратность» коэффициента сцепления.

Таким образом, определив кратность коэффициента трения (сцепления), можно просто построить спадающую ветвь кривой сцепления.

Наряду с достоинствами такой метод имеет ряд недостатков:

1. Восходящая и нисходящая ветви определяются по разным формулам, что не дает возможность использовать их при программировании противоюзово-противобоксовочных устройств, а только при моделировании.

2. Геометрия контактного пятна зависит от степени износа колеса и рельса, что снижает точность расчета.

Задачей является создание математического аппарата, позволяющего описать всю кривую единой функцией, по возможности с меньшим количеством расчетов, что повысит скорость вычисления.

В данном случае коэффициент сцепления Ψ определяется как «сшивка» двух функций [9], в простейшем случае — как удвоенная сумма преобразованных нарастающей и спадающей частей, за вычетом установившегося значения:

$$\Psi_{(1)} = 2(\mu_1 + \mu_2 - \mu_0), \quad (10)$$

где μ_1 — восходящая составляющая кривой сцепления;

μ_2 — убывающая составляющая кривой сцепления;

μ_0 — условное сцепление («трение») покоя при $v = 0$.

Тогда нарастающая составляющая коэффициента сцепления определяется по упрощенной формуле:

$$\mu_1 = \mu_0 \cdot C_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{v}{G_1}}\right), \quad (11)$$

где C_1 — корректирующий коэффициент снижения условий сцепления;

v — абсолютная скорость скольжения, м/с;

G_1 — «постоянная скольжения» для роста.

Величина μ_2 определяется по формуле, предложенной О. Полахом в [3, 4]:

$$\mu_2 = \mu_0 (1 - A) e^{-\frac{v}{G_2}} + A. \quad (12)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \Psi(v) = & 2[\mu_0 C_1 \left(1 - e^{-\frac{v}{G_1}}\right) + \\ & + \left(\mu_0 (1 - A) \cdot e^{-\frac{v}{G_2}} + A\right) - \mu_0] \end{aligned} \quad (13)$$

или:

$$\begin{aligned} \Psi(v) = & 2\mu_0 [C_1 \left(1 - e^{-\frac{v}{G_1}}\right) + \\ & + (1 - A) \cdot e^{-\frac{v}{G_2}} + A - 1], \end{aligned} \quad (14)$$

где G_2 — «постоянная скольжения» для участка снижения.

Каким же образом определить «кратность» кривой сцепления и постоянные скольжения для нарастания и спадания кривой?

В данном случае, по мнению авторов, нет необходимости проводить эксперимент. В литературе имеется большое количество опубликованных экспериментальных данных по кривым сцепления. Достаточно определить основные параметры для сходного типа ЭПС* [10–12] из публикаций и принять их за основные. Результаты расчетов приведены на рис. 4.

На рис. 4. для примера нанесена кривая сцепления для электровоза железных дорог КНР HDX1. Видно, что на участке возрастания кривые практически полностью совпадают, на рабочей части участка снижения погрешность не превышает 5–6 %.

* Под «сходным типом» понимается ЭПС с тяговым приводом и системой тормозов, аналогичной той, для которой проектируется противоюзово-противобоксовочная система.

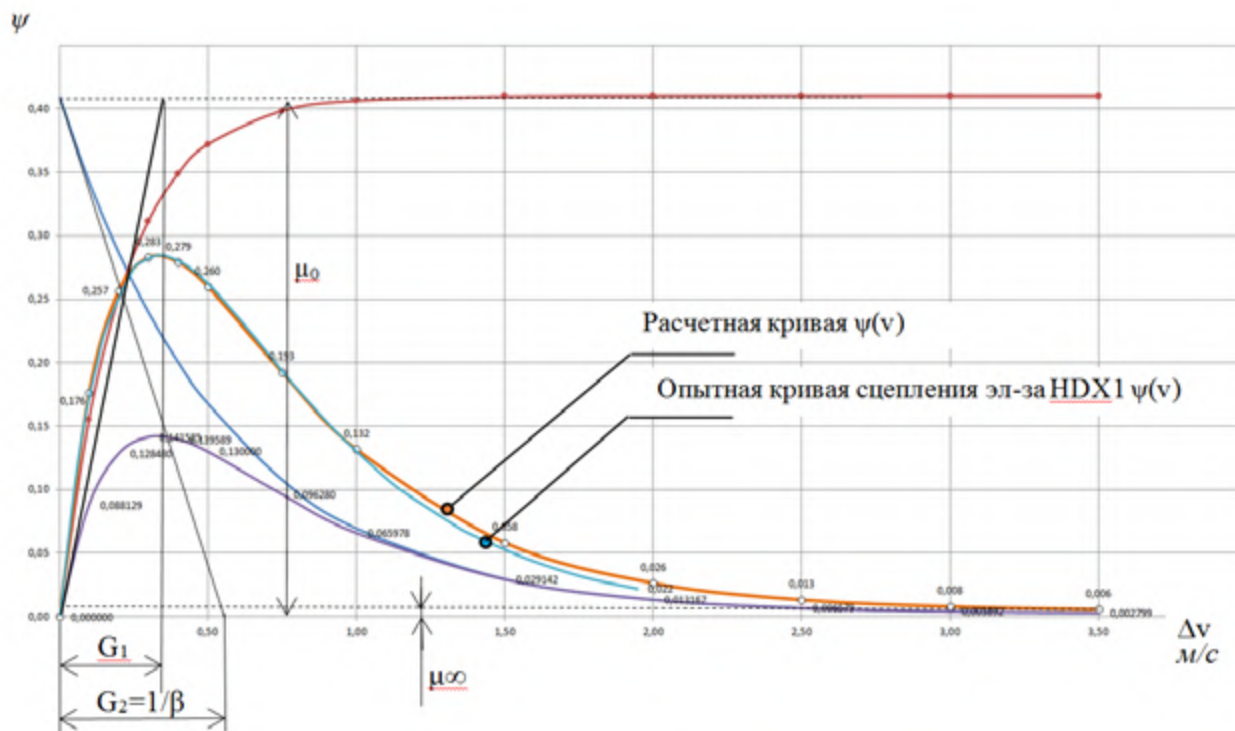


Рис. 4. Результаты расчета кривой сцепления

Известно, что кривая сцепления зависит не только от скорости скольжения или крипа, но и от поступательной скорости движения. Данная зависимость определяется эмпирически и представляется в виде формулы в «Правилах тяговых расчетов» (ПТР) [10, 18, 19]. Для пассажирских электровозов серии ЧС7 величина коэффициента сцепления определяется по формуле:

$$\psi_k(v) = 1,54 + \frac{51,5}{30 + v} - 0,001v, \quad (15)$$

где ψ_k — усредненное значение коэффициента сцепления по ПТР;

v — скорость движения электровоза, км/ч.

Так как в ПТР 2014 г. коэффициент сцепления является отношением силы тяги и массы, приходящейся на одну ось, а в данной работе он принят как отношение сил сцепления и силы нагрузки на ось, то для использования в работе необходимо учитывать ускорение свободного падения:

$$\psi_{пт}(v) = \left(1,54 + \frac{51,5}{30 + v} - 0,001v \right) / 9,81, \quad (16)$$

тогда

$$\psi(v, v) = 2 \frac{M_0^2}{\Psi_{пт}} \left[C_1 \left(1 - e^{\frac{-v}{G_1}} \right) + (1 - A) \cdot e^{\frac{-v}{G_2}} + A - 1 \right] \quad (17)$$

или

$$\psi(\Delta v, v) = 19,62 \frac{\mu_0^2}{\left(1,54 + \frac{51,5}{30 + v} - 0,001v \right)} \times \left[C_1 \left(1 - e^{\frac{-\Delta v}{G_1}} \right) + (1 - A) \cdot e^{\frac{-\Delta v}{G_2}} + A - 1 \right], \quad (18)$$

где $\Psi_{пт}$ — коэффициент сцепления по ПТР;

v — скорость движения, км/ч;

Δv — скорость скольжения, м/с.

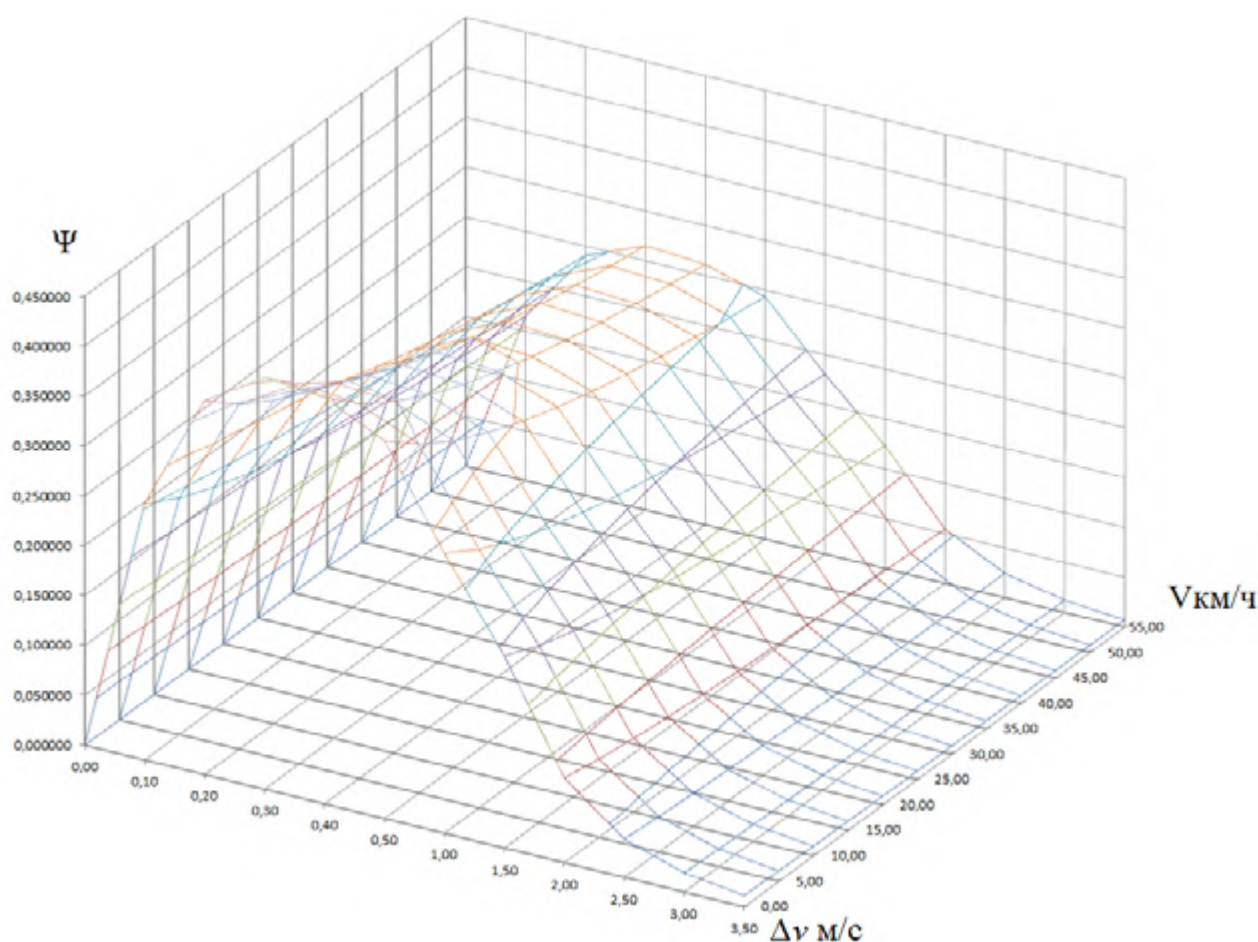


Рис. 5. Диаграмма зависимости коэффициента сцепления от скорости скольжения и скорости движения

Результаты расчета коэффициента сцепления в зависимости от скорости скольжения, крива и скорости движения представлены на рис. 5.

Таким образом, алгоритм создания трехмерного массива кривых сцепления состоит из 3 этапов:

1. Построение кривой сцепления для одной поступательной скорости по одной из методик, изложенной в [1–4], по опытным данным (наилучший вариант) либо по данным из открытых источников для ЭПС со сходными техническими параметрами.

2. Определение по данной кривой величин G_1 , $G_2 = 1/\beta$ и K_Ψ .

3. Определение величины A по [3, 4].

4. Подстановка в формулы (7) — (17) и расчет/моделирование.

Такой метод значительно проще и быстрее приведенных в [1–5, 14–19], при допустимой в инженерных расчетах точности.

Библиографический список

1. Kalker J. J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact / J. J. Kalker // *Vehicle System Dynamics*. — 1982. — Iss. 11. — Pp. 1–13.
2. Kalker J. J. On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction: thesise / J. J. Kalker. Delft, 1967.
3. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit / O. Polach // *Wear*. — 2005. — Iss. 258.
4. Polach O. Influence of locomotive tractive effort on the forces of between wheel and rail / O. Polach // *Vehicle*

System Dynamics Supplement. — 2001. — Iss. 35. — Pp. 7–22.

5. Wei K. Development of a slip and slide for the electric locomotive based on inverter controlled induction motors / K. Wei, J. Zhao, X. You et al. // 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and application. — 2009.

6. Matsumoto Y. Novel Re-adhesion Control for Train Traction System of the Shinkansen with the Estimation of Wheel-to-Rail Adhesive Force / Y. Matsumoto, N. Eguchi, A. Kawamura // Proc. of IEEE. IECON. — 2001. — Pp. 1207–1212.

7. Barna G. Simulation model of wheel slip and slide protection systems for rail vehicles / G. Barna, M. Lewandowski // Czasopismo Techniczne. Elektrotechnika Zeszyt. — 2016. — Iss. 1–E(2). — Pp. 3–15.

8. He J. H. An overview on wheel-rail adhesion utilization of heavy-haul locomotive (in Chinese) / J. H. He, C. F. Zhang // Journal of the China Railway Society. — 2018. — Vol. 40. — Iss. 9. — Pp. 30–39.

9. Киреева Н. В. Исследование аппроксимации функций распределения с применением аппарата «сшитых» функций / Н. В. Киреева, Л. Р. Чупахина // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2016. — № 5–1. — С. 17–20.

10. Правила тяговых расчетов для поездной работы. — М.: ОАО «Российские железные дороги», 2014. — 516 с.

11. Исаев И. П. Проблемы сцепления колес локомотива с рельсами / И. П. Исаев, Ю. М. Лужнов. — М.: Машиностроение, 1985. — 238 с.

12. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. — М.: Транспорт, 1983. — 328 с.

13. Сорин Л. Н. Силовое взаимодействие в контакте «колесо — рельс» / Л. Н. Сорин, А. А. Зарифьян, Г. А. Бузало // Известия вузов. — 2004. — № 1.

14. Ляпушкин Н. Н. Модель физических процессов в пятне контакта при движении колеса по рельсу со скольжением / Н. Н. Ляпушкин, А. Н. Савоськин // Наука и техника транспорта. — 2008. — № 1. — С. 33–43.

15. Савоськин А. Н. Исследование процессов срыва сцепления и боксования в тяговом приводе I класса / А. Н. Савоськин, А. А. Чучин, А. П. Васильев // Наука и техника транспорта. — 2009. — № 2.

16. Голечков Ю. И. О моделях контактного взаимодействия колеса и рельса в динамике транспортных систем / Ю. И. Голечков, Е. П. Корольков // Наука и техника транспорта. — 2011. — № 3. — С. 39–43.

17. Погорелов Д. Ю. Модификация алгоритма FASTSIM решения задачи контакта колеса и рельса / Д. Ю. Погорелов, В. Н. Языков // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2004. — № 2(2). — С. 103–109.

18. Гарг В. К. Динамика подвижного состава / В. К. Гарг, Р. В. Дуккипати. — М.: Транспорт, 1988. — 391 с.

19. Костюкевич А. И. Обзор моделей фрикционного взаимодействия колес с рельсами / А. И. Костюкевич, И. А. Цыгановский. — Луганск, 2012. — № 4.

Дата поступления: 27.09.2022

Решение о публикации: 26.10.2022

Контактная информация:

ИЗВАРИН Михаил Юльевич — канд. техн. наук, доц.; misha3568723@yandex.ru

АНДРЕЕВ Владимир Евгеньевич — начальник департамента

Clutch Curve Calculation for Designing Anti-Skid and Anti-Slippage Systems

M. Yu. Izvarin¹, V. E. Andreev²

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

²Russian Railways JSC, Moscow, Novaya Basmannaya st., 2

For citation: Izvarin M. Yu., Andreev V. E. Clutch Curve Calculation for Designing Anti-Skid and Anti-Slippage Systems // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 752–762. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-752-762

Summary

Purpose: Creation of mathematical apparatus for calculating clutch curve in designing of anti-skid and anti-slippage devices. It is necessary to obtain formula suitable for calculating the dependence of clutch coefficient from absolute and relative slippage speeds of wheelsets along rails and from electric rolling stock (ERS) speed. **Methods:** Result analysis of trials for various ERS types according to data from open sources and to clutch characteristics obtained as a result of these trials with the use of mathematical statistics methods.

Results: as a result of the work, it has been managed to represent the dependence for calculating clutch coefficient in the form of two function “joining”. **Practical significance** lies in the possibility to use the work results at designing anti-skid/anti-slippage device UPZ-M.

Keywords: Electric rolling stock, clutch force, sliding of wheelsets, skid, slippage, anti-skid/anti-slippage device.

References

1. Kalker J. J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact. *Vehicle System Dynamics*. 1982, I. 11, pp. 1–13.
2. Kalker J. J. On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction: thesise. Delft, 1967.
3. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit. *Wear*. 2005, I. 258.
4. Polach O. Influence of locomotive tractive effort on the forces of between wheel and rail. *Vehicle System Dynamics Supplement*. 2001, I. 35 pp. 7–22.
5. Wei K., Zhao J., You X. Development of a slip and slide for the electric locomotive based on inverter controlled induction motors. 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and application. 2009.
6. Matsumoto Y., Eguchi N., Kawamura A. Novel Re-adhesion Control for Train Traction System of the Shinkansen with the Estimation of Wheel-to-Rail Adhesive Force. *Proc. of IEEE. IECON*. 2001. pp. 1207–1212.
7. Barna G., Lewandowski M. Simulation model of wheel slip and slide protection systems for rail vehicles. *Czasopismo Techniczne. Elektrotechnika Zeszyt*. 2016, I. 1–E(2), pp. 3–15.
8. He J. H., Zhang C. F. An overview on wheel-rail adhesion utilization of heavy-haul locomotive (in Chinese). *Journal of the China Railway Society*. 2018, vol. 40, I. 9, pp. 30–39.
9. Kireeva N. V., Chupakhina L. R. Issledovanie approksimatsii funktsiy raspredeleniya s primeneniem apparata “sshitykh” funktsiy [Investigation of the approximation of distribution functions using the apparatus of “stitched” functions]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental’nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Basic Research]. 2016, I. 5–1, pp. 17–20. (In Russian)
10. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty* [Traction calculation rules for train operation]. Moscow: OAO “Rossiyskie zheleznnye dorogi” Publ., 2014, 516 p. (In Russian)
11. Isaev I. P., Luzhnov Yu. M. *Problemy stsepleniya koles lokomotiva s rel’sami* [Problems of adhesion of locomotive wheels with rails]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985, 238 p. (In Russian)
12. Rozenfel’d V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction]. Moscow: Transport Publ., 1983, 328 p. (In Russian)
13. Sorin L. N., Zarif’yan A. A., Buzalo G. A. Silovoe vzaimodeystvie v kontakte “koleso — rel’s” [Force interaction in the wheel-rail contact]. *Izvestiya vuzov* [Izvestiya Universities]. 2004, Iss. 1. (In Russian)
14. Lyapushkin N. N., Savos’kin A. N. Model’ fizicheskikh protsessov v pyatne kontakta pri dvizhenii kolesa po rel’su so skol’zheniem [Model of physical processes in the contact patch when the wheel moves along the rail with sliding]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2008, I. 1, pp. 33–43. (In Russian)
15. Savos’kin A. N., Chuchin A. A., Vasil’ev A. P. Issledovanie protsessov sryva stsepleniya i boksovaniya v tyagovom privode I klassa [Investigation of the processes of disengagement and boxing in a traction drive of class I]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2009, I. 2. (In Russian)
16. Golechkov Yu. I., Korol’kov E. P. O modelyakh kontaktного vzaimodeystviya kolesa i rel’sa v dinamike transportnykh sistem [On models of wheel-rail contact interaction in the dynamics of transport systems]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2011, I. 3, pp. 39–43. (In Russian)
17. Pogorelov D. Yu., Yazykov V. N. Modifikatsiya algoritma FASTSIM resheniya zadachi kontakta kolesa i rel’sa [Modification of the FASTSIM algorithm for solving the wheel-rail contact problem]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University]. 2004, I. 2(2), pp. 103–109. (In Russian)
18. Garg V. K., Dukkiperi R. V. *Dinamika podvizhnogo sostava* [Rolling stock dynamics]. Moscow: Transport Publ., 1988, 391 p. (In Russian)
19. Kostyukevich A. I., Tsyganovskiy I. A. *Obzor modeley friktsionnogo vzaimodeystviya koles s rel’sami* [Review of models of frictional interaction of wheels with rails]. Lugansk, 2012, I. 4. (In Russian)

Received: September 27, 2022

Accepted: October 26, 2022

Author’s information:

Mikhail Yu. IZVARIN — PhD in Engineering, Associate Professor; misha3568723@yandex.ru
Vladimir E. ANDREEV — Department Head

УДК 656.224

Компоновка железнодорожного хозяйства перспективных грузовых деревень

С. П. Вакуленко, П. В. Куренков, Д. Ю. Роменский, К. А. Калинин, М. В. Роменская

Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

Для цитирования: Вакуленко С. П., Куренков П. В., Роменский Д. Ю., Калинин К. А., Роменская М. В. Компоновка железнодорожного хозяйства перспективных грузовых деревень // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 763–774. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-763-774

Аннотация

Цель: Исследовать вопрос трансформации понятия о современном логистическом комплексе и его роли в транспортной системе. Изучить мировой опыт формирования такого понятия, как «грузовая деревня», и опыт развития подобных проектов, составить перечень признаков грузовой деревни в его современном понимании и сформулировать перечень рекомендаций для развития подобных комплексных логистических объектов в российских условиях. **Методы:** Анализ международного опыта и синтез новых технико-технологических решений для грузовых терминалов. **Результаты:** Определено, что научно-техническое развитие транспортно-логистической отрасли шло параллельно с развитием (эволюцией) знания о транспортно-грузовых комплексах. Определено, что, согласно наиболее передовым представлениям о транспортной логистике, грузовая деревня является перспективным форматом комплексных логистических объектов. Разработан типовой мастер-план грузовой деревни с определением перспективных компоновочных решений для ее железнодорожной инфраструктуры. **Практическая значимость:** Разработанная схема железнодорожного хозяйства грузовой деревни может использоваться при проектировании территорий новых грузовых деревень и промышленных парков в России и странах СНГ.

Ключевые слова: ТЛЦ, логистический центр, контейнерный терминал, ППЖТ, подъездной путь, грузовая деревня, логистика, мультимодальные перевозки, железнодорожный транспорт, терминально-логистический центр.

Введение

Необходимость формирования сети транспортно-логистических центров указывается одним из ключевых направлений развития транспортно-логистического сектора России согласно положениям утвержденной в 2021 году Транспортной стратегии Российской Федерации на период до

2030 года. Среди важных принципов развития грузовых перевозок, в том числе транзитных, транспортная стратегия включает в себя принцип повышения эффективности и расширения комплекса логистических услуг, который подразумевает в том числе развитие сети современных логистических центров. Предусматривается

строительство сети опорных (узловых) логистических центров, а также сети вспомогательных логистических центров (сателлитов).

Эволюционное развитие транспортно-логистической системы связано с усложнением процессов управления логистическими потоками и с необходимостью создания все новой, более совершенной логистической инфраструктуры. С развитием уровня логистического аутсорсинга (*pl*-модальность) возрастают масштаб и перечень затрагиваемых отраслей экономики, которые непосредственно подвержены влиянию логистического терминала.

Эволюция теории и практики терминального обслуживания

Развитие теории и практики транспортной логистики в плане терминального обслуживания начиналось с решения транспортных задач промышленными предприятиями собственными силами. Производство было неразрывно связано с транспортировкой продукции и сырья. По мере развития транспорта начал зарождаться логистический аутсорсинг как явление, а потом, во второй половине XX века, появился и сам термин.

Аутсорсинг в вопросе перевалки грузов с одного вида транспорта на другой и в сфере оказания дополнительных услуг развивался со стороны портов и железнодорожных станций, откуда грузы перевозились гужевым, а затем и автомобильным транспортом. В начале XX века в городах начали формироваться первые крупные товарные станции, которые являлись пунктами погрузки и выгрузки грузов на железнодорожный транспорт.

По мере развития городов, промышленности и транспортной системы в первой половине XX века начали появляться специализированные транспортные предприятия локального или государственного масштаба, занимающиеся исключительно транспортно-логистическим обслуживанием, в том числе обслуживанием крупных

промышленных комплексов и промышленных зон городов.

Наиболее прогрессивным видом транспортного обслуживания крупных промышленных комплексов в условиях СССР стало появление механизированных автоколонн (автопарков, обслуживающих локальный уровень автомобильных перевозок), а также так называемых предприятий промышленного железнодорожного транспорта — самостоятельных владельцев железнодорожной инфраструктуры (являющихся перевозчиками на сети подъездных путей промышленного комплекса), которые обслуживали промышленность на территории своей работы.

Необходимость обеспечения эффективного взаимодействия видов транспорта по мере роста запросов со стороны грузоотправителей уже в рыночных условиях привела к развитию нового вида логистического бизнеса — отдельных специализированных логистических терминалов. Их появление вывело качество оказания логистических услуг на новый уровень. В транспортной терминологии происходит некоторое замещение и даже путаница между терминами «мультимодальный комплекс», «грузовой терминал» и «терминально-логистический центр» (ТЛЦ) [1–3]. Под ними понимаются схожие логистические объекты, оказывающие широкий круг услуг логистического аутсорсинга (*3pl*-уровень). В процессе развития таких комплексов учитываются интересы различных бизнес-структур на стыке транспорта, торговли и производства. Компании, занятые в этом бизнесе, стремятся увеличить свою выручку путем выхода на смежные рынки основных и дополнительных логистических услуг, а последующее развитие мультимодальных перевозок и стремительное развитие перевозок интермодальной транспортной тары (контейнеров, съемных кузовов) привело к появлению терминально-логистических комплексов, обеспечивающих полный спектр логистических услуг по

перевозке, перевалке и обработке материальных потоков.

На современном этапе развития логистики происходит формирование новой, еще более сложной логистической инфраструктуры, позволяющей оказывать клиентам не только логистические, но и таможенные, социальные, консалтинговые и девелоперские услуги, отвечающие принципам 4 уровня логистического аутсорсинга предприятий (4pl-логистика), когда логистические провайдеры распространяют сферу своей деятельности и на внутренние логистические процессы своих клиентов. Подобные комплексы являются наиболее прогрессивными для России проектами развития промышленности, и их развитие поддерживается государством на региональном и федеральном уровнях посредством прямого субсидирования, предоставления налоговых льгот, льгот на коммунальные услуги и других мер экономического стимулирования деятельности бизнеса. Развитие указанных комплексов позволяет сформировать вокруг крупных агломераций логистический каркас, обеспечивающий устойчивое развитие региона [4, 5] и способствующий развитию железнодорожных грузоперевозок, уменьшению автомобильного плеча подвоза грузов, снижению вредного экологического воздействия от грузоперевозок.

В международной литературе можно встретить различные наименования промышленно-логистических комплексов 4pl-уровня, выполняющих сходные задачи по концентрации на одной территории транспортно-ориентированного бизнеса. Вместе с проектом «Freight Village Ворсино» в русский язык пришел именно термин «грузовая деревня». Ориентируясь на международный опыт [6–11] и положения транспортной стратегии, понятие «**грузовая деревня**» (ГД) можно определить так: формат организации узлового мультимодального транспортно-логистического центра с большой степенью интеграции

транспортных и внетранспортных услуг, сформированный на определенной территории, в пределах которой осуществляется вся деятельность, связанная с транспортировкой и переработкой логистических потоков (в том числе связанная с определенными этапами производства). Это деятельность, связанная главным образом с распределением товаров, обеспечением внутренних и международных перевозок, осуществляемая различными компаниями-операторами (их также называют провайдерами логистических услуг). Эти операторы могут быть как собственниками, так и арендаторами зданий и сооружений (складов, грузовых площадок, товарных бирж, центров переработки товаров, офисов, автостоянок и других инфраструктурных комплексов), которые построены непосредственно на территории грузовой деревни. Для обеспечения наилучших условий работы мультимодального логистического центра [12–22] к грузовой деревне должны примыкать несколько различных видов транспорта. Считается, что, как и современный мультимодальный ТЛЦ, грузовая деревня должна обеспечивать наилучшие условия для развития мультимодальных перевозок и взаимодействия видов транспорта — как минимум трех.

Описанный выше процесс эволюции теоретических и практических знаний о комплексных логистических объектах позволяет сделать вывод о том, что в настоящее время именно грузовые деревни и их предшественники — терминально-логистические центры — являются наиболее прогрессивным форматом сухопутных логистических комплексов, концентрирующих в себе все наиболее современные представления о работе с логистическими потоками и с производством промышленной продукции. В соответствии с указанными принципами произведена классификация этапов развития логистических комплексов, приведенная на рис. 1. На иллюстрации представлено идеологическое соответствие уровней

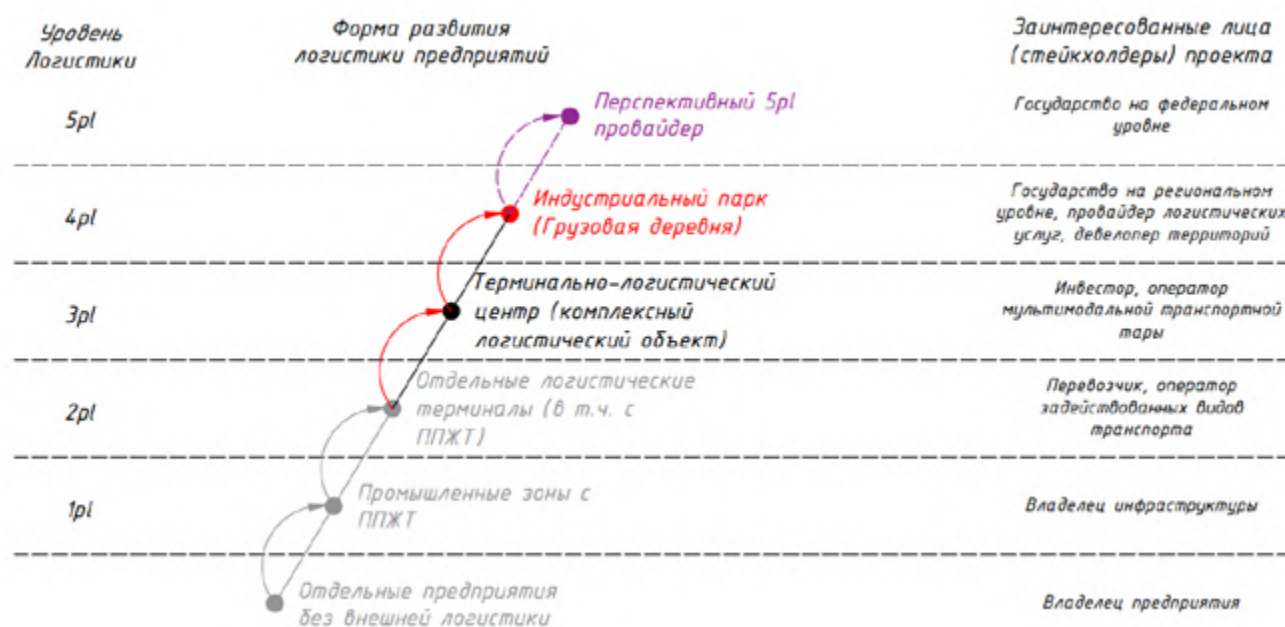


Рис. 1. Эволюция развития теории и практики работы логистической инфраструктуры

логистического аутсорсинга (*pl*-модальности), развития представления о взаимодействии терминального бизнеса и производства, а также уровня вовлеченности в логистику различных заинтересованных лиц.

Практика развития грузовых деревень (ГД) на примере европейских комплексов показывает, что крупнейшие европейские ГД ориентированы, как правило, на работу с автомобильным и железнодорожным транспортом. Конкурентным преимуществом ГД является наличие собственного речного порта или грузового терминала в ближайшем аэропорту. Так, например, испанский логистический терминал в городе Сарагосе — Plaza Logistica Zaragoza — расположен на границе города и использует возможности инфраструктуры автомобильного, железнодорожного и воздушного транспорта. Территория грузовой деревни в Сарагосе поделена на кластеры, передаваемые участникам логистического процесса под застройку или в аренду. Схема логистического терминала Сарагосы с обозначением функциональных зон приведена на рис. 2.

Грузовая деревня является своего рода девелоперским проектом (проектом развития недвижимости), реализуемым в течение длительного времени компанией — автором проекта. За годы развития проекта он естественным образом может претерпевать существенную трансформацию от оригинальной идеи до окончательной реализации. В реальных условиях у грузовой деревни может меняться список резидентов (а вместе с ним и специализация), может перепроектироваться транспортная инфраструктура, может поменяться политика стимулирования различных отраслей экономики и т. д. В связи с этим проекты ГД должны быть гибкими и адаптивными к подобным изменениям при сохранении общей концепции грузовой деревни, которая включает в себя:

- терминальную инфраструктуру различных видов транспорта (интермодальный терминал, аэродромный комплекс, портовую инфраструктуру и причалы);
- земли промышленного назначения для строительства производственных объектов;
- офисные и складские объекты;

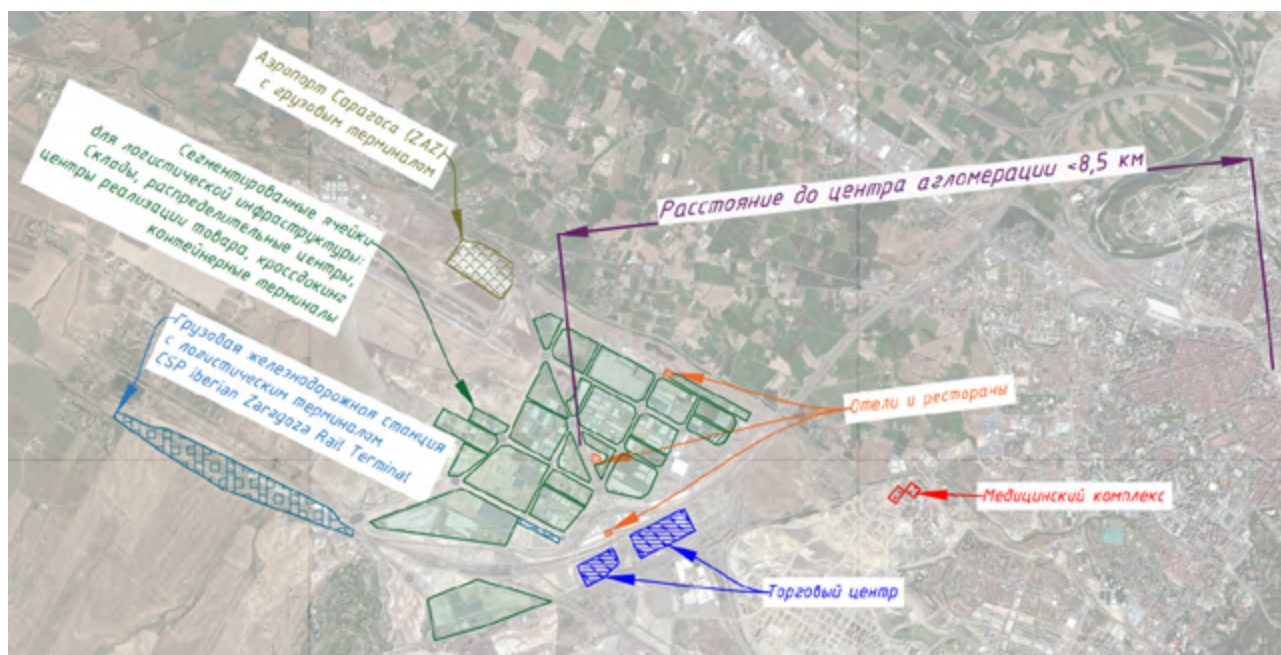


Рис. 2. Функциональная схема логистического терминала Сарагосы

- автомобильные дороги, железные дороги и коммунальное хозяйство;
- сопутствующие логистические объекты (таможенный пост, деповское хозяйство, мойки для подвижного состава и др.).

Вопросы проектирования и эксплуатации большинства этих объектов по отдельности выходят за рамки предмета данного исследования, но, рассматривая роль и значимость железнодорожного транспорта для грузовой деревни, можно более подробно остановиться на компоновке основных элементов железнодорожной инфраструктуры грузовой деревни, так как этот вопрос пока недостаточно широко отражен в научной литературе. На рис. 3 представлено авторское видение мастер-плана грузовой деревни, ориентированной на обслуживание значительных грузопотоков железнодорожного транспорта.

Важными отличиями предлагаемого в настоящем исследовании подхода к использованию железнодорожного транспорта в составе ГД можно выделить следующие тезисы:

- интермодальный терминал проектируется сквозным для задействования его в системе уско-

ренных грузовых перевозок как промежуточного пункта маршрутов транзитных поездов, так и в качестве начально-конечной станции таких поездов [23–26];

- интермодальный терминал проектируется как место осуществления грузосортировочных операций с интермодальными транспортными единицами;

- для большинства земельных участков, предназначенных под промышленную застройку некрупными предприятиями, предусматривается возможность подвода пути необщего пользования;

- работа с инертными строительными грузами выводится на отдельную площадку;

- для земельных участков, предназначенных под промышленную застройку крупными предприятиями, предусматривается обязательный подвод пути необщего пользования.

Таким образом, железнодорожная инфраструктура грузовой деревни представлена несколькими ключевыми комплексами, специализированными на различных задачах: парком «малые промышленные предприятия», парком «контейнерный»,

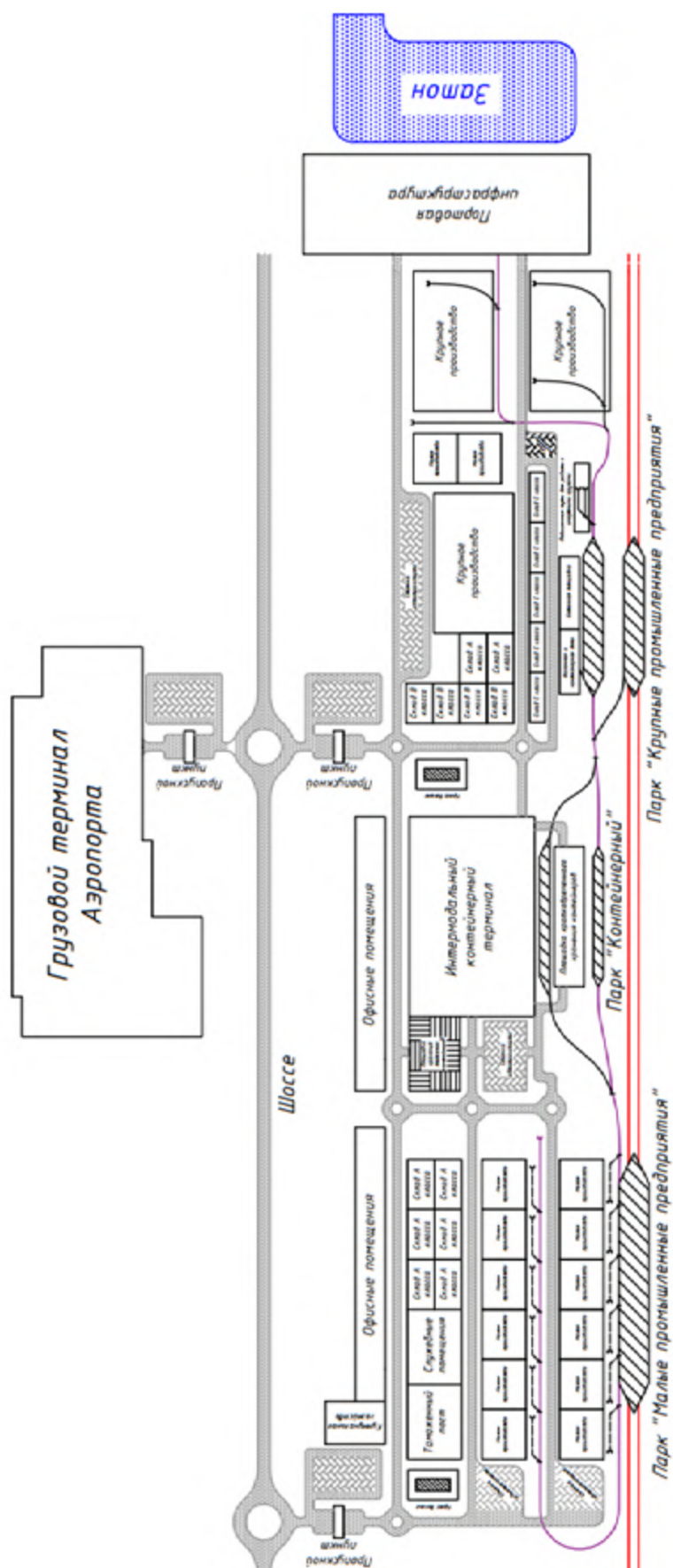


Рис. 3. Мастер-план развития перспективной грузовой деревни

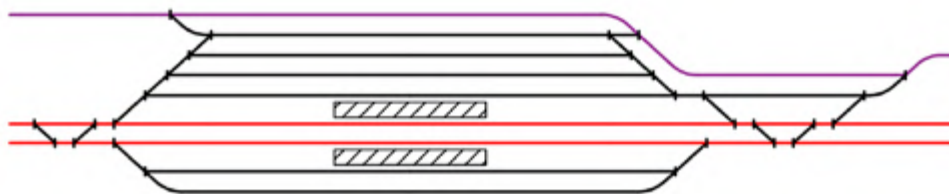


Рис. 4. Схема путевого развития парка «Малые промышленные предприятия»

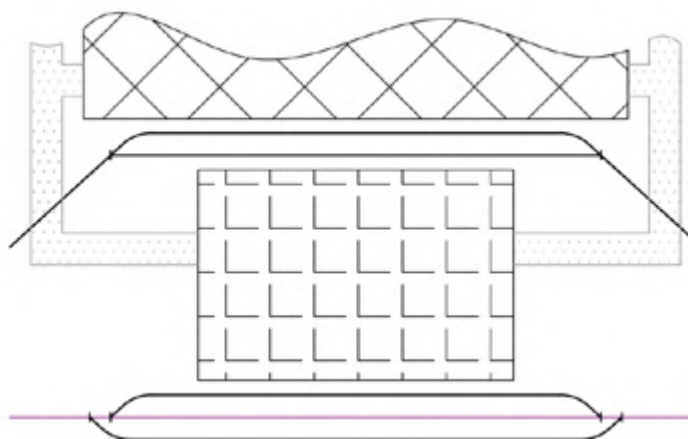


Рис. 5. Схема путевого развития парка «Контейнерный»

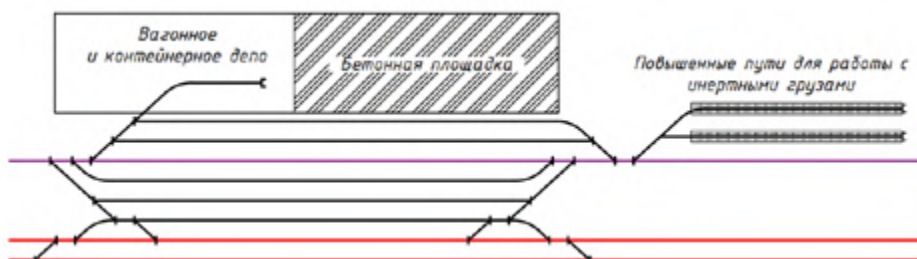


Рис. 6. Схема путевого развития парка «Крупные промышленные предприятия»

парком «крупные промышленные предприятия», подъездными путями к предприятиям и магистральной железнодорожной линией.

Представленный на рис. 4 парк «Малые промышленные предприятия» представляет собой классическую грузовую станцию, выполняющую задачи по формированию подач и уборок вагонов на примыкающие железнодорожные подъездные пути к малым промышленным предприятиям, а также задачи по подготовке подач и уборок вагонов на интермодальный терминал ГД. Парк имеет в своем составе от 2 приемоотправочных путей,

позволяющих принимать и отправлять полноставные поезда и примыкания подъездных путей.

Представленный на рис. 5 парк путей под названием «Контейнерный» представляет собой несколько погрузочно-выгрузочных путей и грузовых фронтов на полный состав установленной длины. Такой терминал, в зависимости от объемов работы, может обслуживаться различными видами погрузочно-выгрузочной техники и может иметь от одного до пяти путей. Данный терминал выполняет только задачи по погрузке и выгрузке интермодальной транспортной тары (контейне-

ров, контейнеров, сменных кузовов и др.) как из составов, подаваемых маневровым порядком из соседних парков, так и из составов, прибывающих поездным порядком сразу под погрузку и выгрузку (главным образом транзитных).

Представленный на рис. 6 парк «Крупные промышленные предприятия» выполняет задачи по обслуживанию подъездных путей крупных промышленных предприятий, являющихся резидентами ГД, а также задачи по подготовке подач и уборок вагонов на интермодальный терминал ГД. Парк имеет в своем составе от 2 приемоотправочных путей, позволяющих принимать и отправлять полносоставные поезда и примыкания подъездных путей. Также к данному парку примыкают собственные грузовые устройства ГД и депо для подвижного состава, оказывающий услуги для операторов подвижного состава и обслуживающий собственный локомотивный парк.

Каждый из трех парков имеет возможность быть около пунктов формирования маршрутизированных отправок, контейнерных поездов и ускоренных грузовых поездов.

Предложенная компоновочная схема железнодорожного хозяйства грузовой деревни позволяет совместить преимущества работы локального ППЖТ с парком маневровых локомотивов с преимуществами работы контейнерного (интермодального) железнодорожного терминала как наиболее востребованного вида наземного терминала.

Выводы

Представленные в статье положения развивают концепцию грузовой деревни как комплексного транспортно-ориентированного проекта промышленной застройки территорий. Разработанный мастер-план грузовой деревни и ее железнодорожного хозяйства, ориентированный на максимизацию производительности

железнодорожного транспорта, может использоваться при проектировании территорий новых грузовых деревень и промышленных парков при практической реализации положений Транспортной стратегии РФ на период до 2030 года.

Библиографический список

1. Куренков П. В. Симплициальные и мультиплициальные комплексы в мультимодальных транспортных системах / П. В. Куренков // Интеллектуальные технологии на транспорте. — 2021. — № 1(25). — С. 21–34.
2. Лысенко Н. Е. Логистические технологии грузовых перевозок в крупных транспортных холдингах / Н. Е. Лысенко, Н. Ю. Лахметкина, И. В. Щелкунова и др. — М.: КноРус, 2020. — 160 с.
3. Стуров Е. В. Терминально-складской комплекс расширяет круг услуг / Е. В. Стуров // Железнодорожный транспорт. — 2016. — № 9. — С. 14–18.
4. Лахметкина Н. Ю. Транспортно-логистические объекты грузового каркаса Москвы / Н. Ю. Лахметкина, Н. Ю. Сысоев, Д. Г. Бабин // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2018. — № 12. — С. 34–36.
5. Вакуленко С. П. Московский транспортный узел: перспективы развития / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Д. Ю. Роменский и др.; Российский университет транспорта (МИИТ). — М.: Всероссийский институт научной и технической информации РАН, 2020. — 208 с.
6. Özceylan E. Evaluation of freight villages: A GIS-based multi-criteria decision analysis / E. Özceylan, M. Erbaş, M. Tolon et al. // Computers in Industry. — 2016. — Iss. 76. — Pp. 38–52. — DOI: 10.1016/j.compind.2015.12.003.
7. Ballis A. Freight Villages: Warehouse Design and Rail Link Aspects / A. Ballis // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. — 1966. — Pp. 27–33. — DOI: 10.3141/1966-04.
8. Wu J. Converting knowledge into sustainability performance of freight villages / J. Wu, H.-D. Haasis // Logistics Research. — 2013. — Iss. 6(2–3). — Pp. 63–88. — DOI: 10.1007/s12159-013-0098-0.

9. Pratelli A. Dry port network model: Best practices in the EU with notes from the USA / A. Pratelli, R. Van Duin, R. Souleyrette et al. // *International Journal of Transport Development and Integration*. — 2021. — Iss. 5(3). — Pp. 217–230.
10. Yang C. Efficiency analysis of European Freight Villages: three peers for benchmarking / C. Yang, A. Taudes, G. Dong // *Central European Journal of Operations Research*. — 2017. — Iss. 25(1). — Pp. 91–122.
11. Baydar A. M. Freight villages: A literature review from the sustainability and societal equity perspective / A. M. Baydar, H. Süral, M. Çelik // *Journal of Cleaner Production*. — 2017. — Iss. 167. — Pp. 1208–1221.
12. Вакуленко С. П. Структурно-композиционный подход к управлению цепью поставок / С. П. Вакуленко, Ю. В. Пересветов. — М.: ИНФРА-М, 2020. — 60 с. — DOI: 10.12737/1095051.
13. Куренков П. В. Экономические аспекты синхромодальных перевозок / П. В. Куренков, Д. А. Преображенский // Развитие экономической науки на транспорте: экономическая основа будущего транспортных систем: сборник научных статей VII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 19 декабря 2019 года / Под ред. Н. А. Журавлевой. — Санкт-Петербург: Институт независимых социально-экономических исследований — оценка, 2019. — С. 443–452.
14. Куренков П. В. Политранспортная логистика: от интер- и мультимодальности к синхро- и ко-модальности через а-модальность / П. В. Куренков, Д. А. Преображенский // Логистика: современные тенденции развития: материалы XVIII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 4–5 апреля 2019 года. — Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2019. — С. 283–289.
15. Болтышева А. Ю. Основные этапы и перспективы развития логистических перевозок в смешанных сообщениях в СССР и РФ / А. Ю. Болтышева, Н. В. Лисаева, Д. С. Шапкин и др. // Логистика — евразийский мост: материалы XIII Международной научно-практической конференции, Красноярск, 25–29 апреля 2018 года. — Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2018. — С. 26–32.
16. Куренков П. Логистические термины и их употребление / П. Куренков, А. Астафьев, Д. Преображенский и др. // Логистика. — 2018. — № 11(144). — С. 46–50.
17. Куренков П. Синхромодальные и ко-модальные перевозки, а-модальный букинг и Тримодальные терминалы как перспективные направления развития транспортной логистики / П. Куренков, Д. Преображенский, А. Астафьев и др. // Логистика. — 2018. — № 12(145). — С. 34–39.
18. Бузулуцкая М. В. Себестоимость интермодальных перевозок / М. В. Бузулуцкая, Т. В. Горбачик, Н. В. Душечкина и др. — М.: Федеральное государственное бюджетное учреждение дополнительного профессионального образования «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2020. — 287 с.
19. Покровская, О. Д. Эволюционно-функциональное развитие транспортных узлов / О. Д. Покровская, К. А. Заболоцкая // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. — 2019. — № 1(1). — С. 92–99.
20. Покровская О. Д. Комплексная оценка транспортно-складских систем / О. Д. Покровская // Железнодорожный транспорт. — 2019. — № 7. — С. 26–32.
21. Покровская О. Д. Терминалистика: общие вопросы / О. Д. Покровская. — Казань: Бук, 2016. — 142 с.
22. Покровская О. Д. Логистические накопительно-распределительные центры как основа терминальной сети региона: монография / О. Д. Покровская; Центр развития науч. сотрудничества. — Новосибирск: ЦРНС, 2012. — 184 с.
23. Вакуленко С. П. Схемные решения контейнерных площадок для обслуживания поездов сервиса «холодный экспресс» / С. П. Вакуленко, М. И. Мехедов, А. М. Насыбуллин и др. // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2021. — № 9. — С. 19–25. — DOI: 10.36535/0236-1914-2021-09-3.
24. Вакуленко С. П. Перевозка крупнотоннажных контейнеров / С. П. Вакуленко, П. В. Куренков, Д. Ю. Ромен-

ский и др. // Железнодорожный транспорт. — 2021. — № 5. — С. 14–18.

25. Вакуленко С. П. Ускоренные грузовые перевозки железнодорожным транспортом / С. П. Вакуленко, М. Н. Прокофьев, Н. Ю. Евреенова. — М.: Российский университет транспорта (МИИТ), 2021. — 234 с.

26. Вакуленко С. П. Взаимодействие видов транспорта в единой транспортной системе: учебное пособие / С. П. Вакуленко, Н. Ю. Евреенова, М. Н. Прокофьев; Российский университет транспорта (МИИТ). — М.: Российский университет транспорта (МИИТ), 2021. — 121 с.

Дата поступления: 10.08.2022

Решение о публикации: 10.11.2022

Контактная информация:

ВАКУЛЕНКО Сергей Петрович — канд. техн. наук, проф., директор Института управления и цифровых технологий; post-iuit@bk.ru

КУРЕНКОВ Петр Владимирович — д-р экон. наук, проф., кафедра «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы»; petr.kurenkov@mail.ru

РОМЕНСКИЙ Дмитрий Юрьевич — канд. техн. наук, ст. преподаватель; romensky@edu.rut-miit.ru

КАЛИНИН Кирилл Антонович — ассистент; kalinin.k.a@mail.ru

РОМЕНСКАЯ Мария Владимировна — преподаватель кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы»; dimeromy@yandex.ru

Arrangement of Railway Economics of Promising Freight Villages

S. P. Vakulenko, P. V. Kurenkov, D. Yu. Romenskiy, K. A. Kalinin, M. V. Romenskaya

Russian University of Transport, 9, building 9, Obraztsova st., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Vakulenko S. P., Kurenkov P. V., Romenskiy D. Yu., Kalinin K. A., Romenskaya M. V. Arrangement of Railway Economics of Promising Freight Villages // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 763–774. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-763-774

Summary

Purpose: To explore the issue of notion transformation on modern logistic complex and its role in transport system. To study the world experience in the formation of such notion as “freight village” and the development experience of such projects, to compose feature list of freight village in its up-to-date understanding and to formulate recommendation list for to develop such comprehensive logistic facilities in Russia conditions.

Methods: Analysis of international experience and synthesis of new technical-technological solutions for freight terminals. **Results:** It was determined that scientific- technical development of transport-logistic branch proceeded in parallel with knowledge development (evolution) on transport-freight complexes. It has been determined that according to the most advanced notions about transport logistics, a freight village is a promising format for comprehensive logistic facilities. Standard master plan of freight village has been carried out with the definition of promising arrangement solutions for its railway infrastructure. **Practical significance:** The developed scheme of railway economics of freight village can be used at designing the territories of new freight villages and industrial parks in Russia and the CIS countries.

Keywords: Transport logistic center, logistic center, container terminal, industrial railway transport enterprises, access road, freight village, logistics, multimodal transportations, rail transport, terminal-logistic center.

References

1. Kurenkov P. V. Simplitisial'nye i mul'tiplitsial'nye komplekсы v mul'timodal'nykh transportnykh sistemakh

[Simplicial and multiplicial complexes in multimodal transport systems]. *Intellektual'nye tekhnologii na transporte* [Intelligent technologies in transport]. 2021, I. 1(25), pp. 21–34. (In Russian)

2. Lysenko N. E., Lakhmetkina N. Yu., Shchelkunova I. V. *Logisticheskie tekhnologii gruzovykh perevozok v krupnykh transportnykh kholdingakh* [Logistics technologies of cargo transportation in large transport holdings]. Moscow: KnoRus Publ., 2020, 160 p. (In Russian)
3. Sturov E. V. Terminal'no-skladskoy kompleks rasshiraet krug uslug [Terminal and warehouse complex expands the range of services]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2016, I. 9, pp. 14–18. (In Russian)
4. Lakhmetkina N. Yu., Sysoev N. Yu., Babin D. G. Transportno-logisticheskie ob"ekty gruzovogo karkasa Moskvy [Transport and logistics facilities of the cargo frame of Moscow]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection]. 2018, I. 12, pp. 34–36. (In Russian)
5. Vakulenko S. P., Kolin A. V., Romenskiy D. Yu. *Moskovskiy transportnyy uzel: perspektivy razvitiya* [Moscow transport hub: development prospects]. Moscow: Vserossiyskiy institut nauchnoy i tekhnicheskoy informatsii RAN Publ., 2020, 208 p. (In Russian)
6. Özceylan E., Erbaş M., Tolon M. Evaluation of freight villages: A GIS-based multi-criteria decision analysis. *Computers in Industry*. 2016, I. 76, pp. 38–52. DOI: 10.1016/j.compind.2015.12.003.
7. Ballis A. Freight Villages: Warehouse Design and Rail Link Aspects. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1966, pp. 27–33. DOI: 10.3141/1966-04.
8. Wu J., Haasis H.-D. Converting knowledge into sustainability performance of freight villages. *Logistics Research*. 2013, Iss. 6(2–3), pp. 63–88. DOI: 10.1007/s12159-013-0098-0.
9. Pratelli A., Van Duin R., Souleyrette R. Dry port network model: Best practices in the EU with notes from the USA. *International Journal of Transport Development and Integration*. 2021, I. 5(3), pp. 217–230.
10. Yang C., Taudes A., Dong G. Efficiency analysis of European Freight Villages: three peers for benchmarking. *Central European Journal of Operations Research*. 2017, I. 25(1), pp. 91–122.
11. Baydar A. M., Süral H., Çelik M. Freight villages: A literature review from the sustainability and societal equity perspective. *Journal of Cleaner Production*. 2017, I. 167, pp. 1208–1221.
12. Vakulenko S. P., Peresvetov Yu. V. *Strukturno-kompozitsionnyy podkhod k upravleniyu tsep'yu postavok* [Structural-compositional approach to supply chain management]. Moscow: INFRA-M Publ., 2020, 60 p. DOI: 10.12737/1095051. (In Russian)
13. Kurenkov P. V., Preobrazhenskiy D. A. *Ekonomicheskie aspekty sinkhromodal'nykh perevozok* [Economic aspects of synchromodal transportation]. St. Petersburg: Institut nezavisimyykh sotsial'no-ekonomicheskikh issledovaniy — otsenka Publ., 2019, pp. 443–452. (In Russian)
14. Kurenkov P. V., Preobrazhenskiy D. A. *Politransportnaya logistika: ot inter- i mul'timodal'nosti k sinkhro-i ko-modal'nosti cherez a-modal'nost'* [Multitransport logistics: from inter- and multimodality to synchro- and co-modality through a-modality]. St. Petersburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova Publ., 2019, pp. 283–289. (In Russian)
15. Boltysheva A. Yu., Lisaeva N. V., Shapkin D. S. *Osnovnye etapy i perspektivy razvitiya logisticheskikh perevozok v smeshannykh soobshcheniyakh v SSSR i RF* [The main stages and prospects for the development of logistics transportation in mixed communications in the USSR and the Russian Federation]. Krasnoyarsk: Krasnoyarskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet Publ., 2018, pp. 26–32. (In Russian)
16. Kurenkov P., Astaf'ev A., Preobrazhenskiy D. *Logisticheskie terminy i ikh upotrebleniye* [Logistic terms and their use]. *Logistika* [Logistics]. 2018, I. 11(144), pp. 46–50. (In Russian)
17. Kurenkov P., Preobrazhenskiy D., Astaf'ev A. *Sinkhromodal'nye i ko-modal'nye perevozki, a-modal'nyy buking i Trimodal'nye terminaly kak perspektivnye napravleniya razvitiya transportnoy logistiki* [Synchromodal and co-modal transportation, a-modal booking and Trimodal terminals as promising areas for the development of transport logistics]. *Logistika* [Logistics]. 2018, I. 12(145), pp. 34–39. (In Russian)

18. Buzulutskaya M. V., Gorbachik V., Dushechkina N. V. *Sebestoimost' intermodal'nykh perevozok* [The cost of intermodal transportation]. Moscow: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie dopolnitel'nogo professional'nogo obrazovaniya "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2020, 287 p. (In Russian)
19. Pokrovskaya, O. D., Zabolotskaya K. A. Evolyutsionno-funktsional'noe razvitie transportnykh uzlov [Evolutionary-functional development of transport hubs]. *Problemy perspektivnogo razvitiya zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov* [Problems of perspective development of railway stations and hubs]. 2019, I. 1(1), pp. 92–99. (In Russian)
20. Pokrovskaya O. D. Kompleksnaya otsenka transportno-skladskikh sistem [Comprehensive assessment of transport and storage systems]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2019, I. 7, pp. 26–32. (In Russian)
21. Pokrovskaya O. D. *Terminalistika: obshchie voprosy* [Terminalistics: general questions]. Kazan': Buk Publ., 2016, 142 p. (In Russian)
22. Pokrovskaya O. D. *Logisticheskie nakopitel'no-raspredelitel'nye tsentry kak osnova terminal'noy seti regiona: monografiya* [Logistic storage and distribution centers as the basis of the region's terminal network: monograph]. Novosibirsk: TsRNS Publ., 2012, 184 p. (In Russian)
23. Vakulenko S. P., Mekhedov M. I., Nasybullin A. M. Skhemnye resheniya konteynernykh ploshchadok dlya obsluzhivaniya poezdov servisa "kholodnyy ekspress" [Schematic solutions for container platforms for servicing cold express trains]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection.]. 2021, I. 9, pp. 19–25. DOI: 10.36535/0236-1914-2021-09-3. (In Russian)
24. Vakulenko S. P., Kurenkov P. V., Romenskiy D. Yu. *Perevozka krupnotonnazhnykh konteynerov* [Transportation of large-capacity containers]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2021, I. 5, pp. 14–18. (In Russian)
25. Vakulenko S. P., Prokof'ev M. N., Evreenova N. Yu. *Uskorennye gruzovye perevozki zheleznodorozhnym transportom* [Expedited Freight Transportation by Rail]. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta (MIIT) Publ., 2021, 234 p. (In Russian)
26. Vakulenko S. P., Evreenova N. Yu., Prokof'ev M. N. *Vzaimodeystvie vidov transporta v edinoi transportnoy sisteme: uchebnoe posobie*. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta (MIIT) Publ., 2021, 121 p. (In Russian)

Received: August 10, 2022

Accepted: November 10, 2022

Author's information:

Sergey P. VAKULENKO — PhD in Engineering, Professor, Director of the Institute of Management and Digital Technologies; post-iuit@bk.ru

Petr V. KURENKOV — Dr. Sci. in Economics, Professor, Department "Transport business management and intelligent systems"; petrurenkov@mail.ru

Dmitriy Yu. ROMENSKIY — PhD in Engineering, Senior Lecturer; romensky@edu.rut-miit.ru

Kirill A. KALININ — Assistant; kalinin.k.a@mail.ru

Maria V. ROMENSKAYA — Lecturer, Department "Transport Business Management and Intelligent Systems"; dimeromy@yandex.ru



УДК 625.03

Экспериментальные исследования колебаний трамвая «Витязь-М»

Е. П. Дудкин, Д. В. Козлов, Я. С. Хомяков

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

Для цитирования: Дудкин Е. П., Козлов Д. В., Хомяков Я. С. Экспериментальные исследования колебаний трамвая «Витязь-М» // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 775–782. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-775-782

Аннотация

Цель: На основании экспериментальных исследований колебаний трамвайного вагона «Витязь-М», возникающих на скоростях 50 км/ч и более, в прямых участках пути с рельсами Р65 на железобетонных шпалах оценить влияние поперечных колебаний на безопасность движения и комфорт пассажиров. Показать несоответствие существующей нормативной документации по устройству и содержанию трамвайных путей и ходовых частей трамвая перспективам его развития. **Методы:** Экспериментальные измерения виброускорений кузова трамваев с ходовыми частями, имеющими различный пробег, при движении по экспериментальному участку пути. Замер и анализ геометрических параметров рельсовой колеи экспериментального участка и трамваев. **Результаты:** Выполнены замеры виброускорений, возникающих при движении трамваев со скоростями от 20 до 50 км/ч, а также проведен анализ геометрических параметров рельсовой колеи опытного участка и профилей колес подвижного состава, участвовавшего в испытаниях. Во время заездов замерялись виброускорения, возникающие при движении, по трем направлениям — продольное, поперечное и вертикальное. Подтверждено появление поперечных колебаний кузова трамвая, влияющих на дискомфорт пассажиров и безопасность движения. Получены среднеквадратичные значения амплитуд виброускорений в трех направлениях в долях ускорения свободного падения (g) в двух вариантах — при движении тележки между стыками и на стыках. Частотный анализ виброускорений подтвердил резкий рост амплитуды поперечных колебаний на частотах в районе 1–2 Гц при скорости 50 км/ч у трамвая с изношенными колесами. Отмечено соответствие геометрии рельсовой колеи экспериментального участка принятым нормативам, а также соответствие размеров колес подвижного состава конструкторской документации. **Практическая значимость:** Выявлена необходимость в дальнейшем комплексном исследовании взаимодействия пути и подвижного состава при внедрении скоростного трамвая с целью совершенствования существующих норм по устройству и содержанию трамвайных путей и ходовых частей трамвая.

Ключевые слова: Трамвай, скоростной трамвай, вибрация подвижного состава, колебания подвижного состава, виброускорение, амплитуда колебаний.



Рис. 1. Трамвай «Витязь-М» в Санкт-Петербурге

Одним из основных направлений развития городского рельсового транспорта является повышение скоростей движения и внедрение скоростного трамвая. При этом обновление подвижного состава является закономерным атрибутом развития. В Санкт-Петербурге с 2015 года стали появляться современные трамваи «Витязь», призванные значительно повысить уровень безопасности и комфорта городского транспорта. Отличительной особенностью этих трамваев является низкопольная конструкция, упрощающая посадку и высадку пассажиров, что особенно важно для маломобильных групп населения.

«Витязь» разработан и производится ООО «ПК Транспортные системы» с 2014 года. Это современная модель, в основе которой лежат тележки новой конструкции, позволившие создать низкопольный трамвай. Трехсекционный трамвайный вагон опирается на три тяговые двухосные тележки, крайние из которых являются поворотными. Конструкционная скорость составляет 75 км/ч.

С 2019 года в трамвайном парке № 8 СПб ГУП «Горэлектротранс» эксплуатируются модернизированные вагоны — 71-931М «Витязь-М», собранные из комплектующих на мощностях Невского завода электрического транспорта (рис. 1).

СПб ГУП «Горэлектротранс», эксплуатирующим трамвайные вагоны «Витязь», выявлена значительная раскочка экипажа при высоких скоростях движения. Данное опасное явление проявлялось примерно после 80 тыс. км пробега у трамваев с новыми колесными парами и после 15–20 тыс. км — с обточенными колесными парами.

Для выявления причин появления раскочки трамвая кафедрой «Строительство дорог транспортного комплекса» ПГУПС были проведены экспериментальные исследования взаимодействия пути и подвижного состава.

В ходе работы выполнены замеры виброускорений, возникающих при движении трамвая со скоростями от 20 до 50 км/ч, а также проведен анализ геометрических параметров рельсовой



Рис. 2. Установка датчиков в вагоне

колеи опытного участка и профилей колес подвижного состава, участвовавшего в испытаниях.

Для испытаний трамвайным парком № 8 СПб ГУП «Горэлектротранс» были предоставлены две идентичные единицы подвижного состава (трамвайные вагоны 71-931М «Витязь-М»), отличающиеся пробегом колесных пар: первый трамвай с изношенными колесами и второй — с недавно обточенными. Программой испытаний были предусмотрены поочередные заезды трамваев по экспериментальному участку со скоростями 20, 30, 40 и 50 км/ч. Экспериментальный участок — прямая с рельсами Р65 на железобетонных шпалах. Во время заездов замерялись виброускорения, возникающие при движении, по трем направлениям — продольное, поперечное и вертикальное. Виброускорения измерялись с помощью трех акселерометров PCB Piezotronics 393B04, расположенных взаимно ортогонально. Акселерометры, размещенные на жесткой базе, устанавливались на пол вагона в зоне передней, средней и задней тележек соответственно (рис. 2). Регистрация сигналов акселерометров осущест-

влялась через измерительно-вычислительный комплекс МИС-026, оборудованный модулями измерения динамических сигналов МС-201. Интерпретация результатов проводилась с помощью пакета обработки сигналов WinПОСЗ.

Получены среднеквадратичные значения амплитуд виброускорений в трех направлениях в долях ускорения свободного падения (g) в двух вариантах — при движении тележки между стыками (оказывающие длительное вибрационное воздействие) и на стыках (имеющие существенно большую амплитуду, но действующие в течение малого промежутка времени, менее 0,1 с, при прохождении колесом стыка). Анализ полученных результатов показывает: средний уровень и «основных» виброускорений, и виброускорений на стыках выше на трамвае с недавно обточенными колесами; однако резкое увеличение амплитуды и изменение характера поперечных колебаний выявлено на скорости 50 км/ч только на трамвае с изношенными колесными парами.

Графики замеров поперечных виброускорений на скорости 50 км/ч для трамваев с изношен-

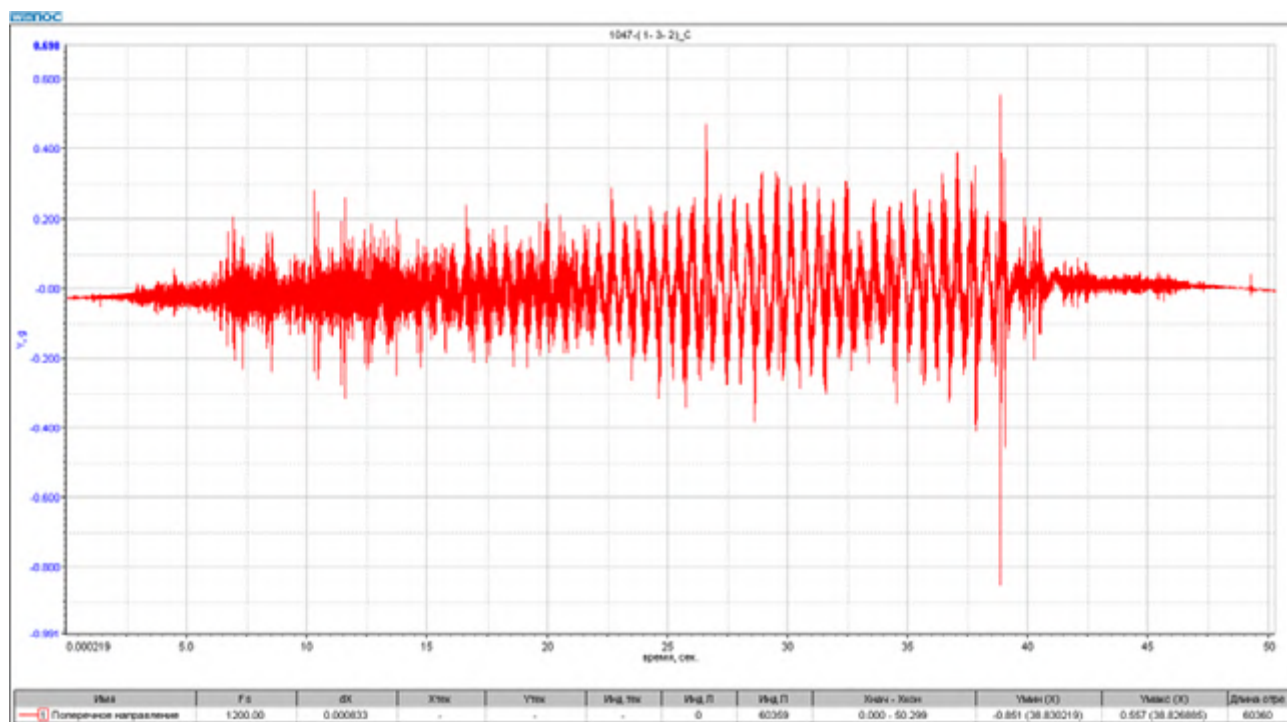


Рис. 3. График поперечных виброускорений трамвая с изношенными колесами при скорости 50 км/ч («раскачка» наблюдается с 22 по 38 с)

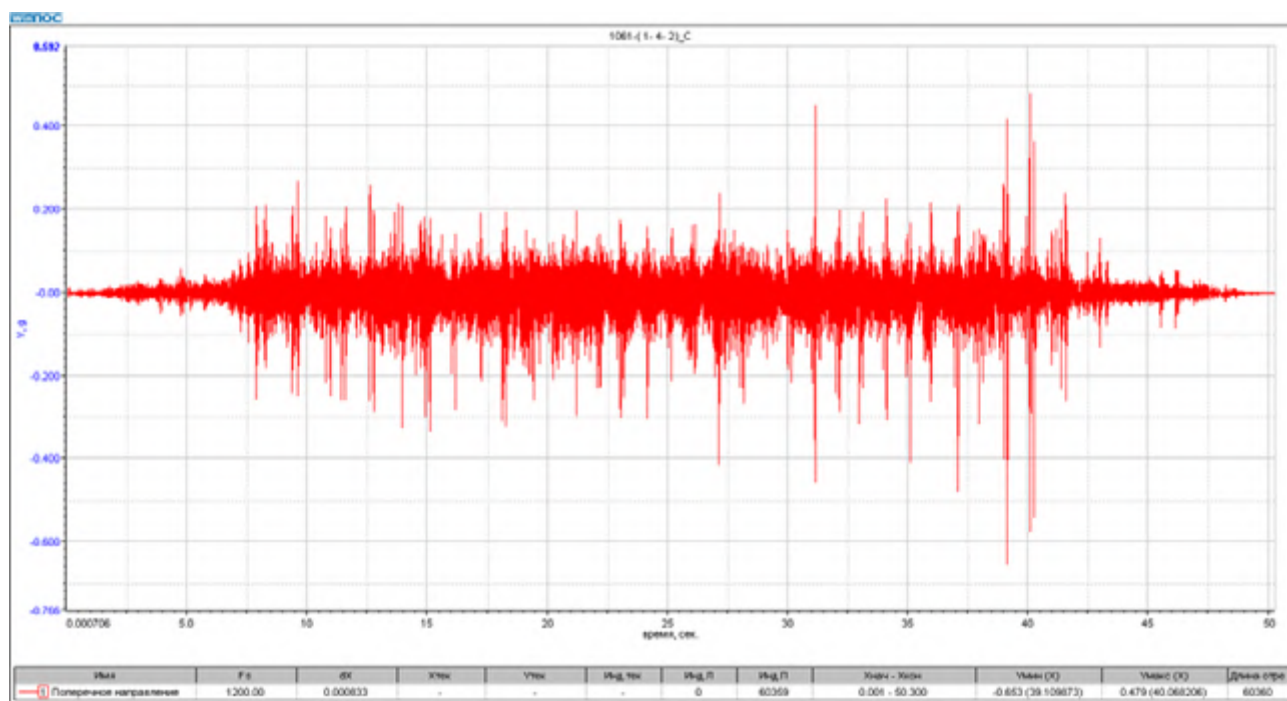


Рис. 4. График поперечных виброускорений трамвая с обточенными колесами при скорости 50 км/ч

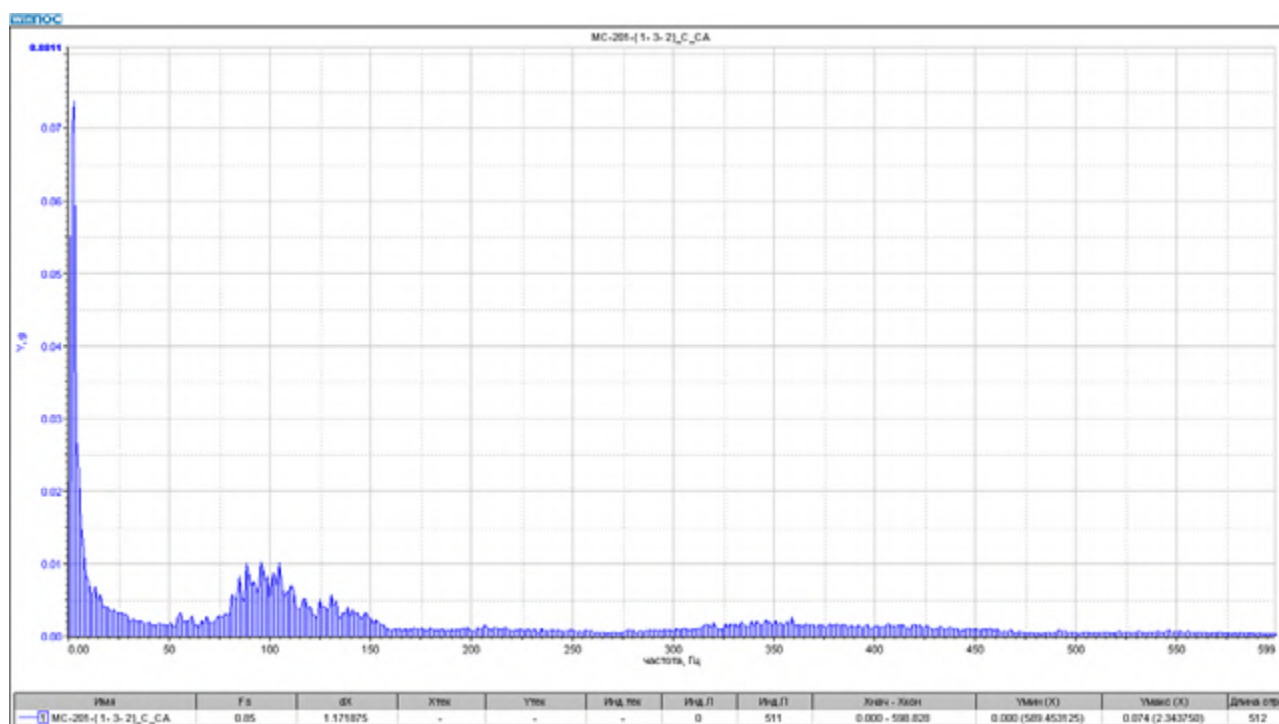


Рис. 5. Частотный анализ виброускорений в момент раскачки трамвая

ными (рис. 3) и обточенными (рис. 4) колесными парами имеют характерное различие при установившемся движении.

Частотный анализ виброускорений подтверждает резкий рост амплитуды поперечных колебаний на частотах в районе 1–2 Гц при скорости 50 км/ч у трамвая с изношенными колесами (рис. 5).

Значительная поперечная раскачка проявляется только на крайних тележках (передней и задней), в районе средней тележки это явление отсутствует, что объясняется различными степенями свободы тележек, так как, в отличие от крайних, средняя тележка неповоротная [1].

Несмотря на то, что среднеквадратичные значения амплитуд виброускорений при резонансных колебаниях (0,2–0,3 g, без разделения по частотам) сравнимы с остальными полученными в ходе эксперимента значениями, данное явление «раскачки» представляется опасным, так как основная энергия колебаний сосредоточена на частотах 1–2 Гц и, помимо дискомфорта пасса-

жиров, может вызвать нарушения безопасности движения.

Частотный анализ показывает, что виброускорения на этих частотах превышают 0,07 g, или 0,7 м/с², согласно СП 2.5.3650—20 «Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры». Предельные уровни виброускорений с разделением по частотам (в 1/3 октавных полос, от 1 до 80 Гц) и для частот 1; 1,25; 1,6 и 2 Гц ограничены величиной 0,2 м/с² для горизонтального поперечного направления.

Проведенный анализ геометрических параметров колес трамваев показал, что колесные пары трамвая «Витязь», согласно своей конструкторской документации, не соответствуют какому-либо конкретному типоразмеру по ГОСТ, но имеют перекрестное соответствие по нескольким типоразмерам, за исключением диаметра по кругу катания, который на 90 мм меньше установленного ГОСТом (620 мм вместо 710 мм).

Сравнение фактических размеров бандажей с нормативами показало, что значения лежат в пределах допустимых, согласно Правилам технической эксплуатации трамвая, ГОСТ 25715—88 «Бандажи чистые для вагонов трамвая» и Руководству по эксплуатации вагона трамвайного модели 71-931М [2–5].

На участке испытаний конструкция пути устроена на железобетонных шпалах с промежуточными анкерными скреплениями типа АРС-04, железнодорожными рельсами Р65 и проектной шириной колеи 1524 мм. Измерения ширины колеи показали, что она лежит в пределах от 1522 до 1526 мм с одиночными отклонениями до 1528 мм (на протяжении не более 5 м) при допуске от 1520 мм до 1536 мм.

Рельсовая колея устроена с возвышением внутреннего (междупутного) рельса на величину 10–15 мм, при нормативной величине возвышения — 4 мм. Однако и эти отклонения не выходят за рамки допустимых норм.

Наблюдаемые резонансные явления при движении трамвая могут быть обусловлены как особенностями конструкции ходовых частей подвижного состава, так и особенностями взаимодействия колеса и рельса при определенной геометрии рельсового пути (ширина колеи, уровень расположения рельсовых нитей, тип рельса, подуклонка) и колесной пары (расстояние между внутренними гранями колес, профиль колеса, поверхность катания, гребень) трамвая [6].

Поскольку геометрические параметры ходовых частей исследуемого трамвая и рельсового пути соответствовали существующим нормам, а опасные поперечные колебания появлялись уже при скорости 50 км/ч, в целях обеспечения надлежащего уровня безопасности и комфорта пассажиров необходимо проведение комплексных исследований для пересмотра данных норм, особенно с учетом перспективного повышения скоростей движения трамваев.

Библиографический список

1. Дудкин Е. П. «Современные конструкции трамвайных путей»: монография / Е. П. Дудкин, К. А. Гмыря, А. В. Колтаков и др. — М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2021. — 136 с.
2. ГОСТ 25712—88. Бандажи чистые для вагонов трамвая. Технические условия: ГОСТ: издание официальное: Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совмине СССР: дата введения: 28 ноября 1988 г. / Разработан Министерством жилищно-коммунального хозяйства РСФСР. — М.: Издательство стандартов, 1989. — Приложение.
3. Правила технической эксплуатации трамвая: Министерство транспорта Российской Федерации: дата принятия: 30 ноября 2001 г. — М.: 2001. — 20 с.
4. Вагон трамвайный модели 71-931М. Руководство по эксплуатации / ООО «ПК Транспортные системы». — М.: 2017. — 8 с.
5. СП 2.5.3650—20. Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры: Санитарно-эпидемиологические правила: введены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации: дата принятия: 16 ноября 2020 г. — М.: 2020. — Приложение 1, таблица 25.
6. Дудкин Е. П. Отдельные аспекты взаимодействия пары «колесо — рельс» рельсового городского транспорта / Е. П. Дудкин, Н. Н. Султанов, С. В. Китаев и др. // Транспорт Российской Федерации. — 2020. — № 3–4(88–89). — С. 63–67.

Дата поступления: 06.07.2022

Решение о публикации: 29.08.2022

Контактная информация:

ДУДКИН Евгений Павлович — д-р техн. наук, проф.;
ed@pgups-tempus.ru

КОЗЛОВ Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук,
доц.; project@pgups-tempus.ru

ХОМЯКОВ Ярослав Сергеевич — аспирант;
jaro97@mail.ru

Experimental Studies of Tram “Vityaz–M” Vibrations

E. P. Dudkin, D. V. Kozlov, Ya. S. Khomyakov

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

For citation: Dudkin E. P., Kozlov D. V., Khomyakov Ya. S. Experimental Studies of Tram “Vityaz–M” Vibrations // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 775–782. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-775-782

Summary

Objective: Based on experimental studies of vibrations of Vityaz-M tram car occurring at speeds of 50 km/h or more on track straight sections with P65 rails on reinforced-concrete sleepers, to evaluate the effect of transversal vibrations on traffic safety and passenger comfort. To show the inconsistency of existing regulatory documentation on the structure and maintenance of tram tracks and tram chassis with the development prospects. **Methods:** Experimental measurements of vibration accelerations of tram body and tram chassis, having different mileage, when moving along track experimental section. Measurement and analysis of geometric parameters of rail track experimental section and of trams. **Results:** Measurements of vibration accelerations occurring during tram motion with 20 to 50 km/h speeds were performed as well as geometric parameter analysis for rail track experimental section and rolling stock wheels' profiles, participated in the tests, was pursued. During the races, vibration accelerations that occur during movement were measured in three directions — longitudinal, transversal and vertical. The appearance of transversal vibrations of tram body affecting passenger discomfort and traffic safety has been confirmed. The root mean-square values of the amplitudes of vibration accelerations towards three directions in acceleration gravity (g) fractions have been obtained in two variants — at trolley motion between joints and at joints. Vibration acceleration frequency analysis has confirmed a sharp increase in the amplitude of transversal vibrations at frequencies in the region of 1–2 Hz at a speed of 50 km/h for a tram with worn wheels. The compliance of rail track experimental section geometry with the accepted standards as well as the compliance of rolling stock wheels dimensions with constructive documentation are noted. **Practical significance:** The need for further comprehensive study of the interaction of track and rolling stock while high-speed tram introduction with the purpose to improve existing standards on the structure and maintenance of tram tracks and tram chassis.

Keywords: Tram, high-speed tram, vibration of rolling stock, vibrations of rolling stock, vibration acceleration, amplitude of vibrations.

References

1. Dudkin E. P., Gmyrya K. A., Koltakov A. V., Malakhov M. V., Sultanov N. N. “*Sovremennye konstruksii tramvaynykh putey*” [“Modern designs of tram tracks”]. Moscow: FGBU DPO «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte» Publ., 2021. 136 p. (In Russian)

2. GOST 25712-88. *Bandazhi chistye dlya vagonov tramvaya. Tekhnicheskie usloviya: GOST: izdanie ofitsial'noe: Komitet standartov, mer i izmeritel'nykh priborov pri Sovmine*

SSSR: data vvedeniya 1988-11-28 / razrabotan Ministerstvom zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva RSFSR [GOST 25712-88. Bandages are clean for tram cars. Specifications: GOST: official edition: Committee of Standards, Measures and Measuring Instruments under the Council of Ministers of the USSR: introduction date 1988-11-28 / developed by the Ministry of Housing and Communal Services of the RSFSR]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1989. (In Russian)

3. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii tramvaya: Ministerstvo transporta Rossiyskoy Federatsii: data prin-*

yatiya 2001-11-30 [Rules for the technical operation of the tram: Ministry of Transport of the Russian Federation: date of adoption 2001-11-30]. Moscow: 2001. 20 p. (In Russian)

4. *Vagon tramvaynyy modeli 71-931M. Rukovodstvo po ekspluatatsii / OOO "PK Transportnye sistemy"* [Tram car model 71-931M. Operation manual / PK Transport Systems LLC]. Moscow: 2017. 8 p. (In Russian)

5. *SP 2.5.3650-20. Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k otdel'nym vidam transporta i ob"ektam transportnoy infrastruktury: Sanitarno-epidemiologicheskie pravila: vvedeny postanovleniem Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Rossiyskoy Federatsii: data prin'yatiya 2020-11-16* [SP 2.5.3650-20. Sanitary and epidemiological requirements for certain types of transport and transport infrastructure facilities: Sanitary and epidemiological rules: introduced by a decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation: date of adoption 2020-11-16]. Moscow: 2020. (In Russian)

6. Dudkin E. P., Sultanov N. N., Kitaev S. V., Vostrikov O. V. Otdel'nye aspekty vzaimodeystviya pary "koleso-rel's" rel'sovogo gorodskogo transporta [Separate aspects of the interaction of the "wheel-rail" pair of rail urban transport]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2020, I. 3-4 (88-89), pp. 63–67. (In Russian)

Received: July 06, 2022

Accepted: August 29, 2022

Author's information:

Evgeny P. DUDKIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; ed@pgups-tempus.ru

Dmitry V. KOZLOV — PhD in Engineering, Associate Professor; project@pgups-tempus.ru

Yaroslav S. KHOMYAKOV — Postgraduate Student; jaro97@mail.ru

УДК 528.482

Комплексный мониторинг геологической среды в пределах горного отвода строящегося тоннеля

П. В. Бобарыкин, Н. Н. Богомолова, Т. М. Немченко

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

Для цитирования: Бобарыкин П. В., Богомолова Н. Н., Немченко Т. М. Комплексный мониторинг геологической среды в пределах горного отвода строящегося тоннеля // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 783–792. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-783-792

Аннотация

Цель: Рассмотреть пример осуществления комплексного мониторинга, основанного на сборе и анализе различной информации о перемещениях грунтовой среды для последующего прогноза состояния массива и своевременных корректировок проектных решений. Установить последовательность и периодичность этапов реализации мониторинга для получения своевременной информации о состоянии грунтового массива. Выявить возможные пути статистической обработки результатов наблюдений для обеспечения достоверности прогноза развития деформаций. **Методы:** Бесконтактный метод регистрации электромагнитной эмиссии, георадиолокационный метод, метод сейсмоакустики, геодезический метод, метод тензометрии, статистические методы. **Результаты:** Изучена возможность реализации комплексного мониторинга деформаций на конкретном примере. Описана возможная последовательность этапов мониторинга с применением современных методов и технологий. Показано, что сбор данных о состоянии грунтового массива из разных источников позволяет делать достоверные выводы о безопасности горных работ и проверять их путем использования методов статистического анализа. Рассмотрены результаты реальных наблюдений за деформациями в пределах горного отвода. Даны рекомендации по организации наблюдений в период активизации склоновых процессов. Описана возможность организации мониторинга деформаций с комплексным применением различных средств измерений, таких как инклинометрические зонды, высокоточные нивелиры, электронные тахеометры, тензодатчики. Изучен вопрос необходимости проектирования и создания геодезических опорных сетей, служащих основой для производства наблюдений за смещениями конструкций сооружения и окружающих его объектов. **Практическая значимость:** Результаты могут быть использованы при организации работ по наблюдению за смещениями горных выработок, деформациями дневной поверхности (окружающей застройки), при проектировании наблюдательных станций.

Ключевые слова: Деформации, комплексный мониторинг, подземные сооружения, геодезические наблюдения.

Введение

Геодезические наблюдения за сдвижением земной поверхности от вредного влияния горных работ предназначены для выявления основных закономерностей процесса сдвижения, а также для своевременного принятия мер безопасности и предупреждения аварийных ситуаций. В настоящее время организация мониторинга деформаций включает в себя периодические наблюдения за горизонтальными и вертикальными смещениями установленных марок, а также сопутствующие наблюдения за геологической средой и грунтовыми водами.

Перед началом проведения горных работ выполняют обследование зданий и сооружений, находящихся в мульде сдвижения, чтобы определить состояние их конструкций. Для реализации мониторинга составляется программа работ, которая определяет схемы расположения марок, их тип и конструкцию, точность, методику наблюдений, периодичность и продолжительность.

Система комплексного мониторинга геологической среды возводимого транспортного тоннеля является частью этапов изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации сооружения. Комплексный мониторинг должен осуществляться в пределах границ горного земельного участка, представленного для ведения горных работ, и окружающей застройки.

Комплексный мониторинг осуществляется для предотвращения возникновения чрезвычайных ситуаций в период проходки, а также для оперативной разработки рекомендаций по применению тех или иных типов тоннельных конструкций с целью оптимизации проектной документации.

Материалы и методы

Система комплексного мониторинга деформаций была реализована путем организации наблюдений за смещениями в период строительства двух параллельных тоннелей. В пределах исследуемого района были обнаружены эрозионные, оползневые и другие экзогенные геологические процессы.

В районе строительства широко развиты ландшафтные формы оползневого рельефа. В настоящее время фронтальные части оползней глубокого заложения в различной степени перерабатываются вторичными эрозионными и вторичными оползневыми процессами, образуют довольно крутые ($40\text{--}50^\circ$) откосы высотой до 10–12 м. Они являются слабоактивными или неактивными. Поверхности оползней имеют слабонаклонные, плавно бугристые формы рельефа, сильно переработанные позднейшими денудационными процессами. Трасса тоннелей в районе пересекает тектонические нарушения. Материал зон дробления охарактеризован как суглинок твердый, щебенистый, слабонабухающий. Содержание щебня — до 40 %.

При укреплении откосов выемки на припортовых участках необходимо было учитывать сильную тектоническую нарушенность пород с изменением их залегания с очень пологого до субгоризонтального. Пологие залегания по склону пород, сильно тектонически-трещиноватых и выветрелых на припортовых участках, благоприятны для формирования оползней соскальзывания при сооружении любых выемок без опережающих мероприятий инженерной защиты.

В полосе отвода встречаются твердые и полутвердые глины, твердые суглинки с наличием обломочного материала. Гидрогеологические условия района характеризуются выборочным обводнением грунтов коренного субстрата. В ненарушенном залегании он является водоупором. Слабая циркуляция подземных вод происходит по пластам песчаников. Это обусловлено их повышенной пористостью и трещиноватостью по сравнению с аргиллитами.

Основная циркуляция подземных вод происходит по зонам тектонической трещиноватости. Благоприятны участки дробления с условиями,

характерными для зон субмеридиональных тектонических трещин, в зоне трещиноватости коренных пород и в пределах оползней по интервалам блоковых смещений коренных пород, характеризующихся многочисленными трещинами, в том числе приоткрытыми и зияющими. Ситуация усугубляется наличием на этом участке мощной зоны выветривания.

В качестве методов комплексного мониторинга рассматриваются следующие: бесконтактный метод регистрации электромагнитной эмиссии, георадиолокационный метод, метод сейсмоакустики, геодезический метод, метод тензометрии.

Методика измерений, обработка данных

В настоящее время для наблюдений за состоянием грунтового массива при строительстве подземных сооружений часто используется метод, в основе которого лежит обнаружение и фиксирование естественных импульсов электромагнитного поля Земли (далее — ЕИМПЗ) [1].

Он базируется на явлении электромагнитной эмиссии при разрушении геоматериалов и позволяет оперативно оценивать изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива. При наблюдениях осуществляется прием электромагнитных импульсов коренных пород впереди забоя на глубину 10–15 метров по пройденной части тоннелей.

Результаты измерений сравнивают с критериальными величинами и судят об уровне геомеханических напряжений и степени устойчивости призабойной зоны, а также изменении напряженного состояния массива по мере отхода забоя.

В результате изменения напряженно-деформированного состояния в прилегающей к забою тоннелей части горного массива происходят механикоэлектрические преобразования. Это вызывает появление свободных электрических зарядов, их накопление и искровые разряды в трещинах породы. Разряды генерируют высокочастотное

электромагнитное излучение в диапазоне частот от 5 до 500 кГц, имеющее импульсный характер.

Содержание обработки результатов таких измерений часто зависит от алгоритмов, заложенных в программное обеспечение, включая алгоритмы опознания и подавления промышленных помех.

При реализации мониторинга по мере продвижения забоя тоннелей на интервал не более двух поперечных сечений выработки выполнялись наблюдения ЕИМПЗ. Для выполнения серии наблюдений в забое выбирался момент времени проходческого цикла, когда в нем отсутствовала работа техники и механизмов. Данные наблюдений анализировались с помощью прикладной программы после их копирования из памяти прибора в компьютер. В качестве показателя степени устойчивости пород на забое были использованы средние значения контролируемых параметров. Графические материалы показывали характер изменения параметров в зависимости от положения забоя. По сочетанию параметров определялась категория устойчивости участка на очередной цикл проходки тоннелей.

По трассе тоннеля выделено 2 оползня, осложняющих проходку. Оползневые склоны требуют контроля для предупреждения возможных оползневых процессов. Для своевременного реагирования на возможные процессы был организован мониторинг напряженно-деформационного состояния оползневых склонов.

Экзогенные процессы солифлюкции и оползнеобразования, степени их проявления обуславливаются несколькими основными причинами: крутизна склонов; литология образующих склон горных пород; влажность, обводненность горного склона. Последние факторы носят ярко выраженный сезонный характер, что необходимо учитывать при планировании наблюдений за состоянием склонов.

Анализ распределения полей напряжений в оползневой массе горных пород показал, что в ее

фронтальной части внизу склона располагается зона максимальных напряжений грунтов. Вверху, в тыловой части породы испытывают растяжение вплоть до образования оползневых рвов. Таким образом, профилируя горный склон сверху вниз и наоборот, можно с помощью измерения естественной электромагнитной эмиссии выделить по повышенным значениям ЕЭМИ фронт оползня и по пониженным — его тыловую часть. Определив тело оползня в плане, по изменениям параметров интенсивности ЕЭМИ возможно предсказать критические периоды развития оползня, когда скорость его может увеличиваться, и он требует тщательных наблюдений.

Шаг по профилям был выбран около 5 метров и в местах проявления оползневых процессов около 1–2 метров между точками. На основании наблюдений были установлены зоны, различные по степени опасности.

Работы по оценке устойчивости оползневых склонов выполнялись ежеквартально, увязывая во времени с основными этапами строительства тоннеля (раскрытия сечения тоннеля по частям) и дополнительно в период интенсивных атмосферных осадков.

Прогноз инженерно-геологических и гидро-геологических условий впереди забоев тоннелей осуществлялся методом сверхширокополосной георадиолокации, использующим в своей основе электромагнитное поле, формируемое электромагнитными импульсами, мощность которых достигает 10 ватт, а частота их следования — 10 кГц.

Метод сверхширокополосного импульсного зондирования (далее — СШП), или георадиолокационный метод, основывается на получении изображения состояния геологической среды по отраженному сигналу [2, 3]. Задачей геофизического обследования является выявление в массиве горных пород зон физико-механических нарушений, интервалов повышенной водонасыщенности пород, осложняющих проходку тоннеля.

Записанный в точках измерения СШП-сигнал подвергается математической обработке. После обработки сигналов интерпретируются полученные данные и строится геолого-геофизический план тоннеля по точкам СШП-зондирования, где отображаются выявленные особенности строения массива горных пород.

Расшифровка сигналов и получение изображения геологического разреза выполняется в камеральных условиях и является наиболее трудоемким этапом работ.

По мере продвижения забоя необходимо уточнять фактические деформационно-прочностные свойства массива для введения их в расчеты крепей и обделок с целью установления наиболее оптимальных конструкций.

Определение фактических деформационно-прочностных характеристик массива в натурных условиях для введения их в расчеты крепей и обделок реализуют в следующей последовательности: по трассе тоннеля выбирают места с различными инженерно-геологическими условиями для проведения работ; проводят тарифовочные изыскания с использованием сейсмического метода; выполняют работы по определению величин скоростей продольных и поперечных волн; осуществляют обработку данных полевых работ с получением деформационно-прочностных характеристик массива. Определение фактических деформационно-прочностных свойств массива выполняют этапами, которые по времени увязываются с интенсивностью проходки, равной 400–500 метрам.

Напряженно-деформированное состояние крепей и обделок контролируется путем установления в них струнных датчиков для измерения местных деформаций. Сечения, оснащаемые деформометрами, располагаются в различных инженерно-геологических условиях. После нанесения набрызг-бетона выполняют нулевой цикл опроса датчиков. После каждого опроса по измеренным деформациям вычисляют напряжения

в крепи. Во время монтажа замерных станций с деформометрами необходимо определить геометрические параметры их установки по высоте тоннелей, расположения друг относительно друга и контура штольни, пикеты по тоннелям, глубину заложения от поверхности земли, инженерно-геологические условия в месте установки, способы проходки.

В процессе проходки на конструкциях временной крепи и конечной обделки устанавливают отражательные пленки, по координатам которых в смежных циклах наблюдений определяют смещение всего контура. Для реализации наблюдений используют электронные тахеометры.

При определении смещения контуров тоннелей число марок и их месторасположение проектируют таким образом, чтобы иметь достаточно информации о перемещениях ограждающих конструкций по всей длине тоннеля. После установки отражательных пленок выполняют нулевой цикл измерений. Сечения с марками располагают через 5 м метров на расстоянии 25 м по обе стороны от сечения, оснащенного деформометрами, а также в местах с нарушенными грунтами.

По мере проходки тоннеля должны оцениваться водопроявления и выявляться участки с максимальными дебетами воды. Для контроля гидростатического давления перед разработкой штроссовой части тоннеля в трех сечениях в предварительно пробуренные скважины через крепь устанавливают датчики.

Для наблюдения за деформациями откосов припортальных участков и участков оползневых склонов создается система наблюдательных станций. Наблюдение за деформациями склонов заключается в определении координат XYZ пространственного положения станции, анализа их изменения во времени и пространстве. Установка реперной сети и первичное координирование выполняется до производства горнопроходческих работ.

Контрольные серии измерений выполняются по мере производства горнопроходческих работ, по результатам которых выявляются величины смещений дневной поверхности и выполняется оценка устойчивости склонов. В каждом цикле наблюдений производится контрольное измерение расстояний между базовыми пунктами. Периодичность контрольных измерений определяется степенью интенсивности оседаний, но должна быть не реже одного раза в 1,5 месяца и должна продолжаться до полного затухания осадок (не менее 3 месяцев после окончания горнопроходческих работ).

Границы деформационных профилей должны выходить за пределы расчетной мульды оседания дневной поверхности.

Марки, координаты которых используют для определения смещений, закрепляют отражательными пленками или поворотными призмами. Местами установки марок служат конечная обделка, временная крепь, порталные части, сваи. По результатам наблюдений вычисляют осадку, продольный и поперечный сдвиг, сближение стен и другие деформации.

Деформационные марки, закрепленные в сводовой части тоннеля, должны закрепляться через каждые 10–20 м. В зоне влияния тоннеля марки устанавливают на ограждающие конструкции и фундаменты окружающих строений [4–6].

Для реализации мониторинга перед началом работ должна быть создана геодезическая опорная сеть, точность которой будет обеспечивать выполнение наблюдений за смещениями.

Анализ результатов наблюдений

Результаты комплексного мониторинга включают в себя разнородную информацию, позволяющую выполнять разносторонний анализ развития деформационных процессов, протека-

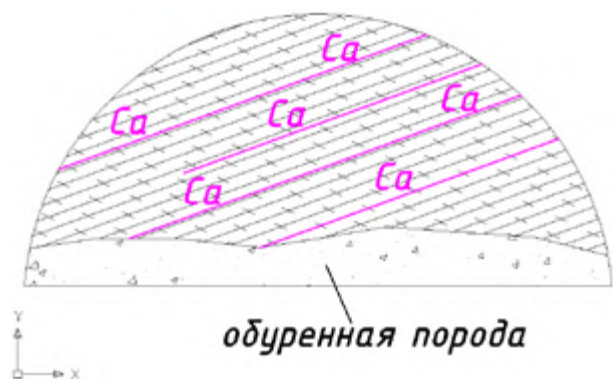


Рис. 1. Результаты геофизических наблюдений

ющих как в пределах окружающей застройки, так и в самом тоннеле. Отчеты по реализации мониторинга содержат информацию об этапах проходческих работ, результатах визуального обследования, зондирования, опросов датчиков, геодезических наблюдений и пр.

Так, например, в результате проведения геофизических работ методами сейсморазведки и электроразведки на припортальном участке тоннеля

были определены границы скольжения, установлены характеристики пород по составу. На рис. 2 представлены аргиллиты темно-серые, плотные, тонкослоистые, имеются редкие прослои песчаников мощностью от 1 мм до 2 см, по тектонике породы трещиноватые по напластованию — 15–20 трещин на 1 пог. м, трещины ровные, гладкие. Секущая трещиноватость представлена двумя системами трещин: субвертикальная, параллельная плоскости забоя, трещины ровные прерывистые; вторая система трещин располагается под углом около 30° к плоскости забоя и углом падения примерно 70° . Трещины ровные, гладкие, закрытые. По напластованию прослеживаются прожилки кальцита мощностью от 1 мм до 5 мм. Водоприток в виде слабого межпластового высачивания с кровли.

На рис. 2 по результатам обработки данных локализации картированы зоны разгрузки напряжений в массиве. Прочность, приведенная к шкале $R_{сж}$,

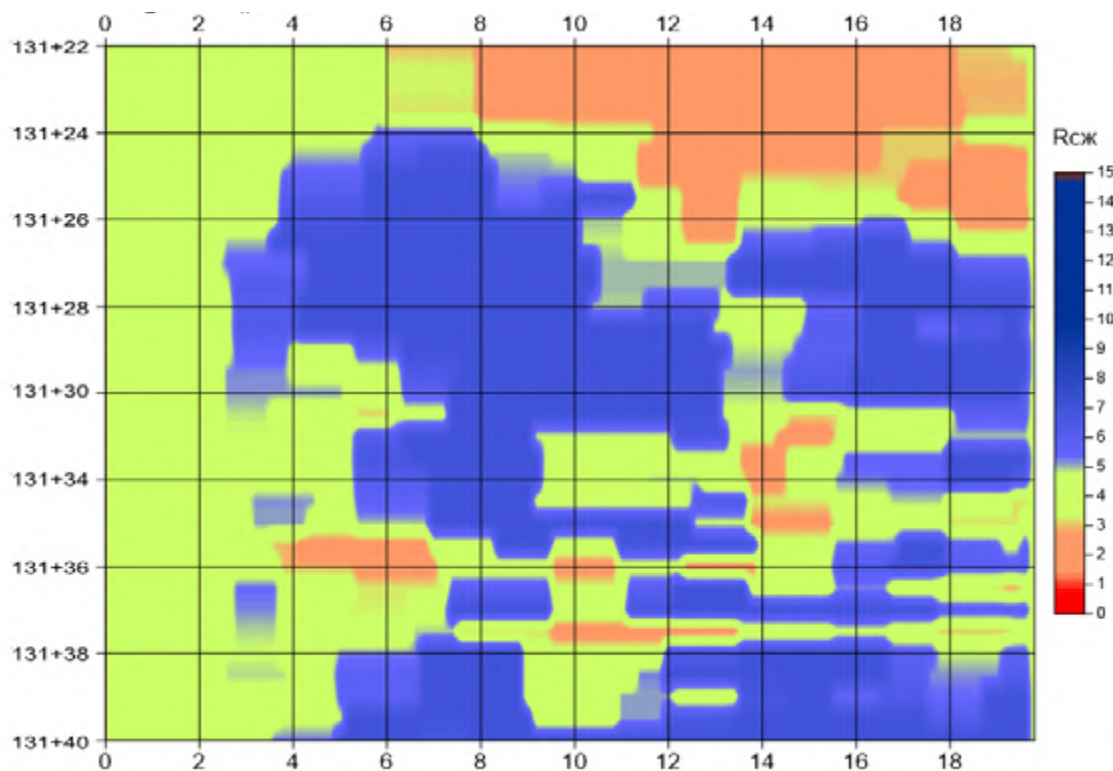


Рис. 2. Распределение динамической прочности, приведенной к $R_{сж}$

Результаты геодезического мониторинга деформаций

Марка 4									
Цикл наблюдений	X	Δ общ. +/- мм	Δ сут. +/- мм	Y	Δ общ. +/- мм	Δ сут. +/- мм	H	Δ общ. +/- мм	Δ сут. +/- мм
0	484,331	0	0	867,981	0	0	57,046	0	0
1	484,329	-2	-2	867,980	-1	-1	57,047	1	1
2	484,329	-2	0	867,979	-2	-1	57,048	2	1
3	484,331	0	2	867,981	0	2	57,051	5	3
4	484,329	-2	-2	867,975	-6	-6	57,052	6	1
5	484,326	-5	-3	867,976	-5	1	57,053	7	1
6	484,327	-4	1	867,975	-6	-1	57,052	6	-1
7	484,325	-7	-2	867,971	-10	-4	57,057	11	5
8	484,326	-5	1	867,975	-6	4	57,050	4	-7
9	484,326	-5	0	867,970	-11	-5	57,053	7	3
10	484,325	-6	-1	867,972	-9	2	57,052	6	-1
11	484,325	-6	0	867,972	-9	0	57,051	5	-1
12	484,327	-4	2	867,977	-4	5	57,053	7	2
13	484,327	-4	0	867,972	-9	-5	57,054	8	1
14	484,322	-9	-5	867,971	-10	-1	57,054	8	0
15	484,327	-4	5	867,969	-12	-2	57,053	7	-1
16	484,329	-2	2	867,974	-7	5	57,058	12	5
17	484,328	-3	-1	867,975	-6	1	57,052	6	-6
18	484,328	-3	0	867,964	-17	-11	57,053	7	1
19	484,328	-3	0	867,962	-19	-2	57,055	9	2
20	484,337	6	9	867,939	-42	-23	57,033	-13	-22
21	484,339	8	2	867,932	-49	-7	57,025	-21	-8
22	484,335	4	-4	867,922	-59	-10	57,023	-23	-2
23	484,332	1	-3	867,918	-63	-4	57,018	-28	-5
24	484,334	3	2	867,921	-60	3	57,018	-28	0
25	484,334	3	0	867,923	-58	2	57,023	-23	5
26	484,344	13	10	867,914	-67	-9	57,023	-23	0
27	484,345	14	1	867,916	-65	2	57,028	-18	5
28	484,354	23	9	867,906	-75	-10	57,015	-31	-13
29	484,352	21	-3	867,911	-70	5	57,025	-21	10
30	484,353	22	1	867,915	-66	4	57,017	-29	-8

варьируется в интервале 2,7–4,3 МПа в зоне активной разгрузки (до 6 м) и 4,1–7 МПа далее 6 м.

В период сооружения тоннеля наблюдения геодезическими методами выполнялись еженедельно, при необходимости частота циклов увеличивалась. При определении смещений порталных частей использовался способ свободного стационарирования [7]. Координаты марок определялись с помощью электронного

тахеометра, координаты которого получали обратной засечкой с ошибкой, не превышающей 5 мм.

Рассмотрим один из участков мониторинга в районе порталной зоны возводимого тоннеля. Суточные и накопленные величины смещений по осям координат, вычисленные по координатам деформационной марки 4, представлены в таблице.

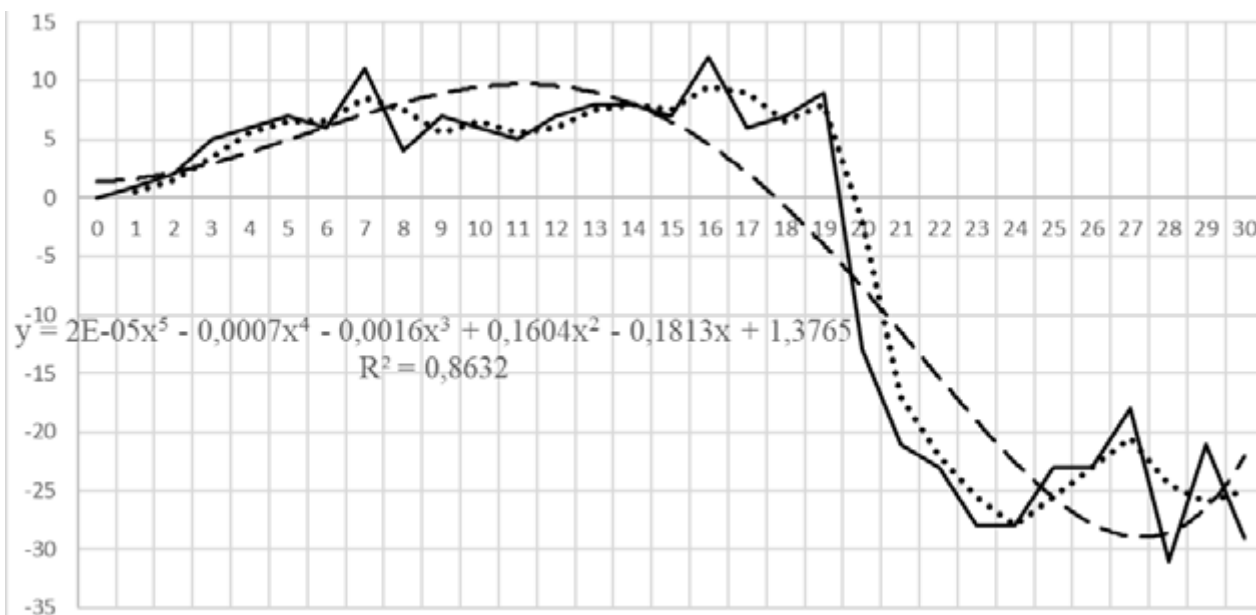


Рис. 3. Модель развития осадки

Для исключения мелких случайных колебаний и достоверного прогноза было произведено сглаживание рядов (точечный пунктир рис. 3) [8, 9]. В результате подбора прогнозной модели была определена полиномиальная функция (штриховой пунктир рис. 3). Перед экстраполяцией временного ряда по тенденции необходимо проверить остатки на нормальность распределения [10, 11].

Таким образом, анализ результатов комплексного мониторинга позволяет определять не только величины деформаций традиционными геодезическими замерами, но и определять расчетную устойчивость пород, мощность зоны разгрузки напряжений, глубину участков с понижением прочностных характеристик, гидрогеологические условия.

Заключение

При реализации комплексного мониторинга деформаций на различных этапах строительства данные наблюдений сравниваются с проектными (расчетными), после чего осуществляется оценка работы строительных конструкций, анализируется гидрогеологическая ситуация в массиве, его устойчивость. При необходимо-

сти результаты мониторинга используются для оперативного принятия решения о внесении изменений в проектную документацию при расчете конструкций обделки. Сбор данных о состоянии грунтового массива из разных источников позволяет делать достоверные выводы о безопасности горных работ и проверять их путем использования методов статистического анализа.

Библиографический список

1. Романевич К. В. Горно-экологический мониторинг при строительстве транспортных тоннелей в г. Сочи / К. В. Романевич // Вестник СГУТиКД. — 2011. — Вып. 3. — С. 272–278.
2. Bezrodniy K. P. An advanced underground imaging radar / K. P. Bezrodniy, V. B. Boltinzev, V. M. Efanov et al. // Proceedings of the World Tunnel Congress '99. — Norway, Oslo, 1999. — Pp. 31–34.
3. Пур Х. Ф. Разработка методов анализа деформаций подземных сооружений: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — МИИГАиК, 2007. — 24 с.
4. Подземное строительство. Современные методы устройства котлованов // Стройматериал. — 2011. — № 2. — URL: <http://psk-holding.ru/library/publication/>.

5. Технические рекомендации по научно-техническому сопровождению и мониторингу строительства большепролетных, высотных и других уникальных зданий и сооружений: ТР 182-08. — URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/54/54692/index.htm>.

6. Зайцев А. К. Геодезические методы исследования деформаций сооружений / А. К. Зайцев, С. В. Марфенко, Д. Ш. Михелев и др. — М.: Недра, 1991. — 272 с.

7. Курошев Г. Д. Геодезия и география / Г. Д. Курошев. — СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского гос. ун-та, 1999. — 372 с.

8. Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений: МДС 13-22.2009. — URL: <http://files.stroyinf.ru/Data1/59/59892/>.

9. Кендалл М. Многомерный статистический анализ и временные ряды / М. Кендалл, А. Стюарт / М.: Наука, 1976. — Т. 3. — 736 с.

10. Айвазян С. А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. — М.: Юнити, 1998. — 656 с.

11. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов / Т. Андерсон. — М.: Мир, 1976. — 757 с.

Дата поступления: 04.08.2022

Решение о публикации: 04.08.2022

Контактная информация:

БОБАРЫКИН Павел Владимирович — канд. техн. наук, доц.; 65465@pgups.ru

БОГОМОЛОВА Наталья Николаевна — канд. техн. наук, доц.; nbogomolova@pgups.ru

НЕМЧЕНКО Татьяна Михайловна — канд. техн. наук, доц.

Integrated Monitoring of Geological Environment in the Limits of Mining Allotment of Being Constructed Tunnel

P. V. Bobarykin, N. N. Bogomolova, T. M. Nemchenko

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

For citation: Bobarykin P. V., Bogomolova N. N., Nemchenko T. M. Integrated Monitoring of Geological Environment in the Limits of Mining Allotment of Being Constructed Tunnel // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 783–792. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-783-792

Summary

Purpose: To consider the example of the implementation of integrated monitoring based on various information collection and analysis on soil environment movements for further prognosis on massif state and timely corrections of construction decisions. To establish sequence and rhythm of monitoring implementation stages for to obtain timely information on soil massif state. To reveal possible ways of statistical processing of observation results for to ensure deformation development prediction reliability. **Methods:** No-touch registration method for electromagnetic emission, ground penetrating radar method, seismic-acoustics method, geodetic method, strain gauge method, statistical methods. **Results:** Possibility to embody deformation complex monitoring on certain example has been studied. Possible sequence of monitoring stages with the use of modern methods and technologies has been described. It has been shown that the collection of data on soil massif state from various sources makes it possible to make reliable conclusions on mining operation safety and to verify them by using statistical analysis methods. The results of real observations of deformations in the limits of mining allotment have been considered. Recommendations are given on observation organization during flank process activation.

It has been described the possibility of deformation monitoring organization with complex use of various means for measurement such as inclinometric probes, high precision levels, electronic tacheometers, load cells. Geodetic monitoring (geodetic measurements) of deformations during tunnel construction should be carried out. The paper considers the need to project and create geodetic monitoring planned-altitude networks serving as a base to make observations with required accuracy on offset of construction's structures and objects surrounding the construction. **Practical significance:** The results can be used in job organization to monitor offsets in excavation outputs, day surface (surrounding buildings) deformations, in the design of observation stations.

Keywords: Deformations, integrated monitoring, underground constructions, geodetic observations.

References

1. Romanevich K. V. Gorno-ekologicheskii monitoring pri stroitel'stve transportnykh tonneley v g. Sochi [Mining and environmental monitoring during the construction of transport tunnels in Sochi]. *Vestnik SGUTiKD* [Vestnik SGUTiKD]. 2011, I. 3, pp. 272–278. (In Russian)
2. Bezrodnii K. P., Boltinzev V. B., Efanov V. M., Iljakhin V. N., Tolstobrov M. G. An advanced underground imaging radar. Proceedings of the World Tunnel Congress'99. Norway, Oslo. 1999, pp. 31–34.
3. Pur Kh. F. *Razrabotka metodov analiza deformatsiy podzemnykh sooruzheniy. Kand. Diss* [Development of methods for analysis of deformations of underground structures. Cand. Diss]. MIIGAiK Publ., 2007. 24 p. (In Russian)
4. Podzemnoe stroitel'stvo. Sovremennye metody ustroystva kotlovanov [Underground construction. Modern methods of construction of pits]. *Stroymetall* [Stroymetall]. 2011, I. 2. Available at: <http://psk-holding.ru/library/publication/> (In Russian)
5. *Tekhnicheskie rekomendatsii po nauchno-tekhnikeskomu soprovozhdeniyu i monitoringu stroitel'stva bol'sheproletnykh, vysotnykh i drugikh unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy: TR 182-08* [Technical recommendations on scientific and technical support and monitoring of the construction of large-span, high-rise and other unique buildings and structures: TR 182-08]. Available at: <http://files.stroyinf.ru/Data1/54/54692/>. (In Russian)
6. Zaytsev A. K. *Geodezicheskie metody issledovaniya deformatsiy sooruzheniy* [Geodetic methods for studying the deformations of structures]. Moscow: Nedra Publ., 1991. 272 p. (In Russian)
7. Kuroshev G. D. *Geodeziya i geografiya* [Geodesy and geography]. St. Petersburg: S.Peterb. gos. un-t Publ., 1999. 372 p. (In Russian)
8. *Metodika geodezicheskogo monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya vysotnykh i unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy: MDS 13-22.2009* [Methodology for geodetic monitoring of the technical condition of high-rise and unique buildings and structures: MDS 13-22.2009]. Available at: <http://files.stroyinf.ru/Data1/59/59892/>. (In Russian)
9. Kendall M. *Mnogomernyy statisticheskiy analiz i vremennyye ryady* [Multivariate statistical analysis and time series]. Moscow: Nauka Publ., vol. 3, 1976. 736 p. (In Russian)
10. Ayvazyan S. A. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki* [Applied statistics and foundations of econometrics]. Moscow: "Yuniti" Publ., 1998. 656 p. (In Russian)
11. Anderson T. *Statisticheskiy analiz vremennykh ryadov* [Statistical analysis of time series]. Moscow: Mir Publ., 1976. 757 p. (In Russian)

Received: August 04, 2022

Accepted: September 16, 2022

Author's information:

Pavel V. BOBARYKIN — PhD in Engineering,

Associate Professor; 65465@pgups.ru

Natalia N. BOGOMOLOVA — PhD in Engineering,

Associate Professor; nbogomolova@pgups.ru

Tatiana M. NEMCHENKO — PhD in Engineering,

Associate Professor

УДК 621.336.7

Снижение воздействия воздушного потока на токоприемное устройство скоростного поезда с помощью аэродинамического обтекателя

Д. Д. Каримов

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

Для цитирования: Каримов Д. Д. Снижение воздействия воздушного потока на токоприемное устройство скоростного поезда с помощью аэродинамического обтекателя // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 793–799. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-793-799

Аннотация

Цель: Исследование аэродинамического воздействия на токоприемник скоростного поезда с помощью метода CFD-анализа в среде Flow Simulation программного обеспечения SolidWorks, с учетом неравномерности распределения скоростных потоков воздушных масс в надвагонной части подвижного состава. **Методы:** Теоретические исследования базировались на применении теории определяющих соотношений и методах механики сплошных сред. Математическое моделирование выполнялось на ПЭВМ с применением программных продуктов, использующих средства вычислительной гидрогазодинамики. **Результаты:** Разработана уточненная цифровая модель токоприемника, учитывающая характер взаимодействия в системе «токоприемник — контактный провод» в условиях аэродинамического сопротивления. **Практическая значимость:** Предложено устройство отклонения воздушных масс при обтекании токоприемника (спойлер), позволяющее устранить негативные воздействия аэродинамического сопротивления, заполнение снеговыми массами карманов конструкции, последствий обледенения рычажной системы.

Ключевые слова: Железнодорожная линия Ангрен — Пап, токоприемник, пантограф, аэродинамическое сопротивление, CFD-моделирование.

Строительство высокоскоростных железнодорожных магистралей в Узбекистане является важнейшей социально-экономической задачей современности, поскольку создает условия для повышения мобильности трудовых ресурсов, организации новых производств и экономического развития региона в целом.

Увеличение груза — пассажиропотока актуальная задача, стоящая перед отраслью [1]. Основной путь для ее решения — более широкое применение скоростного и тяжеловесного движения. Одна из главных проблем при этом — увеличение мощности, передаваемой по тяговой сети. В этих условиях повышается токовая нагрузка на

системы энергоснабжения, в свою очередь, повышаются динамические усилия, возникающие между контактной сетью и токоприемниками.

Работа токоприемника для определенных регионов Узбекистана осложняется особенностями метеоусловий, возникающих на участках движения в ущельях, плоскогорьях, где создаются микроклиматические условия образования температурных аномалий с разгоном воздушных масс до значительных скоростей, в качестве примера можно рассмотреть участок железнодорожной линии пути Ангрен — Пап [2]. Рост аэродинамического воздействия на токоприемник электроподвижного состава отрицательно сказывается на качестве токосъема: снижается надежность работы системы токосъема, при этом растут эксплуатационные расходы на обслуживание контактной сети и токоприемников.

Наиболее тяжелым режимом работы токоприемных устройств является сочетание гололеда с ветром. Гололедные отложения на поверхности контактного провода имеют очень высокое электрическое сопротивление, что вызывает при работе токоприемника на токосъеме сильное искрение, результатом которого является резкое ухудшение поверхностей провода и контактных элементов полоза (прожог каркаса).

Особенно опасным данное явление оказывается при строгании электроподвижного состава с места, когда токоприемник снимает большой ток, а контакт еще остается почти неподвижным, т. е. дуга воздействует на небольшой участок контактного провода.

Таким образом, токоприемник электроподвижного состава в определенных условиях эксплуатации может испытывать сложный режим нагружения сочетанием внешних силовых факторов механического и аэродинамического характера. В связи с чем задача совершенствования методов расчета режимов нагружения

токоприемника в данных условиях эксплуатации является актуальной.

Принимая во внимание многофакторный характер изучаемого процесса динамики работы токоприемника, наиболее целесообразным методом исследования является моделирование взаимодействия токоприемника с контактной подвеской в условиях сопротивления воздушной среды и воздействия климатических явлений.

При движении в высокоскоростном режиме в коридоре движения поезда возникает аэродинамическая вихревая воздушная волна.

Для оценки аэродинамического воздействия на токоприемник электроподвижного состава (ЭПС) в начале выполняется CFD-моделирование в трехмерной постановке задачи состояния среды при установленном аэродинамическом устройстве (рис. 2). На сегодняшний день одним из самых перспективных направлений в моделировании воздействия внешней среды на объекты является вычислительная гидрогазодинамика (Computational Fluid Dynamics — CFD) [3, 4]. В настоящее время CFD-исследования могут быть эффективно применены на железнодорожном транспорте для решения задач моделирования обтекания подвижного состава воздушной средой [5, 6], исследования аэродинамических характеристик токоприемника и определения эффективности его защитных устройств. Для уменьшения аэродинамического сопротивления и поддержания стабильного контакта токоприемника и контактной линии 1, а также предотвращения излома узлов токоприемника 2 электровоза предлагается конструкция 3, представленная на рис. 2.

Моделирование производилось в программном комплексе SolidWorks. Аэродинамический расчет проведен в среде модуля Flow Simulation. Исследование процесса производилось на основе аэродинамического обтекателя (и без него) при скорости электропоезда 200 км/ч.

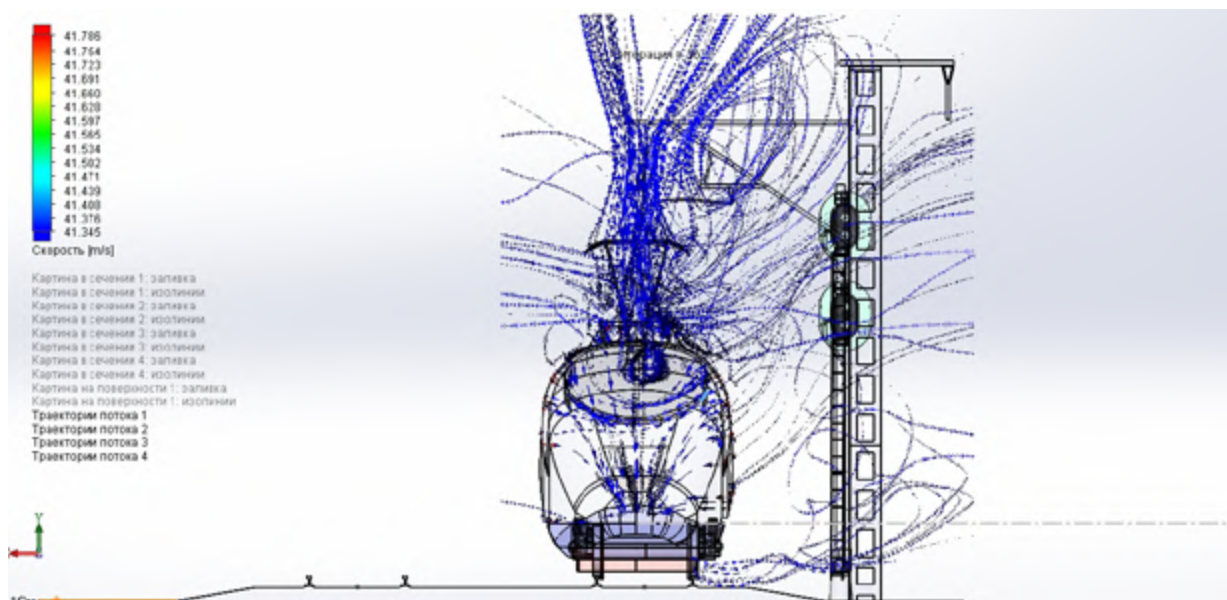


Рис. 1. Эпюра траекторий движения воздушных потоков при скорости ЭПС 200 км/ч

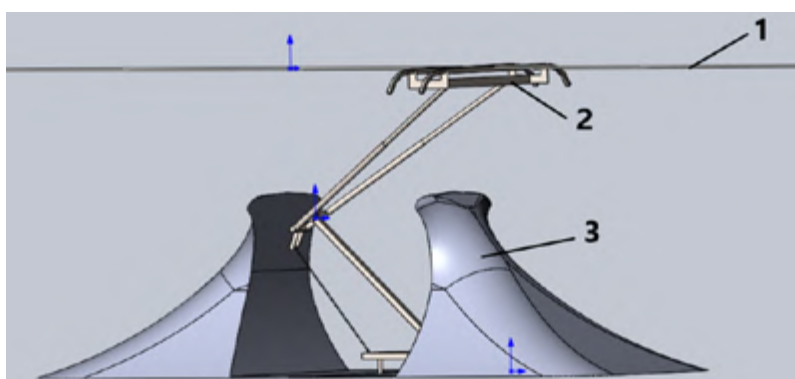


Рис. 2. Модель аэродинамического обтекателя токоприемника:
1 — контактный сеть; 2 — верхняя часть токоприемника; 3 — аэродинамические устройства

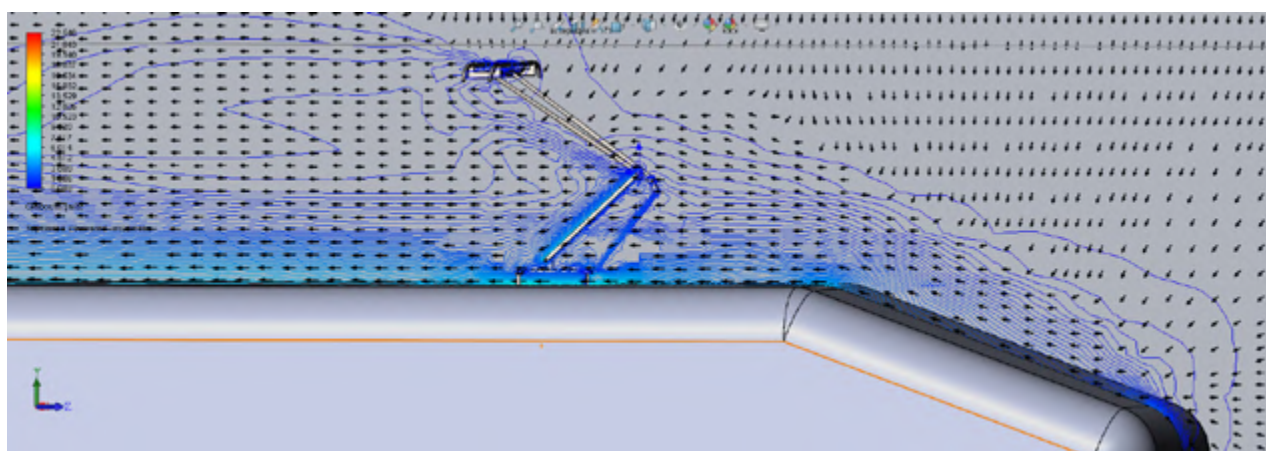


Рис. 3. Эпюра скорости обтекания воздушными массами потоками токоприемного устройства

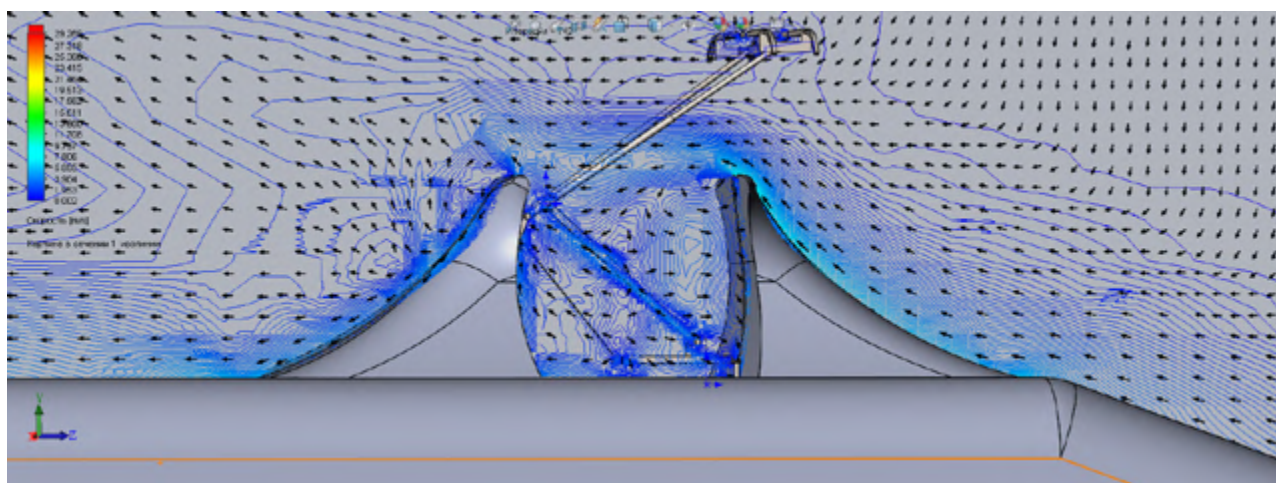
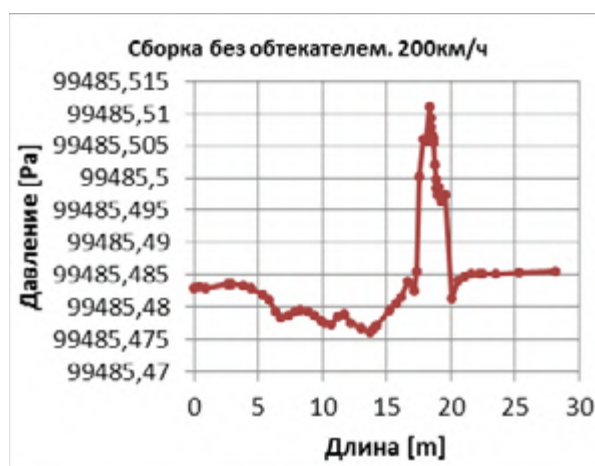
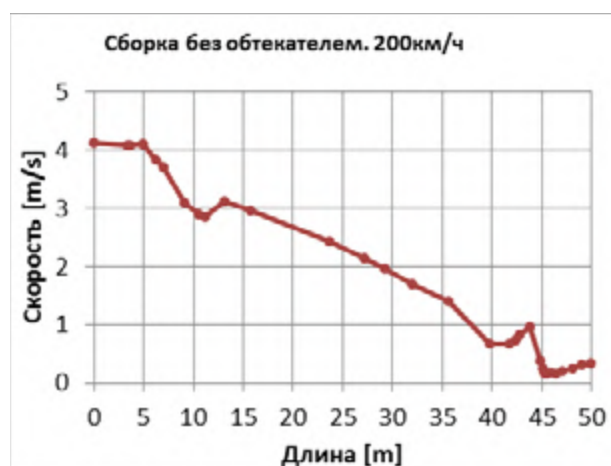
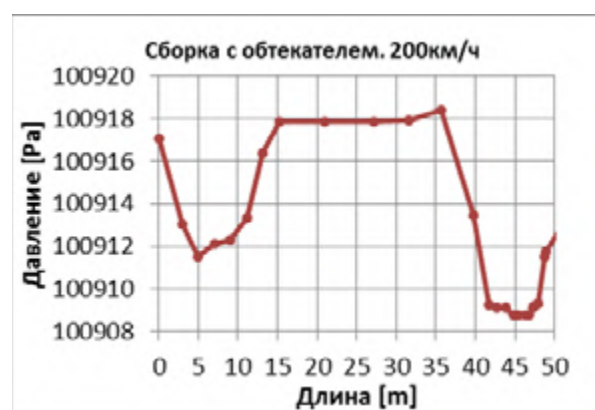
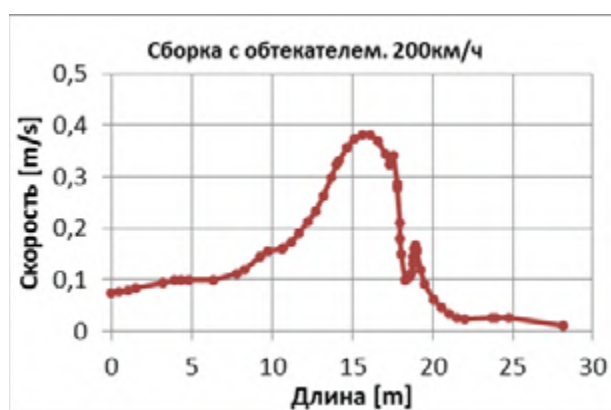


Рис. 4. Устройство формирования условия аэродинамической тени для токоприемника



a



б

Рис. 5. Зависимость параметров «скорость», «давление» воздушного потока при воздействии на токоприемное устройство ЭПС: *a* — сборка без обтекателя, *б* — сборка с обтекателем

При скорости ЭПС 200 км/ч давление воздушной среды на рабочую площадь токоприемника составляет около 99 485 Па, а скорость воздействующего потока воздуха будет равна 14–15 км/ч (рис. 3).

К особенностям условий эксплуатации железнодорожной линии Ангрэн — Пап относится резко континентальный, засушливый климат, что проявляется в значительных контрастах температуры окружающей среды [7]. Среднегодовая температура воздуха составляет 13,6 °С. Лето сухое, жаркое, максимальные температуры достигают 44,5 °С. Средняя температура воздуха в июле — +35,4 °С. Преобладающее направление ветра северо-восточное, средняя скорость ветра — 1,8 м/с, максимальная скорость ветра достигает 29 м/с. Изменение температуры воздушной среды по направлению движения поезда в значительной степени влияет на кинематический коэффициент вязкости воздуха, что определяет характер силового взаимодействия системы «пантограф — воздушная среда».

Из практики известны случаи повреждения (излома) узлов и деталей верхней части токоприемника при аэроупругом взаимодействии с набегающим потоком воздушных масс [8–10]. Кроме того, воздушное сопротивление вызывает потерю стабильного контакта токоприемника и контактной линии [11], что приводит к повышению энергозатрат и в конечном счете ухудшению качества грузопассажирских перевозок [12, 13].

Снизить влияние действующего аэродинамического сопротивления можно путем установки специального обтекающего элемента, формирующего условия аэродинамической тени для токоприемника (рис. 4).

На рис. 5, а показано воздействие скорости воздушного потока и давления на рабочую поверхность токоприемника [14] при отсутствии обтекателя. На рис. 5, б рассмотрены влияние скорости воздушного потока и давление на рабо-

чую поверхность токоприемника при варианте сборки с установленным обтекателем.

На основе предоставленных выше зависимостей можно сделать вывод, что с помощью аэродинамического обтекателя возможно уменьшить турбулентные явления воздушного потока в районе установки токоприемника, понизив скорость до 0,1–0,4 м/с, стабилизировать амплитуду аэродинамического давления, приблизив его к нормальному атмосферному давлению.

Библиографический список

1. Бизнес-план АО «УТЙ» на 2019 г. — Ташкент: АО «УТЙ», 2019. — 5 с.
2. Строительство новой электрифицированной железнодорожной линии Ангрэн — Пап: Предварительное технико-экономическое обоснование. Пояснительная записка. — Ташкент, 2012.
3. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorksSimulation / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2019. — 464 с.
4. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2015. — 562 с.
5. Gregoire R. Some considerations on the aerodynamics of high speed pantograph: CFD and wind tunnel tests / R. Gregoire, A. Collina, F. Resta et. al. // BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications. — Milano, Italy. 20–24 July 2008. — Pp. 66–69.
6. Гарбарук А. В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / А. В. Гарбарук, М. Х. Стрелец, М. Л. Шур. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — 88 с.
7. Бизнес-план АО «УТЙ» на 2020–2023 гг. — Ташкент: АО «УТЙ», 2020.
8. Чепурко А. Е. Повышение качества токосъема за счет применения новых аэродинамических устройств токоприемников электроподвижного состава / А. Е. Чепурко, В. Н. Яковлев // Инновационное развитие железнодорожного транспорта России: материалы Всероссийской

науч.-практ. конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск, 2012. — С. 128–135.

9. Воробьев А. А. Воздействие воздушного потока на аэродинамическое устройство для пантографа / А. А. Воробьев, Я. С. Ватулин, Д. Д. угли Каримов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Т. 18. — Вып. 4. — С. 453–459.

10. Каримов Д. Д. Повышение эффективности пантографа электроподвижного состава / Д. Д. Каримов, А. А. Воробьев // Системы автоматизированного проектирования на транспорте: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург, 27–28 апреля 2021 г. / ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. — С. 66–67.

11. Lee Y. Aerodynamic Characteristics of High Speed Train Pantograph with the Optimized Panhead Shape / Y. Lee, J. Rho, M. Kwak et al. // Proceedings of the 7th IASME/WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics: Retrieved 2011-02-16. — Pp. 84–88.

12. Маслов Г. П. Рациональная аэродинамическая характеристика токоприемника по условиям токосяема / Г. П. Маслов, А. Е. Чепурко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск, 2012. — № 3(11). — С. 34–40.

13. Мазнев А. С. Электрические аппараты и цепи подвижного состава: учебное пособие / А. С. Мазнев, О. И. Шатнев. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: ИНФРА-М., 2021. — С. 46–54.

14. ГОСТ 32204—2013. Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия. Введен в действие 01.06.2014. — М.: ФГУП «Стандартинформ», 2013. — 38 с.

Дата поступления: 26.06.2022

Решение о публикации: 30.08.2022

Контактная информация:

КАРИМОВ Дастонбек Давронбой угли — аспирант;
dostonkarimov325@gmail.com

Reducing Air Flow Effect on High-Speed Train Current Collector with the Help of Aerodynamic Cow

D. D. Karimov

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

For citation: Karimov D. D. Reducing Air Flow Effect on High-Speed Train Current Collector with the Help of Aerodynamic Cow // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 793–799. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-793-799

Summary

Purpose: Investigation of aerodynamic effect on high-speed train pantograph using CFD-analysis method in FlowSimulation environment of SolidWorks software given uneven distribution of air high-speed mass flows in atop-car part of a rolling stock. **Methods:** Theoretical research was based on the application of the theory of constructive relations and continuum methods. Mathematical modeling was performed on a PC applying software products which use the means of computational fluid dynamics. **Results:** Refined digital model of a current collector has been developed which takes into account interaction nature in “current collector — contact wire” system under aerodynamic drag conditions. **Practical significance:** Device for the deflection of air masses when flowing around a current collector (a spoiler) is proposed that makes it possible to get rid of negative effects of: aerodynamic drag, filling-in construction pockets with snow masses and lever system icing consequences.

Keywords: Railway track, railway line Angren-Pan, passenger transportation, current collector, pantograph, aerodynamic drag, frontal airflow, calculation of aerodynamic forces, aerodynamic device, CFD-modeling.

References

1. *Biznes – plan AO “UTY” na 2019 g.* [Business plan of UTY JSC for 2019]. Tashkent: AO “UTY” Publ., 2019. 5,6 p. (In Russian)
2. *Biznes – plan AO “UTY” na 2020–2023 g.* [Business plan of UTY JSC for 2020–2023]. Tashkent: AO “UTY” Publ., 2020. (In Russian)
3. *Stroitel'stvo novoy elektrifitsirovannoy zheleznodorozhnoy linii Angren – Pap: Predvaritel'noe tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie. Poyasnitel'naya zapiska* [Construction of a new electrified railway line Angren - Pap: Preliminary feasibility study. Explanatory note]. Tashkent, 2012. (In Russian)
4. Alyamovskiy A. A. *Inzhenernye raschety v SolidWorksSimulation* [Engineering calculations in SolidWorksSimulation]. Moscow: DMK Press Publ., 2019. 464 p. (In Russian)
5. Alyamovskiy A. A. *SolidWorks Simulation. Inzhenernyy analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii* [SolidWorks Simulation. Engineering analysis for professionals: tasks, methods, recommendations]. Moscow: DMK Press Publ., 2015. 562 p. (In Russian)
6. Chepurko A. E. *Povyshenie kachestva tokos"ema za schet primeneniya novykh aerodinamicheskikh ustroystv tokopriemnikov elektropodvizhnogo sostava* [Improving the quality of current collection through the use of new aerodynamic devices for current collectors of electric rolling stock]. *Innovatsionnoe razvitie zheleznodorozhnogo transporta Rossii: Materialy vserossiyskoy nauch.-prakt. konferentsii / Omskiy gos. un-t putey soobshcheniya* [Innovative development of railway transport in Russia: Materials of the All-Russian scientific and practical. conferences / Omsk state. University of Communications]. Omsk, 2012, pp. 128–135. (In Russian)
7. Vorob'ev A. A. *Vozdeystvie vozdushnogo potoka na aerodinamicheskoe ustroystvo dlya pantografa* [Influence of air flow on the aerodynamic device for a pantograph]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the St. Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, vol. 18, I. 4, pp. 453–459. (In Russian)
8. Maslov G. P. *Ratsional'naya aerodinamicheskaya kharakteristika tokopriemnika po usloviyam tokos"ema* [Rational aerodynamic characteristic of the pantograph according to current collection conditions]. *Izvestiya Transsiba / Omskiy gos. un-t putey soobshcheniya* [Izvestiya Transsib / Omsk State University. University of Communications]. Omsk, 2012, I. 3 (11), pp. 34–40. (In Russian)
9. Karimov D. D. *Povyshenie effektivnosti pantografa elektropodvizhnogo sostava* [Improving the efficiency of an electric rolling stock pantograph]. *Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya na transporte: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Computer-Aided Design Systems in Transport: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. St. Petersburg. 2021. FGBOU VO PGUPS Publ., 2021, pp. 66–67. (In Russian)
10. Maznev A. S. *Elektricheskie apparaty i tsepi podvizhnogo sostava* [Electric devices and rolling stock circuits]. Moscow: INFRA-M Publ., 2021, pp. 46–54. (In Russian)
11. *GOST 32204 – 2013. Tokopriemniki zheleznodorozhnogo elektropodvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [GOST 32204 - 2013. Pantographs of railway electric rolling stock. General specifications]. Moscow: FGUP «Standartinform» Publ., 2013. 38 p. (In Russian)
12. Garbaruk A. V. *Modelirovanie turbulentnosti v raschetakh slozhnykh techeniy* [Turbulence modeling in calculations of complex flows]. St. Petersburg: Politekhn. un-t Publ., 2012. 88 p. (In Russian)
13. Lee Y., Rho J., Kwak M. *Aerodynamic Characteristics of High Speed Train Pantograph with the Optimized Panhead Shape*. Proceedings of the 7th IASME/WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics: Retrieved 2011-02-16, pp. 84–88.
14. Gregoire R., Collina A., Resta F. et. al. *Some considerations on the aerodynamics of high speed pantograph: CFD and wind tunnel tests*. BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications. Milano, Italy. 20–24 July 2008, pp. 66–69.

Received: June 26, 2022

Accepted: August 30, 2022

Author's information:

Dostonbek D. KARIMOV — Postgraduate Student;
dostonkarimov325@gmail.com

УДК 656.07+06

Конфигурирование терминально-складской инфраструктуры транспортного узла на основе развития метода экономико-географического разграничения грузопотоков

О. Н. Числов^{1,2}, В. А. Богачев¹, В. В. Трапенов¹, Т. В. Богачев³, В. М. Задорожний^{1,2}

¹Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

²Университет «Сириус», пгт «Сириус», Российская Федерация, 354340, Сочи, Олимпийский пр., 1

³Ростовский государственный экономический университет, Российская Федерация, 344002, Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 69

Для цитирования: Числов О. Н., Богачев В.А., Трапенов В. В., Богачев Т. В., Задорожний В. М. Конфигурирование терминально-складской инфраструктуры транспортного узла на основе развития метода экономико-географического разграничения грузопотоков // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 800–811. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-800-811

Аннотация

Цель: Сформулировать предложения по конфигурированию терминально-складской инфраструктуре по размещению складских мощностей в транспортном узле. **Методы:** На основе анализа публикаций в направлении данных исследований применена оптимизационная геометрическая евклидова модель процесса грузоперевозок, осуществляемых на территории транспортного узла, для нахождения оптимального распределения грузопотоков путем разбиения его на части, представляющие собой «области влияния».

Результаты: В статье разработан на методах классического интегрального исчисления алгоритм оптимизации процесса грузоперевозок, который позволяет находить среди множества возможных местоположений распределительного центра те, которые с учетом комплекса ограничений позволят определить «область влияния» распределительного центра с наибольшей площадью, в отличие от первоначальной.

Практическая значимость: Получен экономический эффект от снижения базовой ставки за арендную плату из-за возможного изменения местоположения логистического грузового распределительного центра за пределы территории уплотненной городской застройки, где базовая ставка арендной платы больше.

Ключевые слова: Складская логистика, транспортный узел, логистический грузовой распределительный центр, экономико-географический метод, грузопотоки, торговая сеть, олигополистический рынок, дуополия, алгебраические кривые высшего порядка.

Введение

По итогам 2021 г. на российском логистическом складском рынке значимый рост показали услуги, непосредственно связанные с автомо-

бильными грузоперевозками. По данным электронной биржи автомобильных перевозок АТІ. SU, общее число заявок на перевозки в России в 2021 г. выросло на 46 % по сравнению с 2020 г.

и на 59 % по сравнению с 2019 г. Также следует отметить, что 2021 г. подстегнул спрос на грузовые складские емкости. В настоящее время уровень вакантных складских площадей в крупных регионах находится на рекордно низком за многие годы уровне — менее 3 %. Рост сегмента складской логистики, по мнению экспертов и игроков рынка, может продолжиться до 2025 г. Традиционный ритейл, логисты, дистрибьюторы, операторы нуждаются в современных складах, грузовых хабах и распределительных центрах.

В России на сегодняшний день не существует формальных критериев для классификации складских сооружений. Ключевыми факторами для классификации складской недвижимости были и остаются оснащение помещений и месторасположение зданий (рис. 1).

Международная компания Kight Frank, проводя анализ обеспеченности качественными складскими площадями (объекты класса *A* и *B*) в регионах России, пришли к выводу, что, как говорилось выше, объемы спроса ежегодно увеличиваются, но рынок качественной складской недвижимости по-прежнему находится на стадии развития. Если же говорить о цифрах, то важным показателем насыщенности складской сети можно отметить, сколько приходится кв. м складских площадей класса *A* и *B* на одного жителя. Сравнивая этот показатель с другими лидирующими странами в данном сегменте (рис. 2), можно сказать, что российский рынок еще далек от своего насыщения.

Показатель 0,2 м²/чел. не относится ко всем регионам России одинаково. Основная концентрация складских площадей класса *A* и *B* приходится на Московскую и Ленинградскую области, порядка 67 %, здесь уже этот показатель составляет 0,9 м²/чел. и 0,6 м²/чел. В остальных регионах ситуация также неоднозначная, так как зависит от регионов. В этих регионах складская недвижимость обеспечивает не только крупные

городские агломерации, в которых они располагаются, но и соседние регионы, выступая в роли логистического грузового распределительного центра (ЛГРЦ).

Размещение на территории транспортного узла ЛГРЦ представляет собой многоцелевую и комплексную задачу, постановка и решение которой подразумевают обработку и анализ значительных массивов различной информации, а также проведение соответствующих расчетов. Исследованию указанных вопросов посвящен ряд работ [1–5].

Например, в [3] показано успешное применение многокритериального интеграла Шоке к реальной задаче выбора местоположения склада крупной турецкой логистической фирмы.

Размещение распределительного грузового центра для предприятия предложено решать эвристическим методом определения «центра тяжести» [4].

Учитывая качественные критерии при выборе местоположения склада, в [5] применяется метод анализа иерархий. Сущность метода состоит в разбиении проблемы на простые составные части и последующей обработке попарными сравнениями.

Стремление к сокращению расходов во всех звеньях транспортно-логистических цепей ставит задачу поиска таких местоположений ЛГРЦ, которые оказываются оптимальными в данных условиях и с учетом предъявляемых требований. Отметим, что к понятию оптимальности можно подходить с разных точек зрения. Однако подразумевается получение ответов, по крайней мере, на два взаимосвязанных вопроса:

1. Какое количество ЛГРЦ является целесообразным и где при этом они должны располагаться?
2. Какую потребительскую территорию (с организационной и экономической точек зрения) целесообразнее обслуживать каждому из рассматриваемых ЛГРЦ?

Основные характеристики	Склады класса "А"	Склады класса "В"	Склады класса "С"	Склады класса "D"
Характеристика здания	новые одноэтажные складские здания прямоугольной формы из легких металлоконструкций без колонн, или с колоннами с шагом 6-10 м.	одно или двухэтажные складские здания, новое строительство или реконструированные	ангары, производственные помещения, новые или реконструированные	неотапливаемые производственные помещения и ангары, подвальные помещения
Характеристика помещений	ровный бетонный пол с антипыльным покрытием, с нагрузкой - 5 тн на кв.м. Высота потолков не менее 12 метров	Высота потолков от 6 метров, пол – асфальт или бетон без покрытия	высота потолков от 4 метров, пол – асфальт или бетонная плитка, бетон без покрытия	высота потолков - не регламентируется, пол - ограниченно пригоден для движения транспорта
Расположение объекта	расположены вблизи центральных магистралей, желательно наличие железнодорожной ветки	удобные подъездные пути, близость магистралей, железнодорожно ж/д ветка	транспортная доступность для большегрузных автомобилей	наличие дороги для автотранспорта
Техническое оснащение	система вентиляции, регулируемый температурный режим, система пожарной сигнализации и автоматическая система пожаротушения, система охранной сигнализации и видеонаблюдения, опτικο-волоконные телекоммуникации, система доступа.	не менее одного грузозахватного лифта на каждые 2000 кв.м., система отопления, пожаротушения, охранной сигнализации и система видеонаблюдения, телекоммуникации	наличие грузовых лифтов, системы отопления, телекоммуникации	необязательное наличие механизмов для погрузки-разгрузки и транспортировки грузов
Транспортная инфраструктура	площадки для большегрузных автомобилей, площадки для маневрирования большегрузных автомобилей	площадки для отстоя и маневрирования большегрузных автомобилей, пандус для разгрузки автотранспорта	место для маневрирования и загрузки-выгрузки автотранспорта	нет
Дополнительные условия	офисные и вспомогательные помещения, туалеты, душевые, подсобные помещения, раздевалки	вспомогательные помещения для персонала	вспомогательные помещения для персонала	наличие вспомогательных помещений на территории

Рис. 1. Классификация складов по классам

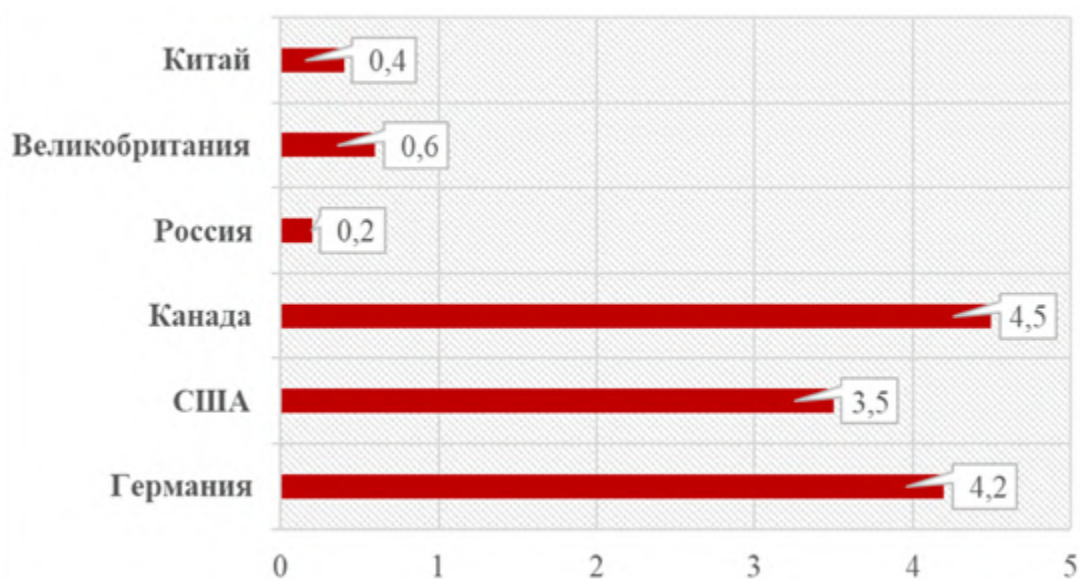


Рис. 2. Мировая обеспеченность складской недвижимостью, м²/чел.

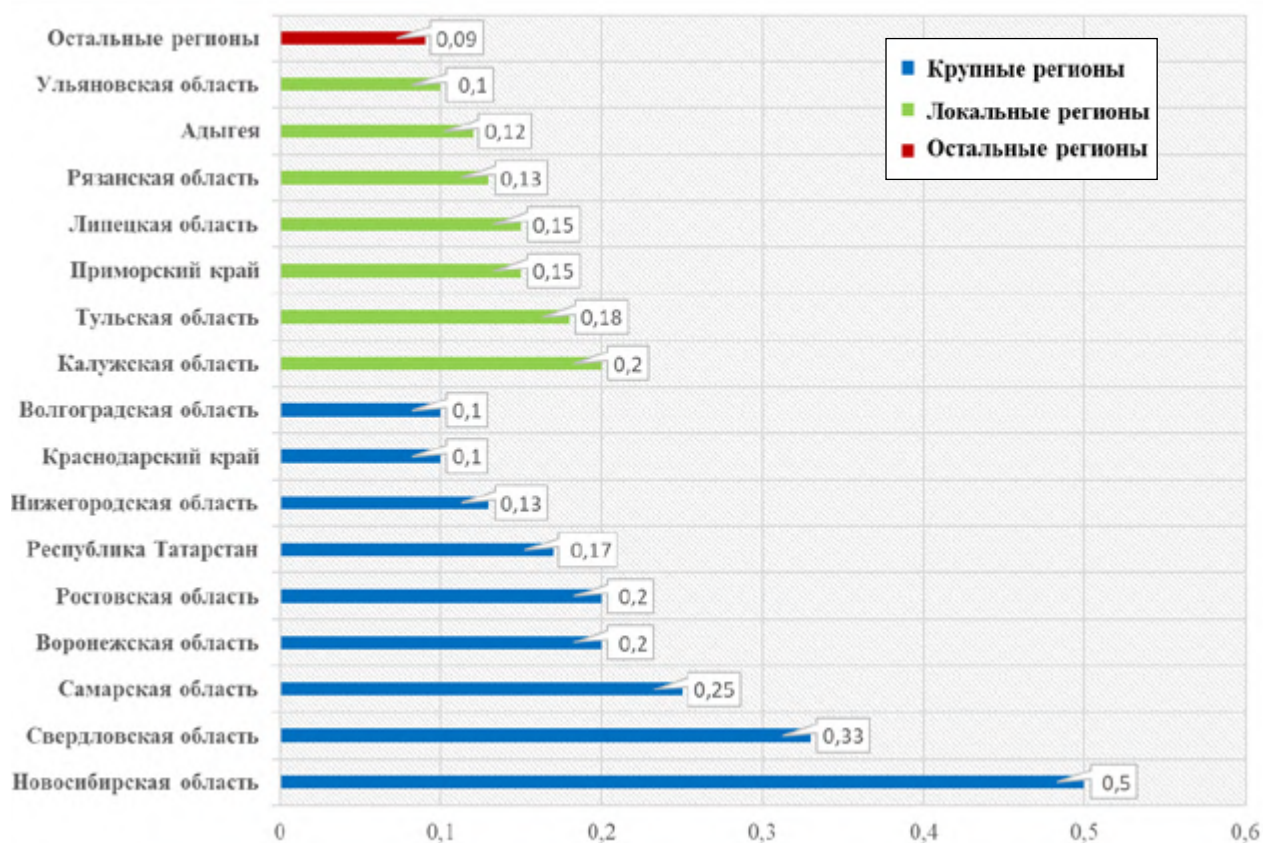


Рис. 3. Региональная обеспеченность складской недвижимостью, м²/чел.

Для решения указанной задачи используются аналитические и оптимизационные методы (вторые, как правило, основаны на задаче линейного программирования), а также методы имитационного моделирования. Чаще всего, исходя из сочетаний таких параметров, как расстояние транспортировки и вес грузовых отправок, путем расчетов находят «центры тяжести» географического местоположения существующих ЛГРЦ, а также возможных новых. Однако реальные условия эксплуатации зачастую требуют последующей корректировки полученных результатов.

Очевидный и простой способ повышения качества обслуживания клиентов состоит в том, чтобы переместить географический «складской центр тяжести» какого-либо из распределительных центров как можно ближе к тем областям, на которых в большей степени сконцентрированы потребители рассматриваемых транспортно-логистических услуг. При оптимизационном моделировании местоположений ЛГРЦ обычно учитываются как расстояния между этими центрами и крупнейшими кластерами (зонами) клиентов, так и местоположения источников входящих грузопотоков (то есть предприятий-производителей, грузовых железнодорожных станций и автомобильных хабов и т. п.), которыми обеспечивается функционирование предыдущих звеньев логистической цепи. В большинстве случаев снабжение грузами осуществляется не от одного производственного предприятия или центрального склада и ЛГРЦ имеют весьма обширную географическую базу поставщиков.

Если сформулировать коротко, то целью настоящих исследований является разработка метода нахождения на территории транспортного узла таких местоположений ЛГРЦ, которые являются оптимальными в рамках имеющихся ограничений. При этом могут варьироваться подходы, используемые для выявления зон охвата потребителей распределительными центрами (и коли-

чество этих центров), части территории транспортного узла, на которых могут находиться эти центры, а также природа ограничений, накладываемых на расположение центров, и иерархии в этих ограничениях.

Теоретические основы метода

Рассмотрим далее применение и отличие авторского метода экономико-географического разграничения «областей влияний» транспортных объектов от рассмотренных в работах [2–4]. Важным является то, что в рассматриваемых исследованиях построение оптимизационной геометрической евклидовой модели позволяет находить наилучшие варианты распределения грузопотоков путем разбиения их на части согласно размерам областей обслуживания. Также следует отметить, что впервые в транспортно-логистических исследованиях применены и изучены алгебраические кривые высших порядков в разграничении областей влияний, что позволяет наиболее точно учитывать область территории, обслуживаемой железнодорожной станцией (терминалом, портом и т. п.).

Геометрическая идея подхода в транспортно-логистических исследованиях, содержащаяся в работе [6], получила существенное развитие в статьях [7–10]. Метод экономико-географического разграничения «областей влияния» ЛГРЦ позволяет строить *геометрическую евклидову модель (ГЕМ)* территориального олигополистического рынка грузовых перевозок в рассматриваемом регионе. В этой модели реальная ситуация «идеализируется» в том смысле, что все транспортные маршруты подразумеваются прямолинейными, и поэтому их длинами являются евклидовы расстояния между началами и концами транспортировки груза. Как и в предыдущих исследованиях, в настоящей работе предполагается, что зависимость стоимости с перевозки грузов от длины l маршрута является линейной. Приведем краткое

описание основ ГЕМ в случае дуополии складского рынка.

На плоской географической карте рассматриваемого региона введем декартову систему координат. Если расстояние между 1-м и 2-м дуополистами (то есть станциями погрузки или же, как в настоящей работе, распределительными центрами) равно L (км), то будем предполагать, что они находятся соответственно в точках $O(0, 0)$ и $A(L, 0)$. Это предположение является условным и вводится для того, чтобы при построении математической модели можно было воспользоваться методом аналитической геометрии. Разграничение «областей влияния» указанных дуополистов будет осуществляться в соответствии со стоимостью перевозки грузов от их местоположения до пунктов назначения. Эти пункты могут находиться, вообще говоря, в любых точках рассматриваемой плоской карты. Пусть p_i — стоимость начально-конечных операций, а q_i — стоимость движенческих операций на 1 км пути, приходящихся на одну транспортную единицу для i -го дуополиста ($i = 1, 2$). Линия, разграничивающая «области влияния» дуополистов, записывается неявным уравнением вида:

$$p_1 + q_1 \sqrt{x^2 + y^2} = p_2 + q_2 \sqrt{(x - L)^2 + y^2}. \quad (1)$$

Отметим, что равенством (1) записывается целый набор алгебраических линий 2-го и 4-го порядков. При этом существенное значение имеют соотношения между параметрами L, p_i и q_i ($i = 1, 2$). Приведем несколько пояснений как геометрического, так и логистического характера в отношении некоторых из этих линий.

В простейших случаях, когда $p_1 = p_2$ и $q_1 \neq q_2$, уравнением (1) задаются окружности. Если же $q_1 = q_2$ и $p_1 \neq p_2$, то в зависимости от величины L линия может оказаться ветвью гиперболы, прямолинейным лучом или пустым множеством. Таким образом, в указанных здесь нетривиальных

случаях получаются алгебраические линии 2-го порядка. Линии, имеющие гораздо более сложную аналитическую и геометрическую природу, получаются, когда у рассматриваемых дуополистов отличаются как стоимости начально-конечных операций, так и стоимости движенческих операций. Например, если $p_1 > p_2$ и $q_1 < q_2$, то задаваемая уравнением (1) алгебраическая линия может иметь 4-й порядок, точнее, представлять собой улитку Паскаля [8–10].

В отношении «неравноправия» в «областях влияния» рассматриваемых дуополистов обратим внимание на то, что (как и окружность) улитка Паскаля, в отличие, например, от гиперболы, является ограниченной линией на плоскости. Поэтому в случаях, когда $p_1 > p_2$ и $q_1 < q_2$, ограничиваемая этой линией «область влияния» 2-го дуополиста является ограниченным множеством на плоскости [7, 8]. Таким образом, несмотря то, что стоимость начально-конечных операций у 1-го дуополиста может быть существенно больше, чем у 2-го дуополиста, 1-й оказывается более конкурентоспособным в грузоперевозках во все достаточно удаленные пункты назначения.

Отметим теперь, что если в уравнении (1) предположить $p_1 = p_2$ и $q_1 = q_2$, то получится (как и следовало ожидать), что «области влияния» дуополистов разграничены прямой линией $x = \frac{L}{2}$.

Предварительный этап построения математической модели

С общей экономической точки зрения изучаемая в настоящей работе ситуация в отношении ЛГРЦ представляет собой олигополию. Выступающие в качестве олигополистов распределительные центры конкурируют между собой на рынке предоставляемых в регионе транспортно-логистических услуг. Экономико-географический метод разграничения «областей влияния» распределительных центров позволяет выявить

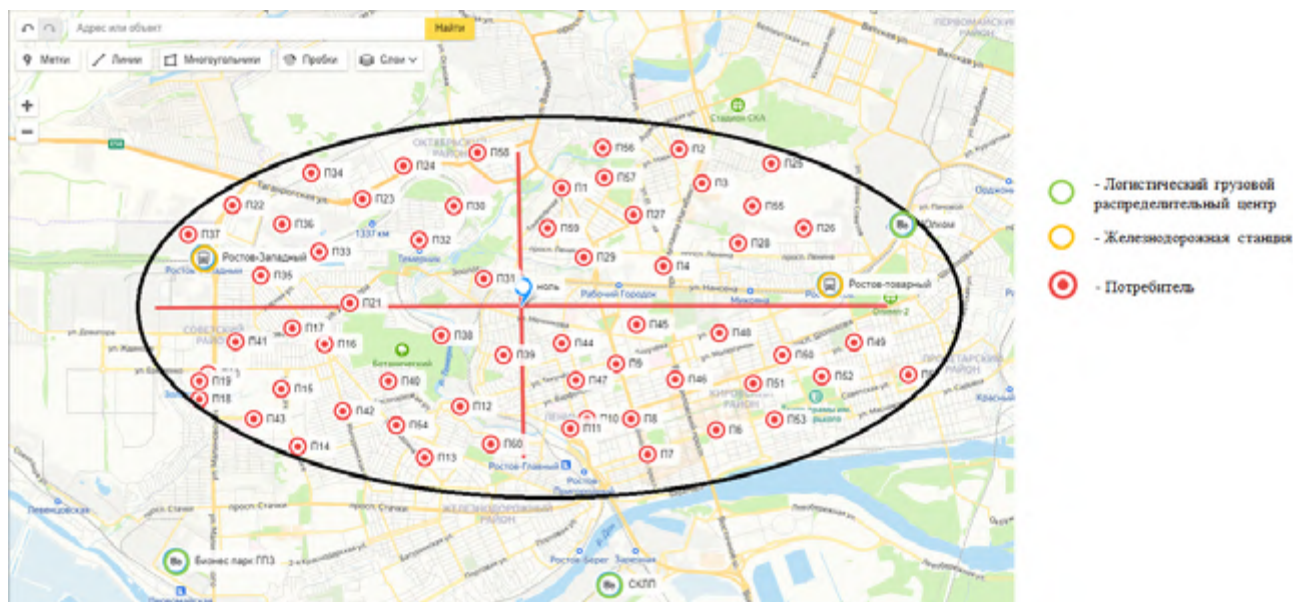


Рис. 4. Схематическое изображение части транспортно-складской инфраструктуры транспортного узла «Р»

зоны обслуживания, которые расположены в рассматриваемом регионе и в соответствии со стоимостью грузоперевозок могут быть отнесены к какому-либо из олигополистов.

Объектом применения, разработанного в статье модифицированного метода экономико-географического разграничения «областей влияния», является логистическая складская инфраструктура транспортного узла «Р». Исходим из того, что на основной части территории города (см. рис. 4) располагается равномерно распределенный массив потребителей услуг, предоставляемых уже имеющимися ЛГРЦ, а также распределительными центрами, получаемыми перемещением каких-либо из этих центров или центрами, введенными дополнительно. При построении математической модели соответствующего транспортно-логистического процесса границу указанного массива (то есть основной, наиболее уплотненной застроенной части городской территории) представим в виде некоторого эллипса. Такая геометрическая интерпретация объясняется тем, что, как и транспортный узел «Р», указанная территория вытянута вдоль реки (рис. 4).

В настоящей работе будем предполагать, что относящееся к железнодорожным перевозкам звено логистической цепи представлено двумя грузовыми станциями «Т» и «З». С этих станций тарно-штучные грузы доставляются автомобильным транспортом в три ЛГРЦ: «Г», «С» и «Ю». Далее в результате выполнения комплекса транспортно-складских и логистических услуг грузы из распределительных центров попадают в розничную торговую сеть. Напомним, что представляющие потребителей пункты розничной торговли равномерно распределены на территории, ограниченной указанным на рис. 4 эллипсом. Кроме двух грузовых железнодорожных станций, рассматриваемые ЛГРЦ могут получать продукцию в ассортименте от целого ряда производственных предприятий, а также некоторого центрального склада.

Предполагается также, что все внутриузловые грузоперевозки, начиная от железнодорожных станций, осуществляются автомобильным транспортом. Отметим, что разработанный в статье модифицированный экономико-географический метод разграничения «областей влияния» ЛГРЦ

является универсальным в отношении наземных видов транспорта и применим также и к мультимодальным грузоперевозкам.

Построение математической модели транспортно-логистического процесса методом экономико-географического разграничения предполагает выполнение некоторого предварительного анализа рассматриваемой ситуации. После обработки методом наименьших квадратов данных, предоставляемых электронной биржей автомобильных перевозок АТІ.SU, есть основания предполагать, что для каждого из ЛГРЦ стоимость c (тыс. руб.) перевозки одной транспортной единицы к потребителям линейным образом зависит от длины l (км) пройденного маршрута. То есть имеет место равенство:

$$c = p + ql, \quad (2)$$

в котором коэффициенты p и q представляют собой соответственно стоимость начально-конечных операций и стоимость движенических операций на 1 км пути, приходящихся на одну транспортную единицу. Для трех рассматриваемых ЛГРЦ и автомобилей грузоподъемностью до 5 т величина q оказалась одинаковой и равной 1 тыс. руб./км. Решение начнем с рассмотрения случая, когда величина p для всех центров также одинакова и равна 0 тыс. руб./км.

Оптимизация распределений грузопотоков модифицированным методом экономико-географического разграничения

Перейдем непосредственно к построению *оптимизационной геометрической евклидовой модели (ОГЕМ)* процесса грузоперевозок, осуществляемых на территории рассматриваемого транспортного узла. Эта модель позволит найти оптимальные (в том смысле, как это определено ниже) распределения грузопотоков в данном регионе путем разбиения его на части, представля-

ющие собой «области влияния» ЛГРЦ, входящих в транспортный узел. Напомним, что из распределительных центров грузоперевозки выполняются напрямую в пункты розничной торговой сети.

В отношении транспортного узла «Р», который рассматриваем в качестве конкретного примера, обратим внимание на следующее обстоятельство. В настоящее время распределительный центр «Ю» находится на территории уплотненной городской застройки, граница которой при построении математической модели процесса грузоперевозок представлена эллипсом, изображенным на рис. 4. Поэтому для указанного центра размер арендной платы может быть значительно выше, чем для центров «Г» и «С», которые находятся вне эллипса. Указанные обстоятельства могут влиять (в частности, в зависимости от налоговой ситуации в данном регионе) на суммарную стоимость производимых на центре «Ю» начально-конечных операций. Учитывая сказанное, в рамках задачи конфигурирования терминально-складской инфраструктуры транспортного узла рассмотрим вопрос об изменении местоположения именно этого распределительного центра. Решение соответствующей оптимизационной задачи будет представлять собой нахождение такого (вообще говоря, отличного от первоначального) местоположения «Ю», при котором с учетом данного комплекса ограничений «область влияния» этого распределительного центра имеет наибольшую площадь. Таким образом, в качестве подлежащей максимизации целевой функции будем рассматривать площадь «области влияния» распределительного центра, который интересует нас в данной ситуации в первую очередь.

Разработанный в статье алгоритм оптимизации процесса грузоперевозок, основанный на методах классического интегрального исчисления, позволяет находить среди множества возможных местоположений распределительного

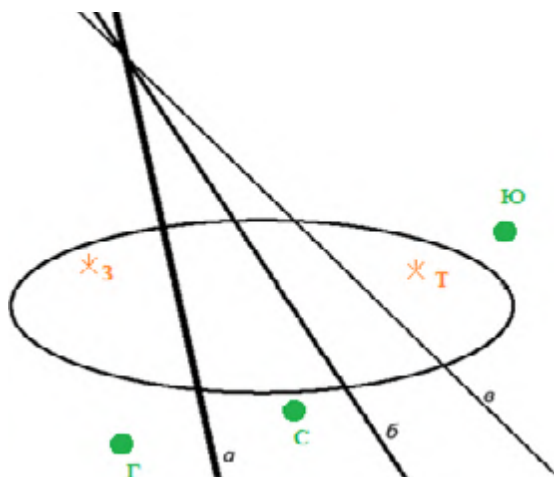


Рис. 5. Разбиение территории уплотненной городской застройки в результате первой итерации

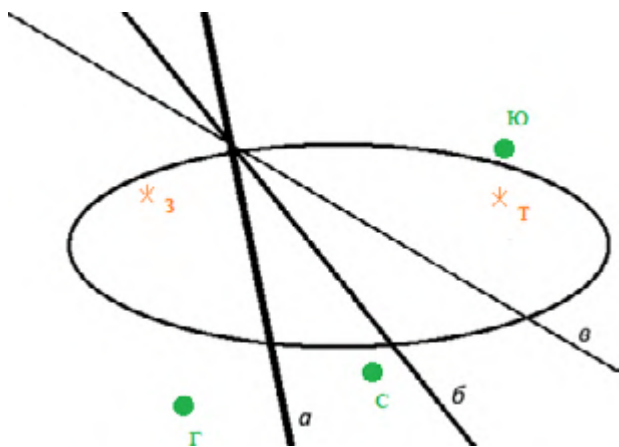


Рис. 6. Разбиение территории уплотненной городской застройки в результате предпоследней итерации

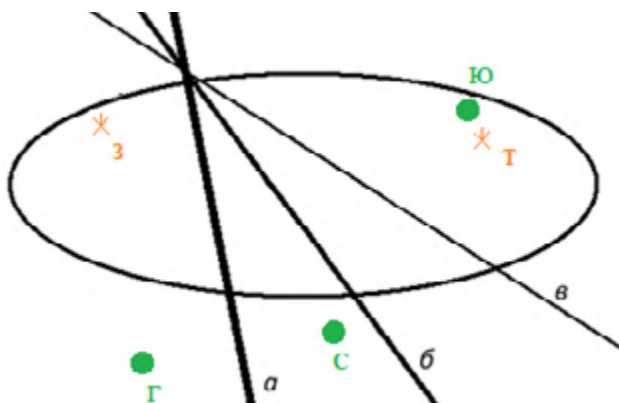


Рис. 7. Разбиение территории уплотненной городской застройки в результате последней итерации

центра те, которые дают решение сформулированной выше задачи. Соответствующие вычислительные процедуры выполнены в среде Maxima (Free Ware) и опираются на аналитические и графические возможности этой системы компьютерной математики.

Предполагается, что начало декартовой системы координат (которая имеет условный характер) находится в месте расположения администрации города «Р». На рис. 5–7 приведены результаты первой и двух последних итераций, выполненных программным модулем Maxima в процессе реализации указанного оптимизационного алгоритма. Каждый из результатов представляет собой разбиение территории уплотненной городской застройки на «области влияния» трех рассматриваемых распределительных центров. Поясним, что для дуополий «Г» — «С», «Г» — «Ю» и «С» — «Ю» указанные разбиения осуществляются прямыми a , b и c . Результат первой итерации показывает, что новое местоположение распределительного центра «Ю» определяется координатами $x = 8$ (км) и $y = 1,6$ (км). В соответствующем разбиении основной, наиболее уплотненно застроенной части городской территории (то есть массива потребителей услуг, предоставляемых рассматриваемыми ЛГРЦ) «область влияния» этого распределительного центра представляет собой часть внутренности эллипса, расположенную правее прямой c и имеющую площадь, равную 16,77 кв. км. При этом наибольшей оказывается равная 36,21 кв. км площадь «области влияния» центра «С», представляющая собой часть внутренности эллипса, которая расположена между прямыми a и b .

Обратим внимание на то, что последнюю, выполняемую в процессе оптимизации итерацию мы определили тем условием, чтобы точка пересечения прямых a , b и c приблизилась вплотную к эллипсу (рис. 7). Сделаем здесь общее замечание. В соответствии с содержанием метода эконо-

мико-географического разграничения «областей влияния» станций погрузки и согласно свойству транзитивности отношения равенства в каждом случае три рассматриваемых линии a , b и c должны пересекаться в одной точке.

Заключение

Итак, полученные результаты показывают, что оптимальным (в рамках поставленной задачи) является местоположение «Ю», определяемое координатами $x = 5$ км и $y = 1,6$ км (рис. 6). В соответствующем разбиении «область влияния» этого центра есть часть внутренности эллипса, расположенная правее прямой c и имеющая площадь, равную 28,09 кв. км. В этом случае площадь «области влияния» центра «С» (представляющей собой часть внутренности эллипса, расположенную между прямыми a и c) оказывается равной 24,89 кв. км.

В заключение покажем на примере, насколько в рассматриваемой ситуации усложняется территориальная картина распределения грузопотоков методом экономико-географического разграничения «областей влияния» распределительных центров, если у этих центров оказываются различными затраты p на начально-конечные операции — см. формулу (2). На рис. 8 приведено полученное в программном модуле Maxima разбиение территории уплотненной городской застройки в случае, когда $p_1 = 10,5$ тыс. руб./тр.ед., $p_2 = 14,6$ тыс. руб./тр.ед., $p_3 = 17,7$ тыс. руб./тр.ед.

В качестве линий a , b и c , разделяющих «области влияния» трех рассматриваемых распределительных центров в дуополистических ситуациях, выступают ветви гипербол. В этом случае «область влияния» центра «Ю» представляет собой часть внутренности эллипса, расположенную правее ветви гиперболы c . После всех итераций в программе Maxima и определения оптимальной «области влияния» для ЛГРЦ при одном и том же пройденном маршруте на рассматрива-

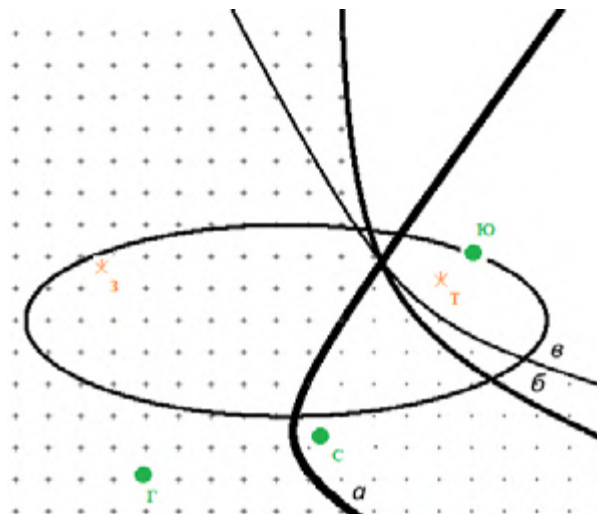


Рис. 8. Разбиение территории уплотненной городской застройки при различных стоимостях начально-конечных операций у центров

емой территории количество потребительских услуг может измениться посредством корректировки коэффициентов модели.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и образовательного фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51014.

The reported study was funded by RFBR, Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund «Talent and success», project number 20-38-51014.

Библиографический список

1. Числов О. Н. Методы формирования и принципы интеллектуализации в управлении терминально-складской системой транспортного узла / О. Н. Числов, В. В. Трапенов, В. В. Алабина и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 1(81). — С. 104–114. — DOI: 10.46973/0201-727X_2021_1_104.
2. Гусев С. Проблемы определения местоположения склада / С. Гусев // Логистика. — 2011. — № 2(55). — С. 53–55.

3. Demirel T. Multi-criteria warehouse location selection using Choquet integral / T. Demirel, N. Çetin Demirel, C. Kahraman // *Expert Systems with Applications*. — Vol. 37. — Iss. 5, May 2010. — Pp. 3943–3952.

4. Харитонов Д. М. Определение оптимального места расположения распределительных центров / Д. М. Харитонов // *Наука в современном мире: приоритеты развития*. — 2019. — № 1(5). — С. 124–129.

5. Кусраева Р. Ю. Выбор местоположения склада с помощью метода анализа иерархий / Р. Ю. Кусраева // *Евразийское научное объединение*. — 2017. — Т. 2. — № 6(28). — С. 122–128.

6. Крыньский Х. Э. Математика для экономистов / Х. Э. Крыньский. — М.: Статистика. 1970. 580 с.

7. Chislov O. N. Modelling of the rail freight traffic by the methods of economic-geographical delimitation in the region of the south-easter coast of the Baltic sea / O. N. Chislov, V. A. Bogachev, V. M. Zadorozhnyi et al. // *Transport Problems, SUT*. — 2019. — Vol. 14. — № 2. — Pp. 77–87. — DOI: 10.20858/tp. 2019.14.2.7.

8. Chislov O. N. Methods of Analytical Modeling the Process of Freight Transportation Management in the Regional Transport Complex / O. N. Chislov, V. M. Zadorozhnyi, V. A. Bogachev et al. // *Decision Support Methods in Modern Transportation Systems and Networks, Lecture Notes in Networks and Systems, Springer*, 2021. — Pp. 197–210. — DOI: 10.1007/978-3-030-71771-1_13.

9. Числов О. Н. Распределение вагонопотоков операторской компании в припортовых транспортных узлах методом экономико-географического разграничения / О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. М. Задорожний и др. // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2016. — № 3(48). — С. 302–313.

10. Chislov O. N. Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation system / O. Chislov, V. Bogachev, V. Zadorozhnyi et al. // *Transport Problems, SUT*, 2021. — Vol. 16. — № 2. — Pp. 141–152. — DOI: 10.21307/tp-2021-031.

Дата поступления: 21.06.2022

Решение о публикации: 16.09.2022

Контактная информация:

ЧИСЛОВ Олег Николаевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой; o_chislov@mail.ru

БОГАЧЕВ Виктор Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, доц.; bogachev-va@yandex.ru

ТРАПЕНОВ Владимир Викторович — ст. преподаватель; vladimir.trapenov@mail.ru

БОГАЧЕВ Тарас Викторович — канд. физ.-мат. наук, доц.; bogachev73@yandex.ru

ЗАДОРОЖНИЙ Вячеслав Михайлович — канд. техн. наук, доц.; zadorozhnyi91@mail.ru

Configuring Terminal-Warehouse Infrastructure of Transport Hub Basing on the Development of Method of Economic-Geographical Differentiation of Cargo Flows

O. N. Chislov^{1,2}, V. A. Bogachev¹, V. V. Trapenov¹, T. V. Bogachev³, V. M. Zadorozhnyi^{1,2}

¹Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

²Sirius University, Sirius town, 1, Olimpiyskiy pr., Sochi, 354340, Russian Federation

³Rostov State University of Economics, 69, Bolshaya Sadovaya Street, Rostov-on-Don, 344002, Russian Federation

For citation: Chislov O. N., Bogachev V. A., Trapenov V. V., Bogachev T. V., Zadorozhnyi V. M. Configuring Terminal-Warehouse Infrastructure of Transport Hub Basing on the Development of Method of Economic-Geographical Differentiation of Cargo Flows // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 800–811. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-800-811

Summary

Purpose: To formulate proposals for configuring terminal-warehouse infrastructure for the placement of storage facilities inside a transport hub. **Methods:** Basing on the analysis of publications in the trend of the research data, optimization geometric Euclidean model of freight process, embodied on the territory of a transport hub, was applied to find optimal cargo flow distribution by dividing the flow into parts representing “influence areas”.

Results: optimization algorithm for freight process was developed in the article on the basis of classical integral calculus methods, the algorithm allows to discover those ones among many distributive center possible locations which allows in view of restriction complex to determine “influence area” of distributive center with the largest area in comparison with the initial area. **Practical significance:** Economic effect was obtained from base rental rate reduction that is due to possible change of logistic freight distribution center location outside dense urban development territory where base rental rate is higher.

Keywords: Warehouse logistics, transport hub, logistic freight distributive center, economic-geographical method, Rostov transport hub, optimization of cargo flow distributions, retail trade network, oligopolistic market, duopoly, higher order algebraic curves.

References

1. Chislov O. N., Trapenov V. V., Alabina V. V., Bakalov M. V. *Metody formirovaniya i printsipy intellektualizatsii v upravlenii terminal'noskladskoy sistemoy transportnogo uzla* [Methods of formation and principles of intellectualization in the management of the terminal warehouse system of the transport hub]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University]. 2021, I. 1(81), pp. 104–114. DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_104. (In Russian)
2. Gusev S. *Problemy opredeleniya mestopolozheniya sklada* [Problems of determining the location of the warehouse]. *Logistika* [Logistics]. 2011, I. 2(55), pp. 53–55. (In Russian)
3. Tufan Demirel, Nihan Çetin Demirel, Cengiz Kahraman. Multi-criteria warehouse location selection using Choquet integral, Expert Systems with Applications. 2010, vol. 37, I. 5, pp. 3943–3952.
4. Kharitonov D. M. *Opredelenie optimal'nogo mesta raspolozheniya raspredelitel'nykh tsentrov* [Determining the optimal location of distribution centers]. *Nauka v sovremennom mire: priority razvitiya* [Science in the modern world: development priorities]. 2019, I. 1(5), pp. 124–129. (In Russian)
5. Kusraeva R. Yu. *Vybor mestopolozheniya sklada s pomoshch'yu metoda analiza ierarkhiy* [Choosing a warehouse location using the hierarchy analysis method]. *Evraziyskoe Nauchnoe Ob'edinenie* [Eurasian Scientific Association]. 2017, vol. 2, I. 6(28), pp. 122–128. (In Russian)
6. Kryn'skiy Kh. E. *Matematika dlya ekonomistov* [Mathematics for economists]. Moscow: Statistika Publ., 1970. 580 p. (In Russian)
7. Chislov O. N., Bogachev V. A., Zadorozhniy V. M., Bogachev T. V., Demchenko O. I., Khan V. V. *Modelling of the rail freight traffic by the methods of economic-geographical delimitation in the region of the south-easter coast of the Baltic sea*. *Transport Problems, SUT*. 2019, vol. 14, I. 2, pp. 77–87. Print edition: ISSN 1896-0596. Online edition: ISSN 2300-861X. DOI: 10.20858/tp. 2019.14.2.7.
8. Chislov O. N., Zadorozhniy V. M., Bogachev V. A., Kravets A. S., Egorova I. N., Bogachev T. A. *Methods of Analytical Modeling the Process of Freight Transportation Management in the Regional Transport. Decision Support Methods in Modern Transportation Systems and Networks, Lecture Notes in Networks and Systems, Springer*. 2021, pp. 197–210. DOI: 10.1007/978-3-030-71771-1_13.
9. Chislov O. N. *Raspredelenie vagonopotokov operator-skoj kompanii v priortovykh transportnykh uzлах metodom ekonomiko-geograficheskogo razgranicheniya* [Distribution of car flows of the operator company in the port transport hubs using the method of economic and geographical delimitation]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg University of Communications]. 2016, I. 3 (48), pp. 302–313. (In Russian)
10. Chislov O., Bogachev V., Zadorozhniy V., Kravets A., Bakalov M., Bogachev T. *Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation system*. *Transport Problems, SUT*. 2021, vol. 16, I. 2, pp. 141–152. DOI: 10.21307/tp-2021-031.

Received: June 21, 2022

Accepted: September 16, 2022

Author's information:

Oleg N. CHISLOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head of the Department; o_chislov@mail.ru
 Viktor A. BOGACHEV — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor; bogachev-va@yandex.ru
 Vladimir V. TRAPENOV — Senior Lecturer; vladimir.trapenov@mail.ru
 Taras V. BOGACHEV — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor; bogachev73@yandex.ru
 Viacheslav M. ZADOROZHNIY — PhD in Engineering, Associate Professor; zadorozhny91@mail.ru

УДК 656.22

Разработка алгоритма расчета наибольшего приведенного уклона при закреплении вагонов на путях станций тормозными башмаками*

В. В. Костенко, С. С. Смирнов, Д. В. Язев, И. П. Александров

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

Для цитирования: Костенко В. В., Смирнов С. С., Язев Д. В., Александров И. П. Разработка алгоритма поиска наибольшего приведенного уклона при закреплении вагонов на путях станций тормозными башмаками // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 812–819. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-812-819

Аннотация

Цель: Разработка машинопригодного алгоритма расчета наибольшего среднего (приведенного) уклона для определения минимальных норм закрепления вагонов, групп вагонов или составов поездов, оставляемых на путях железнодорожных станций без локомотивов. **Методы:** Решение поставленной задачи производилось путем составления последовательности математических и логических действий. Математическими выражениями описывается спрямление продольного профиля пути, т. е. расчет приведенного уклона. Логическими действиями описаны ограничения при производстве расчетов. **Результаты:** Составлен алгоритм расчета приведенного уклона, учитывающий положения Инструкции по организации движения поездов и маневровой работы на железнодорожном транспорте Российской Федерации. **Практическая значимость:** Разработанный алгоритм позволяет производить расчет приведенного уклона при наименее благоприятных условиях расположения вагонов, групп вагонов или составов поездов в пределах полезной длины станционных путей, что отвечает условиям обеспечения надежного закрепления подвижного состава от ухода. Проведенные исследования позволяют разработать программу для определения минимальных норм закрепления вагонов, групп вагонов или составов поездов, оставляемых на путях железнодорожных станций без локомотивов в полном соответствии с Инструкцией по организации движения поездов и маневровой работы на железнодорожном транспорте Российской Федерации.

Ключевые слова: Средний уклон, приведенный уклон, спрямление продольного профиля, тормозной башмак, закрепление подвижного состава, нормы закрепления подвижного состава.

* Статья опубликована при поддержке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» инициативных научных работ, выполняемых студенческими научными коллективами.

The article is published at the support by Emperor Alexander I Petersburg State Transport University of personal scientific works implemented by student research groups.

Введение

Неотъемлемой частью технологических процессов работы станций является надежное закрепление от ухода оставляемых на станционных путях вагонов без локомотивов [1, 2]. Время на производство операций по укладке и изъятию тормозных башмаков зависит от их количества. В свою очередь, расчетные формулы, приведенные в [3], свидетельствуют о наличии прямой зависимости между минимальными нормами закрепления и средним (приведенным) уклоном пути.

В соответствии с [3] на путях с ломаным профилем нормы закрепления составов поездов или групп вагонов, располагающихся в пределах всей длины путей, исчисляются по средней величине уклона для всей длины пути. Если вагоны оставляются на отдельных отрезках путей, то их закрепление тормозными башмаками должно производиться по нормам, соответствующим фактической величине уклона данного отрезка.

На данный момент расчет минимальных норм, которые указываются в техническо-распорядительных актах станций, производится при помощи программы ИСУЖТ ТС, разработанной АО «НИИАС». Однако рассматриваемый в настоящей статье вопрос остается актуальным, что связано с замеченными авторами несоответствиями между минимальными нормами закрепления, рассчитанными вручную, и результатами расчета при помощи указанной программы. Более

того, о проблемах, связанных с формализацией в системе АС ТРА норм закрепления, в отраслевых газетах пишут сами железнодорожники [4].

В целом проблема применения норм закрепления подвижного состава лежит несколько глубже, о чем упоминается в статьях [5–7]. Авторами предлагается начать разбираться в данной проблеме с корректного расчета приведенного уклона, от которого напрямую зависит количество тормозных башмаков и, соответственно, время на выполнение операций по закреплению.

Основные положения расчета приведенного уклона

В общем виде приведенный уклон определяется по формуле (1), исходя из рис. 1 и выводов, изложенных в [8]. Стоит отметить, что наука о тяге поездов накладывает на область применения формулы (1) некоторые ограничения для уменьшения погрешностей в расчетах, связанных с пренебрежением разностью скоростей движения по отдельным элементам профиля [9]. По смыслу решаемой задачи в данном случае это обстоятельство не имеет значения. Учитывая сравнительно небольшую разность уклонов смежных элементов продольного профиля пути на отдельных пунктах с путевым развитием и рассмотрение случая неподвижности закрепленного состава, проверка на допустимость спрямления продольного профиля может не производиться, что не противоречит [3].

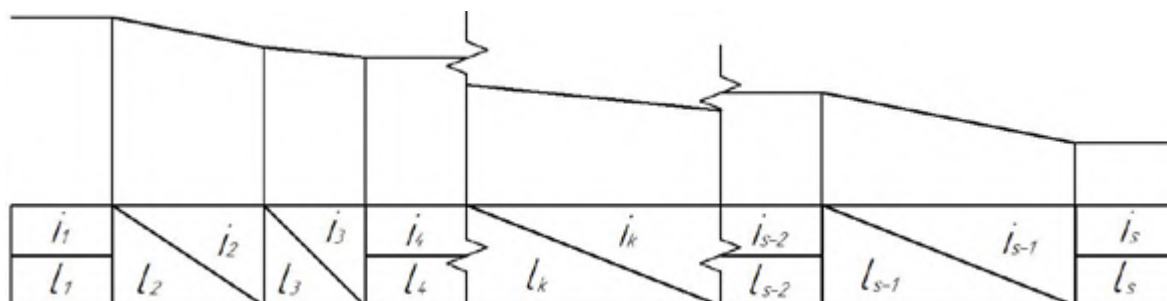


Рис. 1. Пример произвольного профиля пути на станции

$$i_p = \sum_{k=1}^s i_k \cdot l_k / \sum_{k=1}^s l_k, \quad (1)$$

где i_k — уклон k -го элемента;

l_k — длина k -го элемента;

s — число элементов.

Несмотря на несложную расчетную формулу, поиск значения приведенного уклона преобразуется в сложную задачу, когда расположение вагонов, группы вагонов или состава поезда на пути неизвестно, а полезная длина пути превышает длину закрепляемого подвижного состава.

Решить данную задачу возможно различными способами, но, если не требуется оптимизация порядка нахождения приведенного уклона, его наибольшее значение при наименее благоприятном расположении оставляемых без локомотива вагонов можно найти перебором вариантов их местоположения на пути.

Перебор вариантов расположения вагонов на пути целесообразно начинать с одного из крайних положений. Обозначим через l_c длину закрепляемой группы вагонов. В любом случае расположения этой группы в пределах полезной длины пути группа разместится на n -м числе элементов продольного профиля, занимая их целиком, а на $n + 1$ элементе будет располагаться только часть группы. На рис. 2 приведена описываемая ситуация, когда первый и второй элементы продольного профиля заняты целиком, а на третьем элементе находится лишь часть группы, длина которой определяется как сумма всех длин занимаемых элементов за вычетом оставшегося незанятым отрезка $n + 1$ элемента.

Дальнейший перебор вариантов следует начинать от начала следующего элемента продольного профиля пути. Связано это с тем, что уклон дает наибольший вклад в определение приведенного уклона в том случае, когда элемент занят целиком, что является прямым следствием формулы (1). На рис. 3 показано перемещение группы вагонов, которое соответствует изложенному суждению.

Заметим, что в зависимости от длины элементов, при расчете от начала следующего элемента продольного профиля, могут сложиться ситуации, изображенные на рис. 4 и 5.

С точки зрения математики приведенный уклон z при расположении состава длиной l_c так, что его начало совпадает с началом элемента x продольного профиля с известными уклонами i и длинами l элементов, составляет:

$$z_x = \frac{\sum_{j=x}^{a-1} i_j \cdot l_j + i_a \left(l_c - \sum_{j=x}^{a-1} l_j \right)}{l_c}, \quad \begin{cases} \sum_{j=x}^{a-1} l_j < l_c; \\ \sum_{j=x}^a l_j \geq l_c, \end{cases} \quad (2)$$

где a — номер элемента продольного профиля пути, который при переборе вариантов расположения закрепляемого подвижного состава занят частично.

Учесть все изображенные на рис. 2–5 варианты возможно через задание цикла накопления суммы длин элементов продольного профиля до тех пор, пока она не станет больше или хотя бы равна длине закрепляемой группы вагонов, а затем при вычитании начальных элементов каждый раз проверять, не нарушилось ли данное условие. При нарушении условия добавлять последующие элементы. Также необходимо повторить приведенный расчет с другой стороны пути.

Следует отметить, что формула (2) справедлива для различных типов продольного профиля пути: пилообразного, выпуклого, вогнутого, монотонного. Направление уклона каждого элемента продольного профиля пути учитывается знаком. Например, значение уклона $i = 1,5 \%$ соответствует подъему слева направо, а значение уклона $i = -2,4 \%$ свидетельствует о наличии спуска слева направо. Расчет приведенного уклона осуществляется с учетом знаков уклонов всех элементов продольного профиля пути, что позволяет применять ниже изложенный алгоритм для любого типа продольного профиля.

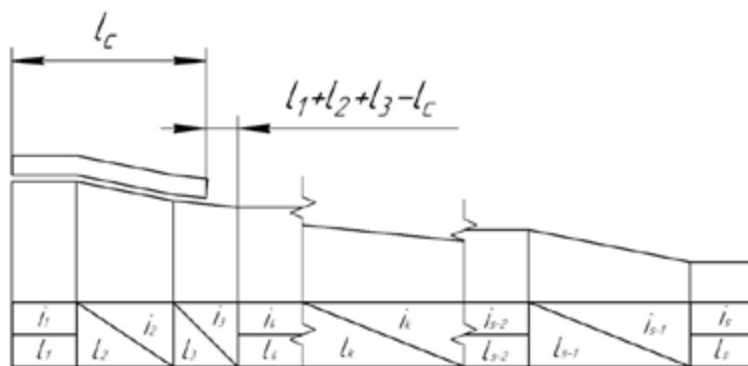


Рис. 2. Схема расположения группы вагонов в начале пути

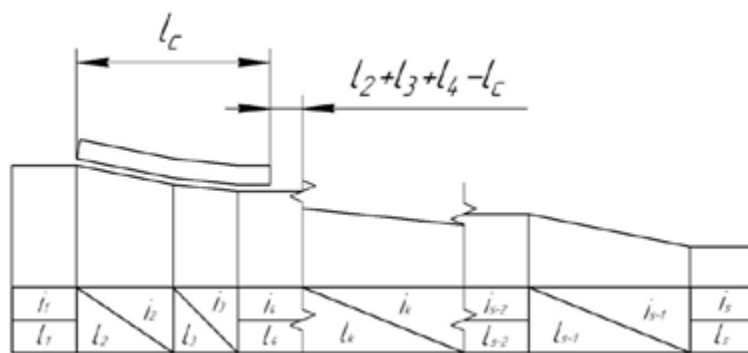


Рис. 3. Схема расположения группы вагонов при следующей итерации

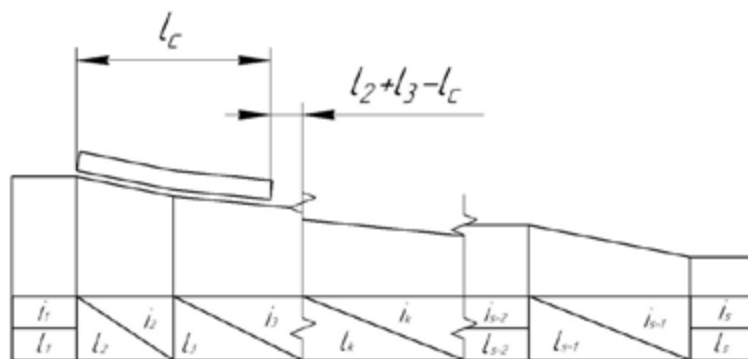


Рис. 4. Вариант схемы расположения группы вагонов при следующей итерации

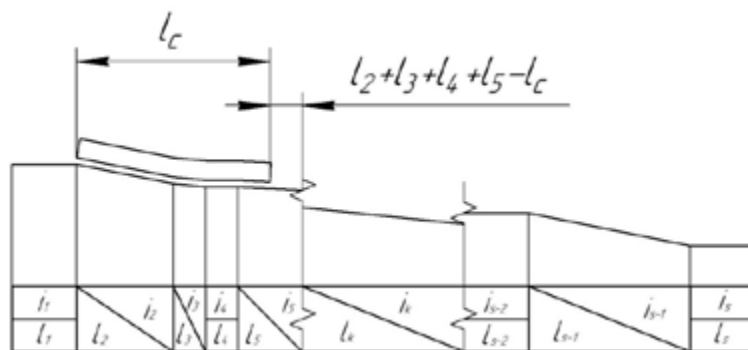


Рис. 5. Вариант схемы расположения группы вагонов при следующей итерации

Разработка алгоритма расчета приведенного уклона

Основываясь на указанных выше рассуждениях, была разработана схема алгоритма расчета максимально возможного приведенного уклона. Схема алгоритма приведена на рис. 6.

Разработанная схема алгоритма для написания в дальнейшем программного кода предполагает следующую последовательность действий:

1. После запуска программы (блок 1) в блоке 2 пользователю предлагается ввести исходные данные: длину состава в условных вагонах d , количество осей n в составе, данные о продольном профиле пути в виде векторов уклонов $\{I\}$ и длин элементов $\{L\}$.

2. В блоке 3 переменной «flag» логического типа устанавливается значение «true», которое в дальнейшем будет изменено для недопущения заикливания программы самой на себя.

3. Блоками 4–8 проверяется правильность ввода исходных данных. Вычисляется, не превышает ли длина состава сумму длин элементов пути, на котором он оставляется. В случае, когда состав выходит за пределы пути, блоком 9 пользователю выдается сообщение об ошибке и блоком 10 программа завершает расчет.

4. Если состав может быть размещен в пределах пути, блоками 11–14 производится накопление переменной s суммы длин элементов продольного профиля. Накопление производится начиная с первого элемента и до момента, пока переменная s не станет больше или хотя бы равна длине состава.

5. Блоком 15 устанавливаются значения буферных переменных.

6. Блоком 16 проверяется, производится первый расчет или нет;

7. Блоками 17–19 производится накопление суммы произведений уклонов элементов продольного профиля и соответствующих им длин p до того элемента, на котором закрепляемый состав расположен лишь частично.

8. Блоком 20 сумма p дополняется произведением уклона элемента продольного профиля, на котором состав располагается частично, и длины этой части.

9. Блоком 21 исходя из накопленной суммы произведений p и длины состава d производится расчет x приведенного уклона.

10. Блоком 22 переменная x увеличивается, что позволяет перейти к следующему расчету.

11. Блоком 23 из ранее рассчитанной переменной s вычитается длина начального элемента продольного профиля. Если проверенная блоком 24 итоговая величина s меньше длины состава, то блоками 27 и 28 она дополняется следующими элементами до момента, пока не станет больше или хотя бы равной длине состава d .

12. Блоком 25 устанавливаются значения буферных переменных для дальнейшего расчета.

13. Блоком 26 проверяется, не достиг ли расчет предела в количестве используемых элементов продольного профиля. Если накопление переменной s не дало результата, большего или хотя бы равного длине состава, а все элементы продольного профиля использованы, происходит выход из цикла.

14. После выхода из цикла блоком 29 проверяется значение переменной «flag» логического типа, а блоком 30 устанавливаются максимальное и минимальное значения приведенного уклона из всех накопленных в буферном векторе $\{Z\}$.

15. Блоками 31–49 производится смена номеров уклонов и длин элементов продольного профиля, что позволит произвести расчет приведенных уклонов не слева направо (исходя из рис. 2–5), а справа налево.

16. В блоке 50 переменной «flag» логического типа устанавливается значение «false» для недопущения заикливания программы самой на себя.

17. Операции в блоках 11–29 производятся повторно с учетом смены номеров уклонов и длин элементов продольного профиля.

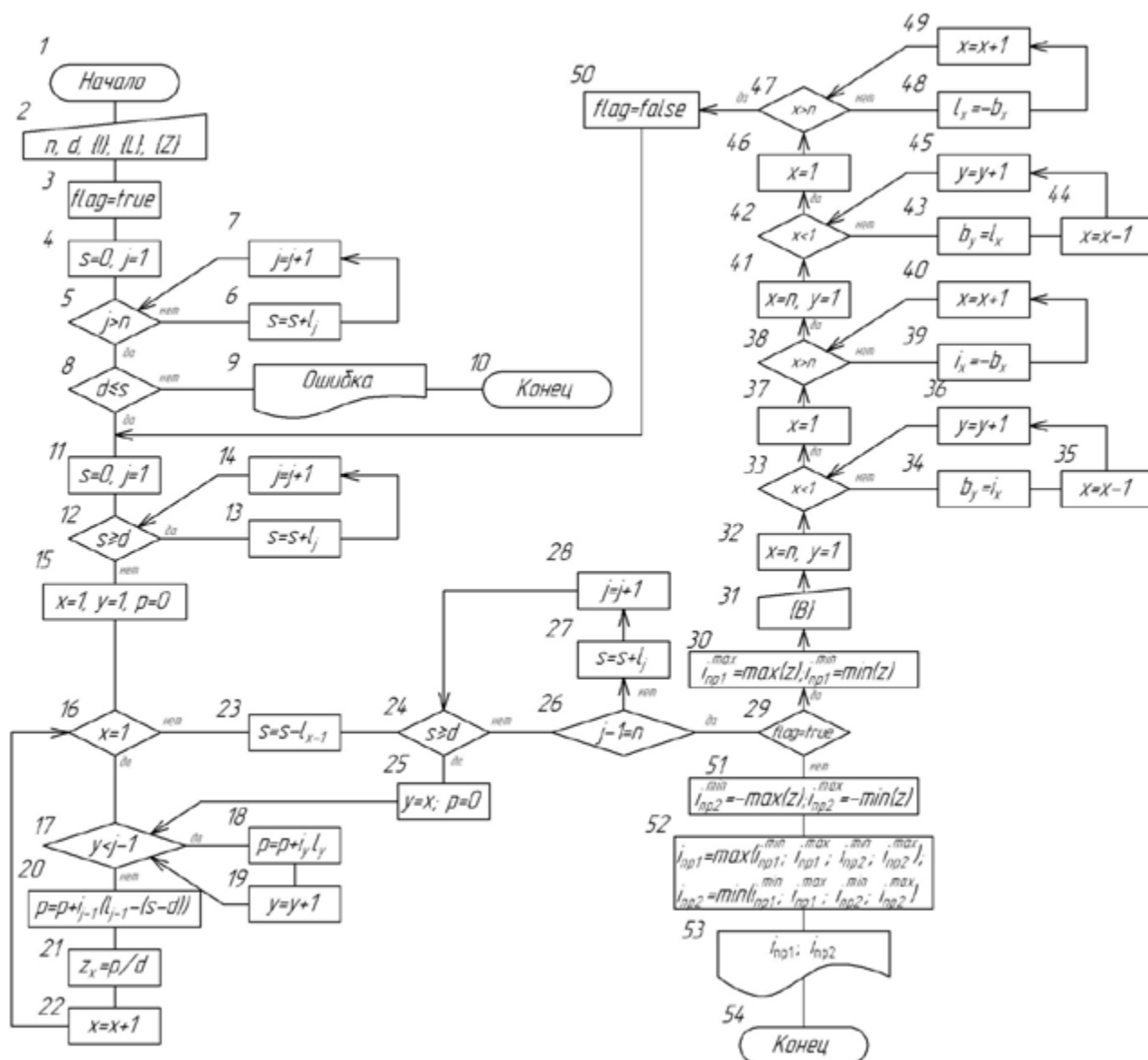


Рис. 6. Схема алгоритма расчета приведенного уклона

18. Блоком 51 устанавливаются максимальное и минимальное значения приведенного уклона из вновь накопленных уклонов в буферном векторе $\{Z\}$.

19. Блоком 52 из полученных четырех значений уклонов отбираются максимальное и минимальное значения с учетом разворота элементов продольного профиля.

20. Блоком 53 пользователю выводятся максимальное и минимальное значения приведенного уклона.

21. Блоком 54 производится завершение работы программы.

Заключение и выводы

Разработанная схема алгоритма позволяет написать программный код для определения максимально возможного приведенного уклона. Такой код может быть положен в основу программы для расчета норм закрепления подвижного состава тормозными башмаками на путях станций. Алгоритмом предполагается нахождение максимально возможного приведенного уклона при расположении группы вагонов на путях с ломаным профилем. Основывая расчет для неблагоприятного расположения подвижного состава на пути,

закрепляемый состав будет надежно закреплен от ухода, что отвечает требованиям [3].

Правильность расчета приведенного уклона необходима и для того, чтобы не допустить превышения норм закрепления. Превышение минимальных норм закрепления приводит к повышению нагрузки на работников станций, участвующих в операциях по закреплению. Необходимость снижения таких нагрузок подробно описывается в [10].

Исследования, изложенные в настоящей статье, позволят в дальнейшем изучить зависимости между продольным профилем станционных путей, расчетными формулами для норм закрепления подвижного состава, способом закрепления (с накатом колес на полз и без наката) на время, необходимое для выполнения операций по закреплению.

Библиографический список

1. Буканов М. А. Справочник дежурного по станции / М. А. Буканов, Л. И. Педь, А. А. Шрамов. — М.: Транспорт, 3 изд., перераб. и доп., 1987. — 239 с.
2. Гапеев В. И. Пособие по обеспечению безопасности движения и охране труда: учеб. пособие / В. И. Гапеев, А. А. Крисенко, П. И. Альшевский и др. — Минск: Белорусская железная дорога, 1993. — 263 с.
3. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: утв. Минтранс России от 20 июня 2022 г. № 250.
4. Цепя А. В инструкции разъясняется не все / А. Цепя // Гудок. — 2015. — № 193. — URL: <https://gudok.ru/zdr/173/?ID=1312533>.
5. Баранов В. А. Изменение порядка закрепления составов увеличивает расходы / В. А. Баранов, М. В. Стрелков // Гудок. — 2015. — № 3. — URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1249605>.
6. Серов В. Н. Закреплять нужно с двух сторон / В. Н. Серов // Гудок. — 2015. — № 5. — URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1250272>.
7. Иванов П. А. От наших решений порой зависит жизнь человека / П. А. Иванов // Гудок. — 2015. — № 6. — URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1250480>.
8. Осипов С. И. Тяга поездов: учебник для студентов техникумов и колледжей ж/д транспорта / С. И. Осипов, С. С. Осипов. — М.: УМК МПС России, 2000. — 592 с.
9. Черепашенцев Р. Г. Вождение поездов: пособие машинисту / Р. Г. Черепашенцев, В. А. Бирюков, В. Т. Понкрашов и др. — М.: Транспорт, 1994. — 304 с.
10. Марков Д. П. Стояночные тормозные башмаки для закрепления подвижного состава на станционных путях. Полигонные испытания / Д. П. Марков, И. Н. Воронин, Н. П. Шипулин и др. // Вестник ВНИИЖТ. — М.: ВНИИЖТ, 2016. — С. 308–317.

Дата поступления: 05.10.2022

Решение о публикации: 18.11.2022

Контактная информация:

КОСТЕНКО Владимир Васильевич — канд. техн. наук, доц.; docentkostenko@yandex.ru

СМИРНОВ Сергей Сергеевич — студент;

sss1999@inbox.ru

ЯЗЕВ Денис Викторович — студент;

denchik_yazik167@mail.ru

АЛЕКСАНДРОВ Игорь Павлович — студент;

aleksandrovigor2000@mail.ru

Algorithm Development for Maximum Reduced Slope Calculation at Car Securing on Station Railways by Braking Chairs¹

V. V. Kostenko, S. S. Smirnov, D. V. Yazev, I. P. Alexandrov

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

For citation: Kostenko V. V., Smirnov S. S., Yazev D. V., Aleksandrov I. P. Algorithm Development for Maximum Reduced Slope Calculation at Car Securing on Station Railways by Braking Chairs // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 812–819. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-812-819

Summary

Purpose: The development of machine-friendly calculation algorithm of maximum average (reduced) slope for to define minimal norms for securing cars, groups of cars or train stocks that're left on station railways without locomotives. **Methods:** The set task solving was held by making up the succession of mathematical and logical actions. Mathematical expressions describe flattening of track longitudinal profile, i.e. the calculation of reduced slope. Logical actions describe limitations at pursuing the calculations. **Results:** Calculation algorithm of reduced slope has been made up which takes into account the provisions of Instructions on Train Motion and Shunting Work on Railway Transport of the Russian Federation. **Practical significance:** The developed algorithm allows to pursue the calculation of reduced slope at the least favorable conditions of the placement of cars, group of cars and stocks of trains in the frames of effective length of station tracks that corresponds to provision conditions for rolling stock securing from leaving. The pursued research allows to develop program for defining minimal norms for securing cars, groups of cars and stocks of trains that're left on station railways without locomotives, in full accordance with Instructions on Train Motion and Shunting Work on Railway Transport of the Russian Federation.

Keywords: Average slope, reduced slope, longitudinal profile flattening, braking chair, rolling stock securing, rolling stock securing norms.

References

1. Bukanov M. A., Ped' L. I., Shramov A. A. *Spravochnik dezhurnogo po stantsii* [Station Attendant's Handbook]. Moscow: Transport Publ., 3 izd., pererab. i dop., 1987, 239 p. (In Russian)
2. Gapeev V. I., Krisenko A. A., Al'shevskiy P. I. *Posobie po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya i okhrane truda: ucheb. posobie* [Manual for ensuring traffic safety and labor protection: textbook. allowance]. Minsk: Belorusskaya zheleznaya doroga Publ., 1993, 263 p. (In Russian)
3. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznnykh dorog Rossiyskoy Federatsii: utv. Mintransom Rossii ot 20 iyunya 2022 g. № 250* [Rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation: approved. Ministry of Transport of Russia dated June 20, 2022, № 250]. (In Russian)
4. Tsepa A. V instruktsii raz'yasnyaetsya ne vse [The instructions do not explain everything]. *Gudok* [Horn]. 2015, I. 193. Available at: <https://gudok.ru/zdr/173/?ID=1312533>. (In Russian)
5. Baranov V. A., Strelkov M. V. Izmenenie poryadka zakrepleniya sostavov uvelichivaet raskhody [Changing the order of fastening trains increases costs]. *Gudok* [Horn]. 2015, I. 3. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1249605>. (In Russian)
6. Serov V. N. Zakrepyat' nuzhno s dvukh storon [Attached on both sides]. *Gudok* [Horn]. 2015, I. 5. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1250272>. (In Russian)
7. Ivanov P. A. Ot nashikh resheniy poroy zavisit zhizn' cheloveka [A person's life sometimes depends on our decisions]. *Gudok* [Horn]. 2015, I. 6. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1250480>. (In Russian)
8. Osipov S. I., Osipov S. S. *Tyaga poezdov: uchebnik dlya studentov tekhnikumov i kolledzhey zh/d transporta* [Traction of trains: a textbook for students of technical schools and colleges of railway transport]. Moscow: UMK MPS Rossii Publ., 2000, 592 p. (In Russian)
9. Cherepashnets R. G., Biryukov V. A., Ponkrashov V. T. *Vozhdenie poezdov: posobie mashinistu* [Train driving: driver's guide]. Moscow: Transport Publ., 1994, 304 p. (In Russian)
10. Markov D. P., Voronin I. N., Shipulin N. P. Stoyanochnye tormoznye bashmaki dlya zakrepleniya podvizhnogo sostava na stantsionnykh putyakh. Poligonnye ispytaniya [Parking brake shoes for securing the rolling stock on the station tracks. Field tests]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik VNIIZhT]. Moscow: VNIIZhT, 2016, pp. 308–317. (In Russian)

Received: October 05, 2022

Accepted: November 18, 2022

Author's information:

Vladimir V. KOSTENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; docentkostenko@yandex.ru

Sergey S. SMIRNOV — Student; sss1999@inbox.ru

Denis V. YAZEV — Student; denchik_yazik167@mail.ru

Igor P. ALEXANDROV — Student;

aleksandrovigor2000@mail.ru

УДК 536.24

Математическое моделирование процесса промерзания грунтов земляного полотна железных дорог в условиях холодного климата

С. Ван, А. Ф. Колос, А. В. Петряев

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

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

Аннотация

Цель: Разрабатывается математическая модель для изучения процесса промерзания грунтов с учетом миграции влаги, и выполняется численное моделирование температурного режима земляного полотна железных дорог при нестационарном процессе в условиях холодного климата. **Методы:** Численная реализация модели выполнена обработкой математического модуля в программе COMSOL Multiphysics, основанной на дифференциальных уравнениях в частных производных (PDE) методом конечных элементов. Достоверность модели подтверждается сравнением с предыдущими экспериментальными данными и результатами моделирования другими авторами. **Результаты:** Результаты расчета на основе разработанной модели показывают лучшую коррелированность с экспериментальными данными по сравнению с результатами других моделей. Представлены пример вычисления и результаты расчета температурного режима земляного полотна в пятом цикле промерзания — оттаивания. Выполнен анализ изменения глубины промерзания грунтов и изменения колебания температуры грунтов по глубине на пятый год. **Практическая значимость:** Разработанная математическая модель дает возможность прогнозировать глубину промерзания грунта с учетом миграции влаги, в том числе изменение глубины промерзания и оттаивания, вызванных потеплением климата. Разработанная модель может быть использована как для изучения закономерности распределения теплового режима земляного полотна при промерзании и оттаивании, так и для совершенствования конструкции земляного полотна, чтобы защитить его от морозного пучения грунтов.

Ключевые слова: Промерзание грунта, температурный режим, миграция влаги, численное моделирование, земляное полотно.

Введение

Грунты земляного полотна подвергаются сезонному промерзанию в условиях холодного климата, что вызывает ряд особых инженерно-геологических проблем. Одной из них является

морозное пучение, действие которого вызывает повреждения и деформации земляного полотна. В связи с этим исследование изменения теплового режима земляного полотна актуально для понимания морозного пучения.

Промерзание грунта является сложным процессом тепломассопереноса, сопровождаемым теплообменом, фазовым переходом поровой влаги и ее миграцией. Для математического описания этого процесса А. В. Лыков и Ю. А. Михайлов в работе [1] разработали математическую модель, представляющую из себя систему дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса, которую можно решить строго аналитически только в некоторых случаях. На основе их работ Н. С. Иванов [2] предложил разные системы уравнений тепломассопереноса в протаивающих, промерзающих и промерзших горных породах и представил некоторые методы решения уравнений тепло- и массопроводности. В работах А. Р. Павлова и М. В. Матвеевой [3–5] разработана математическая модель для совместной задачи тепломассопереноса и построена итерационная разностная схема для численного решения задачи. За рубежом Р. Л. Харлан (R. L. Harlan) [6] предложил гидродинамическую модель для решения задачи тепломассопереноса и баланса энергии в промерзающих грунтах, но из-за отсутствия надежных данных о физических, тепловых и гидравлических свойствах мерзлых грунтов в его работе не проведено количественное сравнение наблюдаемых данных с результатами расчета. Sheppard, Kay и Loch [7], Jansson и Halldin [8], Taylor и Luthin [9] предложили аналогичные модели для решения совместной задачи тепломассопереноса при промерзании грунтов. В их работах модели подтверждены лабораторными и полевыми данными. На практике в математическом моделировании процесса тепломассопереноса при промерзании грунтов широко используются различные модификации модели, представленной Харланом [10–13].

В настоящей работе разрабатывается математическая совмещенная модель для описания теплового режима при нестационарном процессе промерзания грунтов с учетом миграции влаги. Достоверность модели подтверждается срав-

нением с предыдущими экспериментальными данными и результатами моделирования. Кроме этого, приведен пример численного моделирования теплового режима земляного полотна железных дорог и выполнен анализ расчетных результатов температурного режима.

Математическая модель

Математическая модель базируется на основе теории теплопроводности и ненасыщенной влаготеплопроводности, при этом система дифференциальных уравнений опирается на следующие предпосылки: грунт является изотропным и однородным материалом, находящимся в локальном термодинамическом равновесии; твердые частицы грунта и лед не деформируются; не учитывается конвективная теплопередача при миграции влаги по сравнению с потоком теплопроводности и скрытой теплотой фазового перехода.

Основное уравнение температурной задачи выведено на основе закона сохранения энергии, в том числе величина теплового потока определяется законом Фурье, а выражение в двухмерном случае при промерзании грунта имеет вид:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + L \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t}, \quad (1)$$

где C — объемная теплоемкость грунта, Дж/(м³ · К);
 λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К);
 L — удельная теплота фазового перехода, Дж/кг;
 ρ_i — плотность льда, кг/м³;
 θ_i — суммарная льдистость мерзлого грунта, м³/м³,
 T — температура, К;
 t — время, с.

Основное уравнение влажностной задачи получено на основе закона сохранения массы, в том числе величина потока миграции воды определяется законом Дарси (уравнением Ричардса [14]).

Выражение в двумерном случае при промерзании грунта имеет вид:

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta_w) \frac{\partial \theta_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D(\theta_w) \frac{\partial \theta_w}{\partial y} + K(\theta_w) \right), \quad (2)$$

где θ_w — объемная влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

ρ_w — плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$D(\theta_w)$ — коэффициент диффузии влаги, который определяется как отношение коэффициента влагопроводности к удельной влагоемкости, $\text{м}^2/\text{с}$;

$K(\theta_w)$ — коэффициент влагопроводности в ненасыщенной зоне, $\text{м}/\text{с}$.

Суммарная объемная влажность θ при промерзании грунта определяется по закону сохранения массы:

$$\theta = \theta_w + \frac{\rho_i}{\rho_w} \theta_i. \quad (3)$$

В уравнениях (1) и (2) существуют три неизвестные переменные: температура T , суммарная льдистость мерзлого грунта θ_i , иная влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды θ_w . Для решения модели необходимо ввести дополнительное уравнение, которое описывает взаимосвязь между температурой T , льдистостью θ_i , и влажностью θ_w . В работе Б. Цинбо [13] предложено соотношение B_I между суммарной льдистостью θ_i и объемной влажностью мерзлого грунта за счет незамерзшей воды θ_w , которое описывается кусочной функцией в виде:

$$B_I = \frac{\theta_i}{\theta_w} = \begin{cases} 1,1 \left(\frac{T - 273,15}{T_{bf} - 273,15} \right)^b - 1,1, & T < T_{bf}, \\ 0, & T \geq T_{bf} \end{cases}, \quad (4)$$

где T_{bf} — температура начала замерзания грунта, К ;

b — коэффициент, зависящий от вида и засоленности грунтов. При отсутствии экспериментальных данных принимается 0,56 для глины, 0,47 для суглинка, 0,61 для песка. Система уравнений замыкается дополнительным уравнением:

$$\theta_i = \theta_w \cdot B_I. \quad (5)$$

Для получения единственного решения системы уравнений тепломассопереноса необходимо знать краевые (начальные и граничные) условия и геометрическую форму тела. Обычно начальные условия задают распределение температуры или влажности внутри тела в начальный момент. Граничные условия описываются законом взаимодействия поверхности тела с окружающей средой на границах. Общие типы граничных условий включают граничные условия Дирихле и граничные условия Неймана.

В данной работе теплофизические характеристики грунта определены в соответствии с СП 25.13330.2012 [15]. Для определения коэффициента теплопроводности введена ступенчатая функция $H(T)$, связанная с температурой начала замерзания грунта:

$$\lambda = \lambda_f + (\lambda_{th} - \lambda_f) \cdot H(T), \quad (6)$$

где λ_f — коэффициент теплопроводности в мерзлом состоянии, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

λ_{th} — коэффициент теплопроводности в талом состоянии, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Объемные теплоемкости в талом и мерзлом состояниях определяются по средневзвешенной массе каждого состава:

$$C_{th} = C_p \cdot \rho_d + C_w \cdot \rho_w \cdot \theta_w; \quad (7)$$

$$C_f = C_p \cdot \rho_d + C_w \cdot \rho_w \cdot \theta_w + C_i \cdot \rho_i \cdot \theta_i, \quad (8)$$

где C_{th} — объемная теплоемкость грунта в талом состоянии, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$;

C_f — объемная теплоемкость грунта в мерзлом состоянии, Дж/(м³ · К);

C_p — удельная теплоемкость скелета грунта, Дж/(кг · К);

C_w, C_i — удельная теплоемкость воды и льда, Дж/(кг · К);

ρ_d — плотность скелета грунта, кг/м³.

Соответственно, для описания основных гидрофизических параметров выбраны аппроксимирующие функции на основе модели Муалема-Ван Генухтена [16, 17]. Таким образом, коэффициент влагопроводности $K(\theta)$, удельная влагоемкость $C_w(\theta)$ и коэффициент диффузии влаги $D(\theta)$ выражают в видах:

$$K(\theta) = k_s \cdot S_e^{\frac{1}{2}} \cdot \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2; \quad (9)$$

$$C_w(\theta) = \frac{-am}{1-m} (\theta_s - \theta_r) S_e^{\frac{1}{m}} \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m; \quad (10)$$

$$D(\theta) = \frac{K(\theta)}{C_w(\theta)}. \quad (11)$$

В том числе эффективная степень насыщения водой S_e определена путем нормализации объемной влажности в следующем виде:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad (12)$$

где θ_r — остаточная объемная влажность, соответствующая влажности точки перегиба в сорбционной части, м³/м³;

θ_s — насыщенная объемная влажность, соответствующая полному насыщению водой, м³/м³;

a, m — эмпирические параметры, связанные со свойствами грунта;

k_s — коэффициент фильтрации, м/с.

С учетом сопротивления льда в порах грунта миграции незамерзающей влаги коэффициент влагопроводности и коэффициент диффузии влаги в мерзлых грунтах определяются с помощью коэффициента сопротивления I , связанного с влажностью твердой фазы θ_i [9]:

$$I = 10^{10\theta_i}. \quad (13)$$

Численная реализация

Численное решение задачи выполнено в программе COMSOL Multiphysics. Учитывая взаимную связь и нелинейные характеристики уравнений (1) и (2) в мерзлой зоне, модель построена путем математического интерфейса на основе дифференциальных уравнений в частных производных (PDE). Нестационарный процесс переноса выражается в коэффициентной форме уравнением в частных производных в общем виде [18]:

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla u - \alpha u + \gamma) + \beta \cdot \nabla u + au = f. \quad (14)$$

В разработанной модели уравнение (14) представляется в упрощенном виде без лишних членов. Таким образом, уравнение (1) для температурной задачи можно переписать в следующем виде, где независимой переменной является температура:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) = L\rho_i (\theta_s - \theta_r) \times \times \frac{\partial B_i(T)}{\partial t} \cdot S_e + L\rho_i (\theta_s - \theta_r) \cdot B_i(T) \cdot \frac{\partial S_e}{\partial t}. \quad (15)$$

То есть e_a , α , β , γ и $\bar{a}$ равны нулю. Соответственно, уравнение (2) для влажностной задачи можно переписать в следующем виде, где независимой переменной является эффективная степень насыщения водой S_e :

$$\left(1 + \frac{\rho_i}{\rho_w} \cdot B_i(T) \right) \frac{\partial S_e}{\partial t} + \nabla \cdot (-D(\theta) \nabla S_e - K_y(\theta)) + + \frac{\rho_i}{\rho_w} \cdot S_e \cdot \frac{\partial B_i(T)}{\partial t} = 0. \quad (16)$$

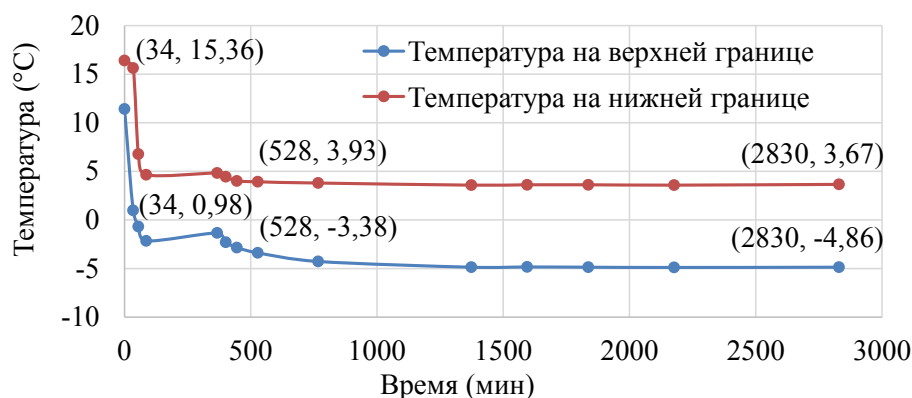


Рис. 1. Изменение температур на верхней и нижней границах по времени при проведении эксперимента

То есть e_a , α , β , f и компонент векторного коэффициента γ в горизонтальном направлении равны нулю.

Очевидно, коэффициенты системы зависят от переменной S_e , в этом случае система дифференциальных уравнений является нелинейной. Численная реализация нелинейной задачи осуществляется с помощью итерационных методов сквозного счета. Дифференциальные уравнения решаются с использованием модифицированного метода Ньютона с линейным поиском длины шага, дискретизация по времени — неявным методом Эйлера.

Верификация модели и анализ результатов

Верификация модели, предложенной в данной работе, проведена путем сравнения результатов расчета по модели без учета миграции влаги, результатов расчета на основе модели Ху Хэпина, а также опираясь на экспериментальные данные, представленные в работе [12].

Модель без учета миграции влаги широко описывается уравнением теплопроводности с учетом фазовых переходов поровой влаги. При решении задачи скрытая теплота фазовых переходов описывается частью функции теплоемкости грунта [19]. Модель Ху Хэпина является одномерной, в ней решение представлено методом конечных разностей при расчете в талой зоне по неявной схеме, а в мерзлой зоне по схеме Кранка — Николсон.

Соответственно, экспериментальные данные получены путем опыта одностороннего вертикального промерзания ненасыщенного грунта в закрытой системе, при промерзании в грунте происходит только перераспределение имеющейся влаги. В опыте используется цилиндрический образец суглинистого грунта с диаметром 11,36 см и высотой 13,68 см, начальная объемная влажность равна $0,2208 \text{ м}^3/\text{м}^3$. При проведении эксперимента температура на поверхностях изменяется по времени только на верхнем и нижнем основаниях (рис. 1), боковая поверхность теплоизолирована. Температура грунта измеряется датчиками, расположенными по разным высотам образца, распределение температуры грунта в начальный момент проведения испытания показано на рис. 2, а. Испытание продолжалось 2830 мин. [12].

В результате расчетов получены распределения температур и объемных влажностей в разное время. На рис. 2 показаны результаты распределения температур по высоте образца, полученных на основе разных моделей и на основе лабораторного наблюдения. Из полученных графиков (см. рис. 2) видно, характеристики распределения температур, вычисленного разными моделями, в основном согласуются с результатами измерений. Результаты расчета на основе разработанной модели лучше коррелируют с данными экспериментальных определений температуры грунта в

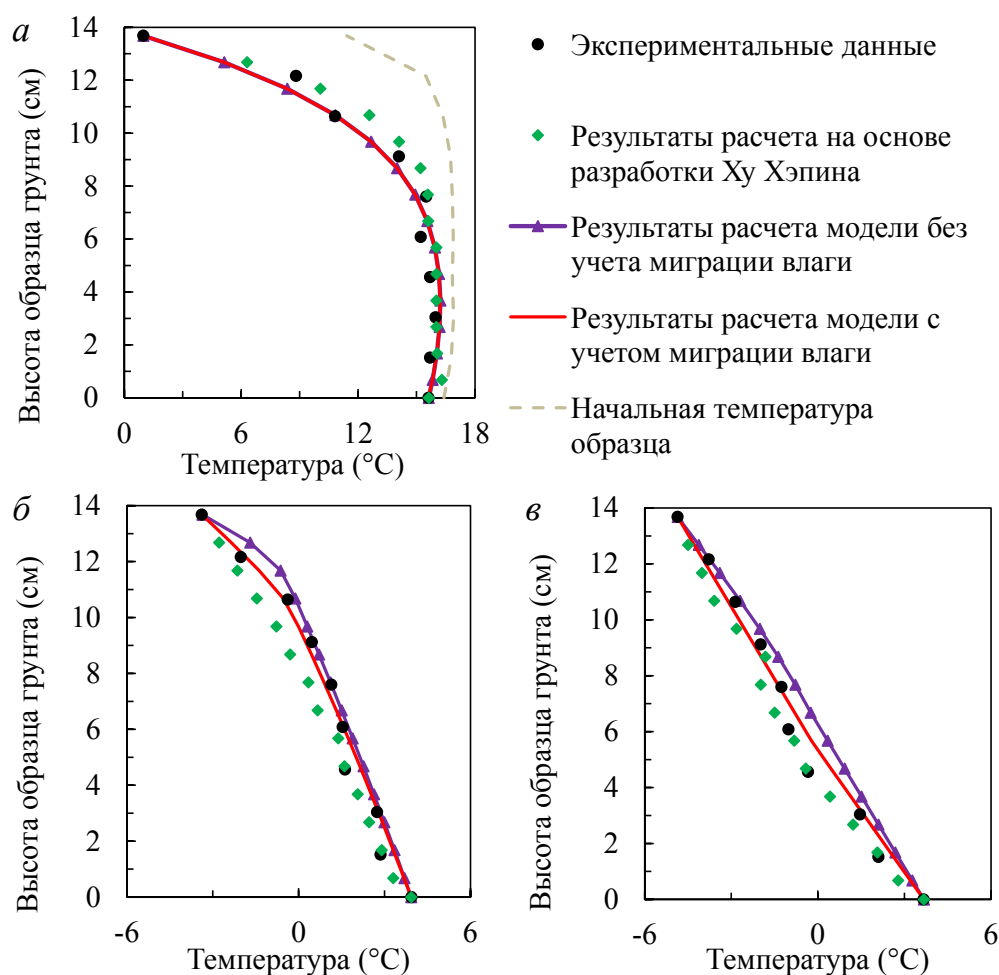


Рис. 2. Сравнение распределения температур по высоте образца, полученных на основе разных моделей и на основе лабораторного наблюдения в разные моменты времени:
 а — 34 мин.; б — 528 мин.; в — 2830 мин.

отличие от других методов. Из рис. 2 видно, что промерзание грунта началось с верхней поверхности образца примерно с момента $t = 46$ мин. До промерзания грунта результаты расчета на основе разработки Ху Хэпина больше, чем экспериментальные данные (см. рис. 2, а), а после возникновения промерзания результаты меньше, чем данные экспериментальных определений (см. рис. 2, б, в). Это связано с уменьшением связности уравнений, вызванным использованием схемы Кранка — Николсона в мерзлой зоне [20].

Миграция влаги оказывает влияние на перераспределение температуры в мерзлой зоне, соот-

ветственно, при промерзании грунта результаты расчета температур по модели без учета миграции влаги больше, чем фактически измеренные.

На рис. 3 приведено сравнение распределения объемных влажностей по высоте образца, полученных на основе двух моделей и на основе лабораторного наблюдения через 47 часов. Очевидно, что численные результаты распределения влажности и экспериментальные данные хорошо согласуются между собой: по сравнению с равномерным распределением влажности в начале испытания, через 47 часов влажность в талой зоне уменьшается, а в мерзлой зоне увеличива-

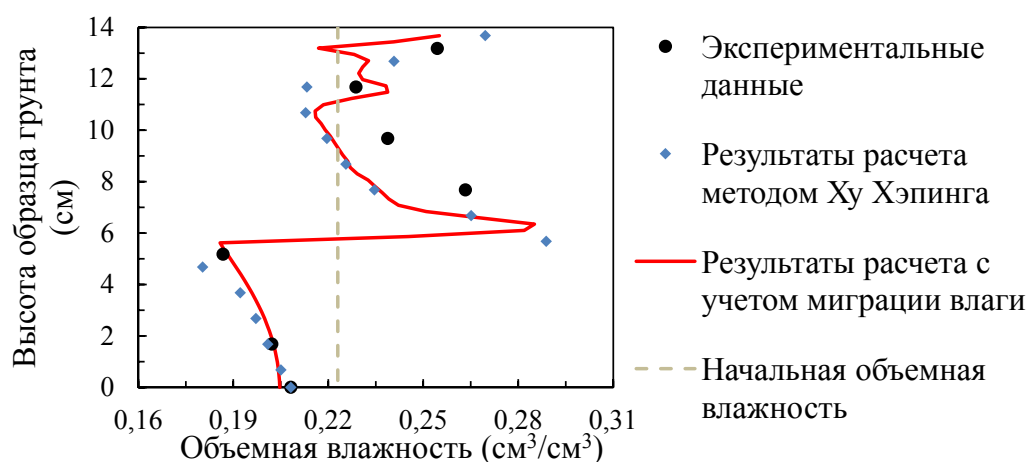


Рис. 3. Сравнение распределения объемных влажностей по высоте образца, полученных на основе разных моделей и на основе лабораторного наблюдения при $t = 47$ ч

ется, влага мигрирует из талой в мерзлую зону в процессе промерзания грунта. Скачок влажности существует вблизи фронта промерзания грунта.

Пример вычисления

В качестве практического приложения модели проведено численное моделирование теплового режима земляного полотна высокоскоростной магистрали Харбин — Далянь. Конструкция земляного полотна состоит из трех слоев грунта: щебенистый грунт, грунты крупнообломочные и песчаные и суглинков (см. рис. 4). Необходимые параметры грун-

тов и температурные условия взяты из работы [21] для участка Чанчунь, в том числе температура на поверхности задана с учетом амплитуды колебания температуры воздуха. Необходимые параметры грунтов приведены в табл. 1 и 2. Расчет выполнен на 5 лет с шагом 1 день.

Результаты расчета на пятый год представлены на рис. 5–7. Тепловая динамика грунтов земляного полотна иллюстрируется для разного времени года, при этом фазовый переход при промерзании и оттаивании грунта под основной площадкой земляного полотна происходит при температуре 0°C .

ТАБЛИЦА 1. Теплофизические параметры грунтов для разных слоев

Слой грунта*	ρ_d (кг/м³)	C_p (Дж/(м³ · К))	λ_{th} (Вт/(м · К))	λ_f (Вт/(м · К))	T_{bf} (°C)
1	1780	750	1,86	2,53	–0,1
2	2060	860	1,15	1,40	–0,1
3	1600	800	1,54	2,4	–0,2

*1 — щебенистый грунт, 2 — грунты крупнообломочные и песчаные, 3 — суглинок.

ТАБЛИЦА 2. Гидрофизические параметры грунтов для разных слоев

Слой грунта*	θ_0	k_s (м/с)	a (1/м)	m	θ_s	θ_r
1	0,18	2×10^{-4}	0,66	0,14	0,40	0
2	0,16	1×10^{-4}	0,66	0,14	0,40	0
3	0,32	1×10^{-7}	2,65	0,26	0,51	0,08

* 1 — щебенистый грунт, 2 — грунты крупнообломочные и песчаные, 3 — суглинок.

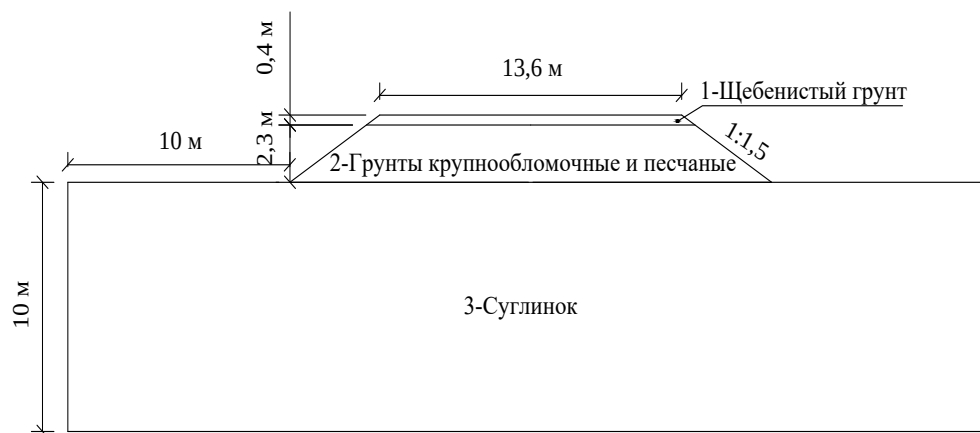


Рис. 4. Расчетная схема земляного полотна



Рис. 5. Распределение температуры по сезонам на пятый год

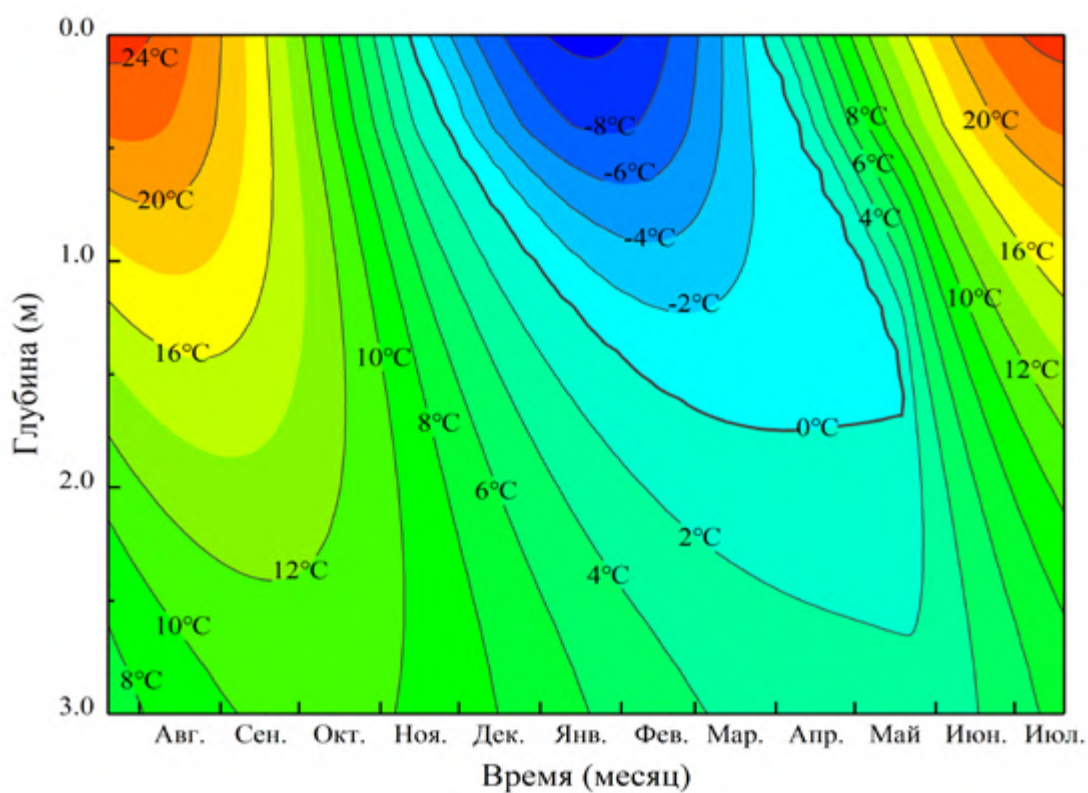


Рис. 6. Термоизоплант в центре земляного полотна под основной площадкой по результатам расчета на пятый год

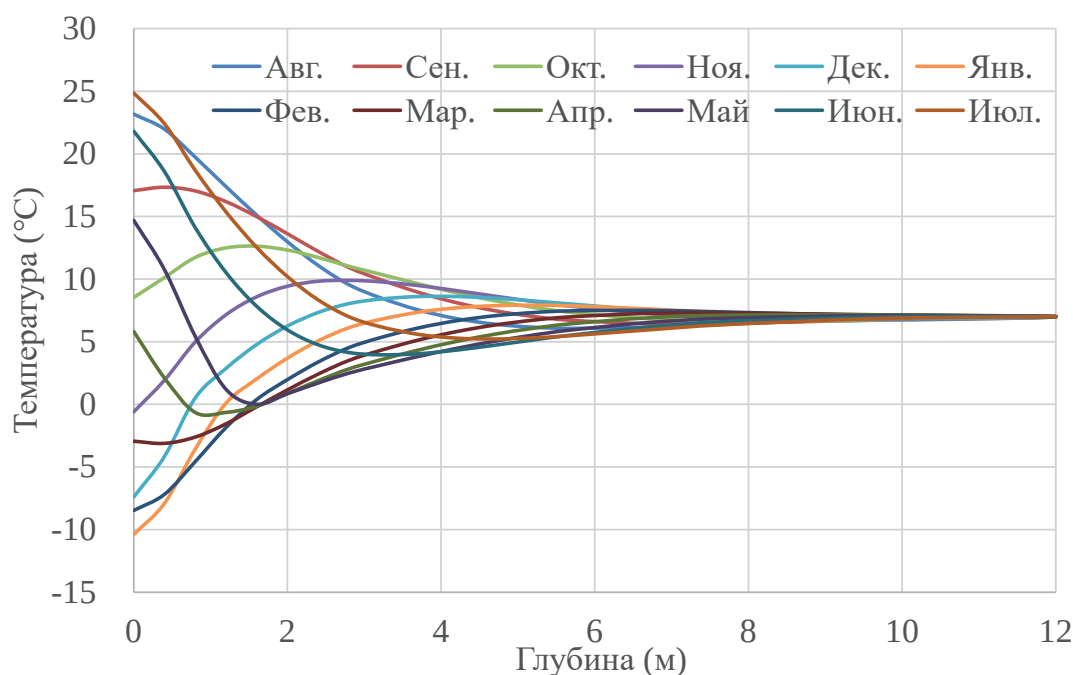


Рис. 7. Нестационарные периодические режимы температуры грунта для каждого месяца на пятый год

Из рис. 6 видно, что промерзание грунта начинается с последней декады ноября и достигает максимальной глубины в марте следующего года. В этом случае максимальная глубина промерзания под основной площадкой равна 1,8 м и совпадает с данными, вычисленными в работе [21] по методам на основе нормы GB 50007—2011. Оттаивание грунта начинается в конце марта следующего года, в основном этот процесс происходит по направлению сверху вниз от поверхности земли, в то же время максимальная глубина промерзания уменьшается, скорость оттаивания грунта вниз от поверхности больше, чем скорость оттаивания вверх от годовой максимальной глубины промерзания. Мерзлый грунт в земляном полотне исчезает в последней декаде мая следующего года.

Из рис. 7 видно, что амплитуда колебания температуры в течение года стабилизируется с увеличением глубины грунта: у поверхности температура меняется в диапазоне от $-10,4$ до $24,8$ °C, на глубине 2 м — в диапазоне от $0,9$ до $13,6$ °C, на глубине 6 м — в диапазоне от $5,8$ до $7,9$ °C, глубина

нулевых амплитуд соответствует 12 метрам, температура грунта становится равной $7,0$ °C.

Разработанная математическая модель дает возможность прогнозировать глубину промерзания грунта с учетом миграции влаги, в том числе изменение глубины промерзания и оттаивания, вызванных потеплением климата. Разработанная модель может быть использована как для изучения закономерности распределения теплового режима земляного полотна при промерзании и оттаивании, так и для совершенствования конструкции земляного полотна, чтобы защищать его от морозного пучения грунтов.

Заключение

1. В данной работе построена совмещенная математическая модель для описания теплового режима с учетом миграции влаги. Достоверность разработанной модели подтверждается хорошей сходимостью расчетных значений и экспериментальных наблюдений. 2. Приведенный пример показывает, что предложенную модель можно

применять для моделирования теплового режима земляного полотна в условиях холодного климата, чтобы изучать закономерности распределения температуры в земляном полотне. Это закладывает основу для исследования способов ликвидации дефектов земляного полотна от морозного пучения.

Библиографический список

1. Лыков А. В. Теория тепло-и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. — М.; Ленинград: Госэнергоиздат, 1963. — 535 с.
2. Иванов Н. С. Тепло- и массоперенос в мерзлых горных породах / Н. С. Иванов. — М.: Наука, 1969. — 240 с.
3. Павлов А. Р. Алгоритм раздельного определения влажностного поля в талой и мерзлой зонах в задаче тепломассопереноса / А. Р. Павлов, М. В. Матвеева // Математические заметки СВФУ. — 2010. — № 17(1). — С. 83–92.
4. Павлов А. Р. Итерационная разностная схема для задачи тепломассопереноса с фазовыми переходами в пористой среде / А. Р. Павлов, И. Г. Ларионова, М. В. Михайлова // Математические заметки СВФУ. — 2006. — № 13(2). — С. 68–78.
5. Павлов А. Р. Итерационная разностная схема для задачи тепломассопереноса при промерзании грунтов / А. Р. Павлов, М. В. Матвеева // Вестник Самарского государственного университета. — 2007. — № 6. — С. 242–253.
6. Harlan R. L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil / R. L. Harlan // Water Resources Research. — 1973. — № 9(5). — Pp. 1314–1323.
7. Sheppard M. I. Development and Testing of a Computer Model for Heat and Mass Flow in Freezing Soils / M. I. Sheppard, B. D. Kay, J. P. G. Loch // Proceedings of the third International Conference on Permafrost (July 10–13, 1978, Edmonton, Alberta, Canada). — Ottawa: National Research Council of Canada, 1978. — Pp. 76–81.
8. Jansson P-E. Model for Annual Water and Energy Flow in a Layered Soil / P-E. Jansson, S. Halldin // Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology. — 1979. — Iss. 9. — Pp. 145–163.
9. Taylor G. S. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing / G. S. Taylor, J. N. Luthin // Canadian Geotechnical Journal. — 1978. — Iss. 15(4). — Pp. 548–555.
10. Jame Y.-W. Heat and mass transfer in a freezing unsaturated porous medium / Y.-W. Jame, D. I. Norum // Water Resources Research. — 1980. — Iss. 16(4). — Pp. 811–819.
11. Fukuda M. Numerical analysis of heat-moisture flow during soil freezing / M. Fukuda, S. Nakagawa // Journal of the Japanese Society of Snow and Ice. — 1982. — Vol. 44. — Iss. 1. — Pp. 13–21.
12. Hu H. A numerical simulation for heat and moisture transfer during soil freezing / H. Hu, Sh. Yang, Zh. Lei // Journal of Hydraulic Engineering. — 1992. — Iss. 07. — Pp. 1–8.
13. Bai Q.-B. Equations and numerical simulation for coupled water and heat transfer in frozen soil / Q.-B. Bai, Li Xu, Y. Tian et al. // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. — 2015. — Iss. 37(S2). — Pp. 131–136.
14. Richards L. A. Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums / L. A. Richards // Physics. — 1931. — Iss. 1(5). — Pp. 318–333.
15. СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04—88. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах». — Утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 30 декабря 2020 г. № 915/пр. — М.: ФАУ «ФЦС», 2020. — 135 с.
16. Van Genuchten M. Th. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils / M. Th. van Genuchten // Soil Science Society of America Journal. — 1980. — Iss. 44(5). — Pp. 892–898.
17. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media / Y. Mualem // Water Resources Research. — 1976. — Iss. 12 (3). — Pp. 513–522.
18. Егоров В. И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности: учебное пособие / В. И. Егоров. — СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2006. — 77 с.
19. Кудрявцев С. А. Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечноэлементные расчеты) / С. А. Кудрявцев, И. И. Сахаров, В. Н. Парамонов. — СПб.: Георекострукция, 2014. — 247 с.
20. Shang X.-Y. Numerical Simulation Improvement of Frozen Soil's Frost Heave with Hydraulics Model / X.-Y. Shang, Guo-qing Zhou, J.-S. Zhou // Journal of China University of Mining & Technology. — 2006. — Iss. 35(6). — Pp. 762–766.

21. Wang X. Optimization Study for Subgrade Structure of HSR in Deep Seasonally Frozen Region Based on Temperature Field: Master's Thesis / X. Wang. — Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. — 101 p.

Дата поступления: 07.11.2022

Решение о публикации: 29.11.2022

Контактная информация:

ВАН Синьтун — аспирант; wangxintong@mail.ru

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

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

Mathematical Modeling of the Process of Soil Freezing of Railway Subgrade in Cold Climate Conditions

X. Wang, A. F. Kolos, A. V. Petriaev

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

For citation: X. Wang, Kolos A. F., Petriaev A. V. Mathematical Modeling of the Process of Soil Freezing of Railway Subgrade in Cold Climate Conditions // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 820–831. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-820-831

Summary

Purpose: Mathematical model for studying the process of soil freezing given moisture migration is developed. Numerical modeling of temperature mode of railway subgrade at non-stationary process in cold climate conditions is performed. **Methods:** Numerical implementation of the model is performed by mathematical module processing in COMSOL Multiphysics program, which's based on partial differential equations (PDE), with finite element method. The model reliability is confirmed by the comparison with previous experimental data and the results of simulation by other authors. **Results:** Calculation results on the developed model basis show the best correlation with experimental data in comparison with the results for other models. Calculation example and calculation results for subgrade temperature mode in freezing-thawing fifth cycle are presented. The analysis of soil freezing depth change and soil temperature fluctuation change by depth by fifth year are carried out. **Practical significance:** The developed mathematical model makes it possible to predict soil freezing depth, taking into account moisture migration, including freezing and thawing depth changes caused by climate warming. The developed model can be used both, to study the mechanism of subgrade temperature mode distribution at freezing and thawing, and to improve subgrade construction for to protect it from soil frost heaving.

Keywords: Soil freezing, temperature mode, moisture migration, numerical modelling, railway subgrade.

References

1. Lykov A. V. *Teoriya teplo-i massoperenosa* [Theory of heat and mass transfer]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1963, 535 p. (In Russian)

2. Ivanov N. S. *Teplo i massoperenos v merzlyh gornyh porodah* [Heat and mass transfer in frozen soil]. Moscow: Nauka Publ., 1969, 240 p. (In Russian)

3. Pavlov A. R., Matveeva M. V. Algoritm razdel'nogo opredeleniya vlazhnostnogo polya v taloj i merzloj zonah v zadache teplomassoperenosa [Algorithm for separate deter-

mination of the humidity field in the thawed and frozen zones in the problem of heat and mass transfer]. *Matematicheskie zametki SVFU* [Mathematical notes of NEFU]. Yakutsk: North-Eastern Federal University Publ., 2010. vol. 17, I. 1, pp 83–92. (In Russian)

4. Pavlov A. R., Larionova I. G., Mihajlova M. V. Iteracionnaya raznostnaya skhema dlya zadachi teplomassoperenosa s fazovymi perekhodami v poristoj srede [Iterative difference scheme for the problem of heat and mass transfer with phase transitions in a porous medium].

Matematicheskie zametki SVFU [Mathematical notes of NEFU]. Yakutsk: North-Eastern Federal University Publ., 2006, vol. 13, I. 2, pp. 68–78. (In Russian)

5. Pavlov A. R., Matveeva M. V. Iteracionnaya raznostnaya skhema dlya zadachi teplomassope-renosa pri promerzanii gruntov [Iterative finite-difference scheme for the problem of heat and mass transfer in freezing frounds]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vestnik of Samara State University]. Samara: Samara State University Publ., 2007, I. 6(56), pp. 242–253. (In Russian)

6. Harlan R. L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil. *Water Resources Research*. 1973, I. 9(5), pp. 1314–1323.

7. Sheppard M. I., Kay B. D., Loch J. P. G. Development and Testing of a Computer Model for Heat and Mass Flow in Freezing Soils. Proceedings of the third International Conference on Permafrost (July 10–13, 1978, Edmonton, Alberta, Canada). Ottawa: National Research Council of Canada, 1978, pp. 76–81.

8. Jansson P-E., Halldin S. Model for Annual Water and Energy Flow in a Layered Soil. *Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology*. 1979, I. 9, pp. 145–163.

9. Taylor G. S., Luthin J. N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing. *Canadian Geotechnical Journal*. 1978, I. 15(4), pp. 548–555.

10. Jame Y.-W., Norum D. I. Heat and mass transfer in a freezing unsaturated porous medium. *Water Resources Research*. 1980, I. 16(4), pp. 811–819.

11. Fukuda M., Nakagawa S. Numerical analysis of heat-moisture flow during soil freezing. *Journal of the Japanese Society of Snow and Ice*. 1982, vol. 44, I. 1, pp. 13–21.

12. Hu H., Yang Sh., Lei Zh. A numerical simulation for heat and moisture transfer during soil freezing. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1992, I. 07, pp. 1–8.

13. Bai Q.-B., Xu LI, Tian Y. Equations and numerical simulation for coupled water and heat transfer in frozen soil. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2015, I. 37(S2), pp. 131–136.

14. Richards L. A. Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums. *Physics*. 1931, I. 1(5), pp. 318–333.

15. SP 25.13330.2020 “SNIIP 2.02.04—88. Osnovaniya i fundamenti na vechnomerzlykh gruntakh”. *Utv. Prikazom*

Ministerstva stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva RF ot 30 dekabrya 2020 g. № 915/pr [SP 25.13330.2020 “SNIIP 2.02.04—88. Bases and foundations on permafrost soils”. Approved. Order of the Ministry of Construction, Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 30, 2020 № 915/pr]. Moscow: FAU “FTsS” Publ., 2020. 135 p. (In Russian)

16. Van Genuchten M. Th. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1980, I. 44(5), pp. 892–898.

17. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*. 1976, I. 12 (3), pp. 513–522.

18. Egorov V. I. *Primenenie EVM dlya resheniya zadach teploprovodnosti: uchebnoe posobie* [Application of computers for solving heat conduction problems. Textbook]. St. Petersburg: ITMO University Publ., 2006, 77 p. (In Russian)

19. Kudryavtsev S. A., Sakharov I. I., Paramonov V. N. *Promerzanie i ottaivanie gruntov (prakticheskie primery i konechnoelementnye raschety)* [Freezing and thawing of soils (practical examples and finite element calculations)]. St. Petersburg: Georeconstruction Group of Companies Publ., 2014. 247 p. (In Russian)

20. Shang X.-Y., Zhou Guo-qing, Zhou J.-S. Numerical Simulation Improvement of Frozen Soil's Frost Heave with Hydraulics Model. *Journal of China University of Mining & Technology*. 2006, I. 35(6), pp. 762–766.

21. Wang X. Optimization Study for Subgrade Structure of HSR in Deep Seasonally Frozen Region Based on Temperature Field: Master's Thesis. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019, 101 p.

Received: November 07, 2022

Accepted: November 29, 2022

Author's information:

Xintong WANG — Postgraduate Student;

wangxintong@mail.ru

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

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

УДК 629.1.02

Математическая модель колесно-моторного блока локомотива для условий технологического процесса диагностирования подшипниковых узлов на позиции виброакустического контроля

М. Ш. Шадмонходжаев, А. П. Зеленченко, И. А. Ролле

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

Для цитирования: Шадмонходжаев М. Ш., Зеленченко А. П., Ролле И. А. Математическая модель колесно-моторного блока локомотива для условий технологического процесса диагностирования подшипниковых узлов на позиции виброакустического контроля // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 832-838. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-832-838

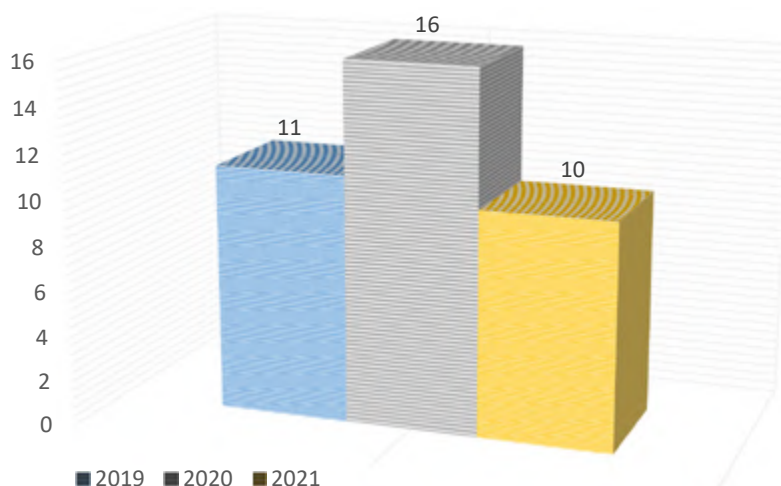
Аннотация

Цель: Проведение экспериментальных исследований в условиях локомотивного депо, переход к математическому моделированию колесно-моторного блока для условий позиции безразборной диагностики подшипников тягового электрического двигателя. **Методы:** Диагностические комплексы, позволяющие определять техническое состояние колесно-моторного блока в локомотивных депо. С целью определения подходов для выбора и оценки параметров источников питания для позиции безразборной виброакустической диагностики колесно-моторных блоков локомотивного депо выполнен анализ методологии проектирования математической модели колесно-моторных блоков. **Результаты:** Определен момент инерции колесной пары, соединенной с якорем электрического двигателя для условий процесса диагностирования подшипниковых узлов колесно-моторного блока. **Практическая значимость:** Выполнен эксперимент в локомотивном депо «Узбекистон» АО «Узбекистон темир йуллари» по определению момента инерции колесно-моторного блока и момента сопротивления вращению.

Ключевые слова: Электроподвижной состав, источник питания, тяговый электродвигатель, колесно-моторный блок, виброакустическая диагностика, момент инерции.

Повышение безопасности движения поездов является одной из приоритетных задач в компании АО «Узбекистан темир йуллари», что неразрывно связано со структурными преобразованиями, реализуемыми на железнодорожном транспорте, а также с мероприятиями, направленными на повышение безотказности технических средств. Наиболее ответственными в этом отношении являются подшипниковые узлы колесно-мотор-

ных блоков локомотивов. Внедрение в локомотиворемонтном производстве технологических процессов диагностирования подшипниковых узлов, основанных на анализе виброакустических проявлений в процессе их работы, характеризуется высокой эффективностью, о чем свидетельствуют данные по выявленным дефектам за период 2019–2021 гг. (рис. 1). Соответствующие диагностические комплексы находят массовое



Дефекты подшипников	Количество за месяц												Сумма
Количество за год	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
2019	1	—	1	1	2	2	1	1	1	1	—	—	11
2020	1	1	1	1	2	—	3	1	2	1	1	1	16
2021	2	1	1	1	1	2	—	—	—	—	—	—	10
Итого													37

Рис. 1. Данные о выявленных дефектах подшипников за период 2019–2021 гг., по данным депо «Узбекистон»

применение в локомотивных депо при производстве текущих ремонтов в объеме ТР-1 [1–3].

Одним из основных элементов комплекса виброакустической диагностики подшипниковых узлов колесно-моторных блоков является его источник питания, используемый для приведения во вращение якоря тягового электродвигателя и колесной пары [1–4].

Согласно требованиям к технологическому процессу диагностики источник питания должен обеспечивать:

- диапазон частот вращения до $n = 200$ об/мин;
- требуемое значение мощности источника питания;
- высокие энергетические характеристики (КПД, коэффициент мощности, низкий коэффициент пульсаций в цепи тягового электродвигателя, допустимая эмиссия высших гармоник в питающую цеховую сеть).

Условие соблюдения всех этих требований влечет за собой необходимость разработки и создания источника питания, адаптированного для условий процесса диагностики [5–8].

В этой связи целесообразно моделирование совместной работы системы «источник питания — колесно-моторный блок» с учетом ее электрических, а также механических характеристик, таких как момент инерции J и момент сопротивления M_c [9].

Эти параметры связаны известным уравнением: для случая питания от сети:

$$J \frac{d\omega}{dt} = (M_{\text{вр}} - M_c)$$

или для режима выбега:

$$J \frac{d\omega}{dt} = -M_c,$$

где $M_{вр}$ — вращающий момент тягового двигателя, Н · м;

ω — угловая скорость вращения якоря, рад/с.

Момент сопротивления вращению колесно-моторного блока M_c имеет множество составляющих, в связи с чем аналитическое определение его затруднено. Аналогично затруднено и аналитическое определение момента инерции вращающихся частей J .

Зачастую неизвестные параметры M_c и J проще определить экспериментально.

Момент сопротивления возможно определить исходя из величины затрат мощности P_v на преодоление сил сопротивления при работе колесно-моторного блока при оборотах n_d . Ее можно определить экспериментально исходя из значений тока, потребляемого двигателем I_d и подведенного напряжения U_d , сопротивления обмоток, Вт:

$$P_v = P_{xx} - \Delta P_{щ} - \Delta P_m,$$

где $P_{xx} = U_d I_d$ — мощность, потребляемая из сети, Вт;

$P_{щ} = \Delta U_{щ} I_d$ — потери мощности в щеточном контакте тягового электродвигателя, Вт, $\Delta U_{щ} = 2 В$;

$\Delta P_m = I_{cp}^2 \sum R$ — потери мощности в меди цепи обмоток тягового электродвигателя, Вт.

Полное сопротивление обмоток $\sum R$ для тягового электродвигателя представляет сумму сопротивлений обмоток якоря, главных и добавочных полюсов, компенсационной обмотки, с учетом приведения их значений к текущему значению температуры обмоток.

В результате момент сопротивления, приведенный к валу якоря тягового электродвигателя, Н · м:

$$M_c = \frac{60 P_v}{2 \pi n_d}.$$

Момент инерции вращающихся частей возможно определить исходя из изменения скорости вращения якоря тягового электродвигателя (колесной пары) во времени, кг · м²:

$$J = \frac{60 M_c \Delta t}{2 \pi \Delta n},$$

где изменение скорости вращения Δn (об/мин) определяется за время Δt (с) экспериментально, при работе колесно-моторного блока в режиме выбега.

Указанные эксперименты предназначены для колесно-моторного блока электровоза ВЛ80с с тяговым электродвигателем НБ-418кб и колесно-моторного блока электропоезда ЭР9М с тяговым электродвигателем РТ-51Д на позиции виброакустической диагностики локомотивного депо «Узбекистон» (рис. 2, а, б).

По приведенным зависимостям были определены искомые параметры для колесно-моторного блока электровоза ВЛ80с (см. табл.).

На основании полученных результатов была составлена имитационная модель системы «источник питания — колесно-моторный блок» в программе Matlab/Simulink (рис. 3, 4). Адекватность модели подтверждена результатами эксперимента, проведенного в локомотивном депо «Узбекистон». Расхождения результатов ряда

Параметры работы колесно-моторного блока электровоза ВЛ80с на позиции виброакустической диагностики

Измеренные значения		Рассчитанные значения					
I_d	U_d	J	M_c	P_v	P_{xx}	$\Delta P_{щ}$	ΔP_m
А	В	кг · м ²	Н · м	Вт	Вт	Вт	Вт
20	58	645	81,61	1107,7	1160	40	12,32

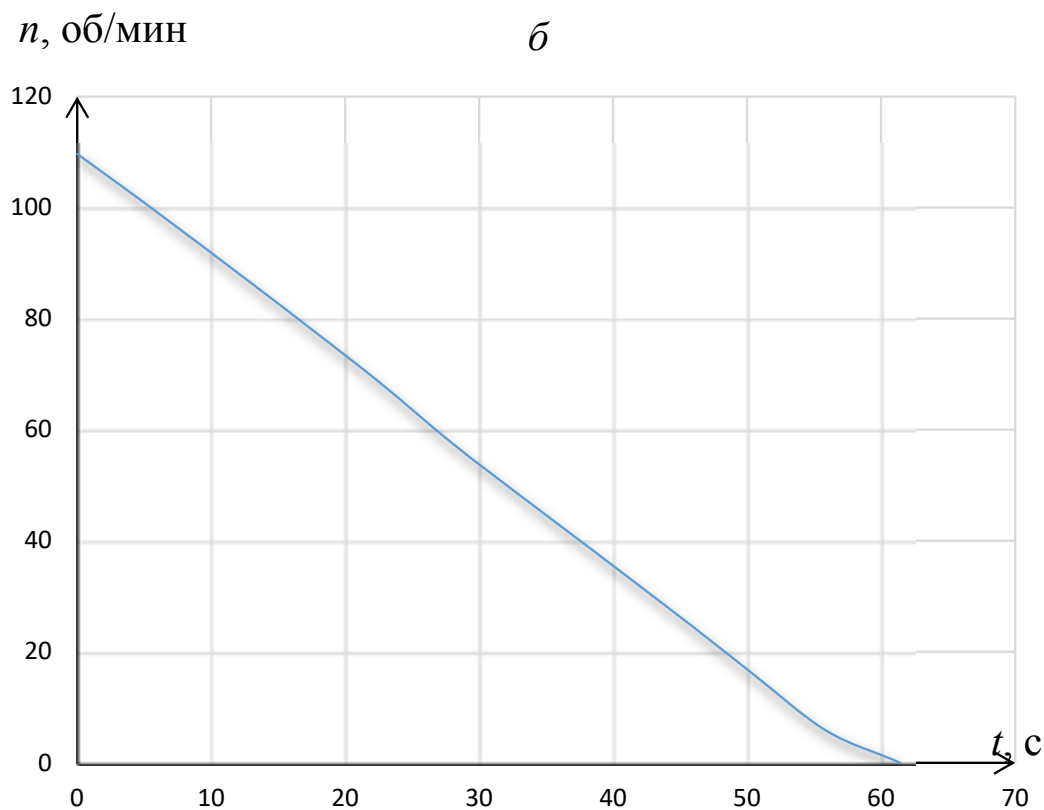
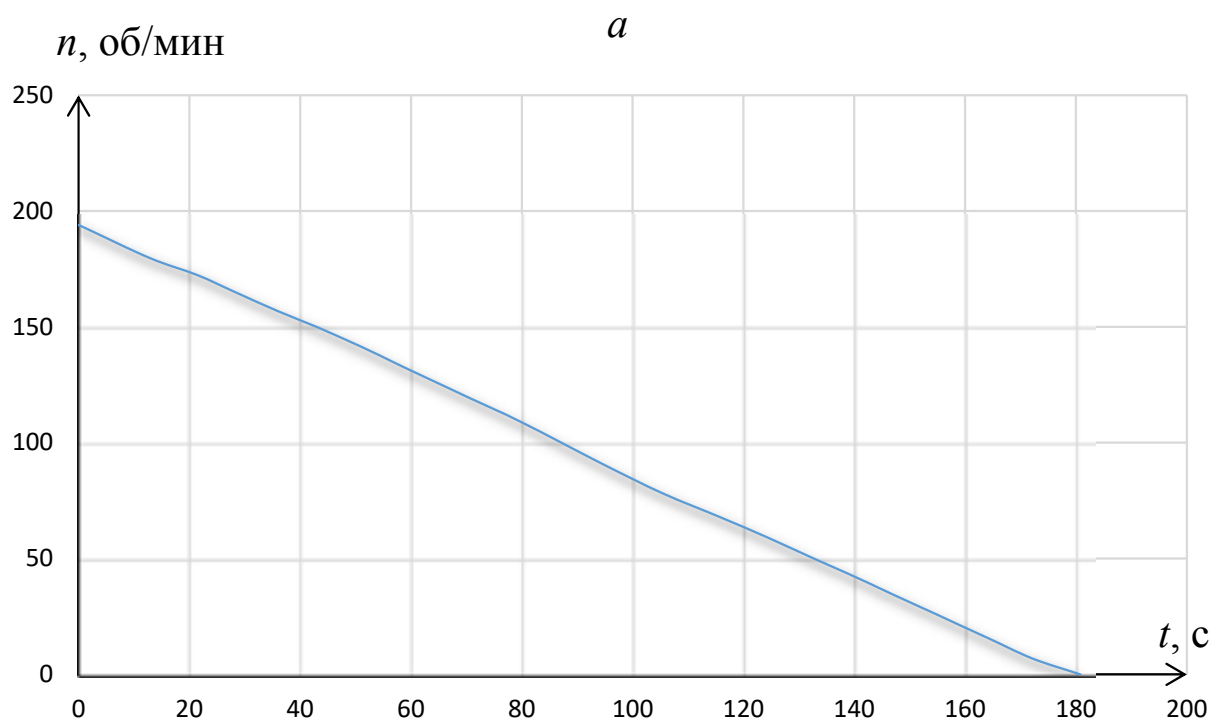


Рис. 2. Экспериментальные кривые выбега вращающихся частей колесно-моторных блоков электровоза ВЛ80с (*a*) и электропоезда ЭР9М (*б*)

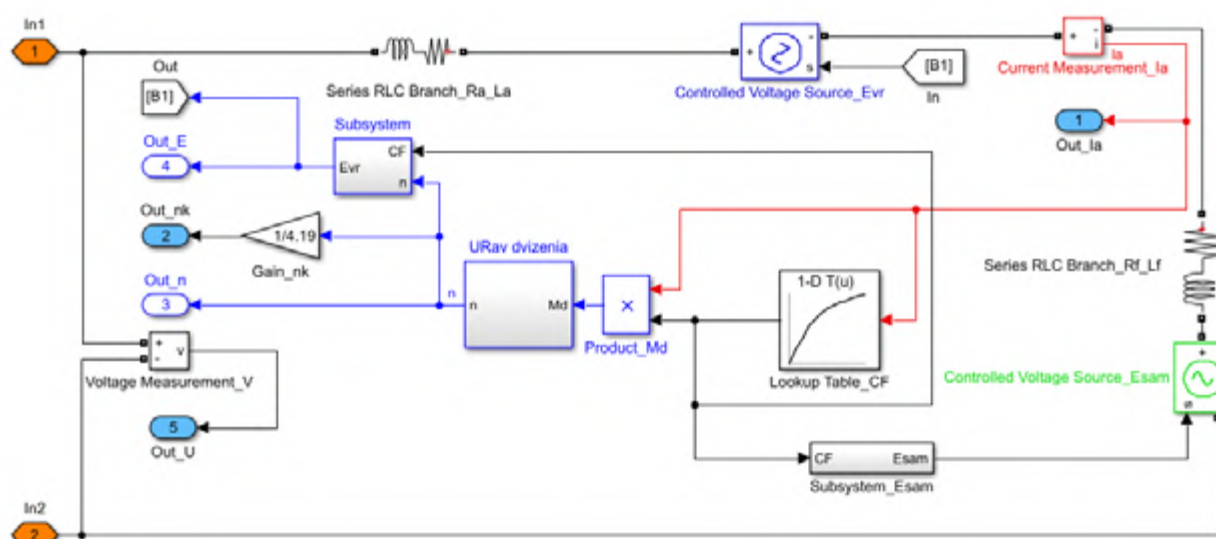


Рис. 3. Математическая модель колесно-моторного блока электроваза ВЛ80С в программе MatLab/Simulink

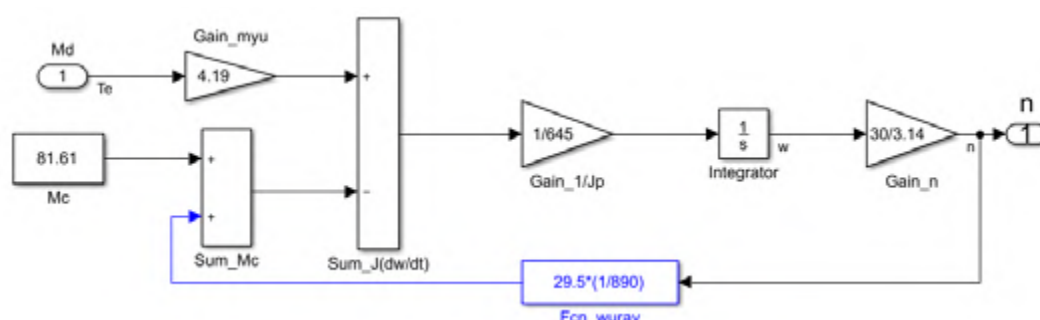


Рис. 4. Математическая модель механической части колесно-моторного блока электроваза ВЛ80С в программе MatLab/Simulink

экспериментов и результатов моделирования по значениям конечной скорости вращения, а также времени разгона и выбега не превышает 10 %.

Библиографический список

1. Зеленченко А. П. Надежность электрического подвижного состава: учебное пособие / А. П. Зеленченко. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2001. — 37 с.
2. Зеленченко А. П. Техническая диагностика электрического подвижного состава: учебное пособие / А. П. Зеленченко, А. Е. Цаплин, И. А. Ролле. — СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2016. — 68 с.
3. Зеленченко А. П. Диагностика электрооборудования силовой схемы моторного вагона электропоезда ЭР2: учебное пособие / А. П. Зеленченко. — СПб.: МПС РФ «ПГУПС», 1999. — 28 с.
4. Зеленченко А. П. Диагностические комплексы электрического подвижного состава: учеб. пособие / А. П. Зеленченко, Д. В. Федоров. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. — 112 с.
5. Шадмонходжаев М. Ш. Позиция диагностики межкатушечных соединений тягового двигателя / М. Ш. Шадмонходжаев, А. П. Зеленченко // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы. — 2019. — С. 78–81.

6. Шадмонходжаев М. Ш. Позиция виброакустической диагностики подшипников качения электрического подвижного состава / М. Ш. Шадмонходжаев, А. П. Зеленченко // Материалы X Международного симпозиума «Элтранс — 2019» ФГБОУ ВО ПГУПС. — СПб., 2019. — С. 63–69.

7. Зеленченко А. П. Источник питания для позиции безразборной диагностики подшипников / А. П. Зеленченко, А. А. Богдан, М. Ш. Шадмонходжаев // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Т. 18. — Вып. 4. — С. 554–560.

8. Шадмонходжаев М. Ш. Разработка источника питания для позиции виброакустической диагностики подшипников локомотивного депо / М. Ш. Шадмонходжаев, А. П. Зеленченко // Бюллетень результатов науч-

ных исследований. — 2022. — Вып. 2. — С. 43–49. — DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-43-49

9. Осипов С. И. Теория электрической тяги. Руководство к выполнению лабораторных работ для студентов V курса / С. И. Осипов. — М., 2005.

Дата поступления: 26.09.2022

Решение о публикации: 06.11.2022

Контактная информация:

ШАДМОНХОДЖАЕВ Муродилла Шухратиллаевич — аспирант; smurodilla@gmail.com

ЗЕЛЕНЧЕНКО Алексей Петрович — канд. техн. наук, доц.; v-zelenchenko46@mail.ru

РОЛЛЕ Игорь Александрович — канд. техн. наук, доц.; igor.rollet@inbox.ru

Mathematical Model of Locomotive Wheel-Motor Block for the Conditions of Diagnostics Technological Process for Bearing Units at the Position of Vibroacoustic Control

M. Sh. Shadmonkhodjaev, A. P. Zelenchenko, I. A. Rolle

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

For citation: Shadmonkhodjaev M. Sh., Zelenchenko A. P., Rolle I. A. Mathematical Model of Locomotive Wheel-Motor Block for the Conditions of Diagnostics Technological Process for Bearing Units at the Position of Vibroacoustic Control // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 832–838. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-832-838

Summary

Purpose: The conduction of experimental studies in the conditions of locomotive depot, the transition to mathematical modeling of wheel-motor block for the conditions of diagnostics position, not allowing disassembly, of traction electric motor bearings. **Methods:** Diagnostic complexes allowing to determine wheel-motor block technical state in locomotive depots. In order to determine the approaches for the choice and evaluation of power source parameters for vibroacoustic diagnostics position, not allowing disassembly, of wheel-motor blocks of locomotive depot the analysis of designing methodology for wheel-motor block mathematical model was carried out. **Results:** Inertia moment of wheelset connected to electric motor anchor is determined for the conditions of diagnostics process of bearing units of a wheel-motor block. **Practical significance:** Experiment in “Uzbekiston” locomotive depot of JSC “Uzbekiston Temir Yullari” to determine inertia moment of wheel-motor block and resistance to rotation moment was carried out.

Keywords: Electric rolling stock, power source, traction electric motor, wheel-motor block, vibroacoustic diagnostics, inertia moment.

References

1. Zelenchenko A. P. *Nadezhnost' elektricheskogo podvizhnogo sostava: uchebnoe posobie* [Reliability of electric rolling stock: a tutorial]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2001, 37 p. (In Russian)
2. Zelenchenko A. P., Tsaplin A. E., Rolle I. A. *Tekhnicheskaya diagnostika elektricheskogo podvizhnogo sostava: uchebnoe posobie* [Technical diagnostics of electric rolling stock: textbook]. St. Petersburg: FGBOU VPO PGUPS Publ., 2016, 68 p. (In Russian)
3. Zelenchenko A. P. *Diagnostika elektrooborudovaniya silovoy skhemy motornogo vagona elektropoezda ER2: uchebnoe posobie* [Diagnostics of the electrical equipment of the power circuit of the motor car of the ER2 electric train: a tutorial]. St. Petersburg: MPS RF "PGUPS" Publ., 1999, 28 p. (In Russian)
4. Zelenchenko A. P., Fedorov D. V. *Diagnosticheckie komplekсы elektricheskogo podvizhnogo sostava: ucheb. posobie* [Diagnostic complexes of electric rolling stock: tutorial]. Moscow: FGBOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2014, 112 p. (In Russian)
5. Shadmonkhodzhaev M. Sh., Zelenchenko A. P. Pozitsiya diagnostiki mezhkatushechnykh soedineniy tyagovogo dvigatelya [Position of diagnostics of intercoil connections of the traction motor]. *Transport: problemy, idei, perspektivy* [Transport: problems, ideas, prospects]. 2019, pp. 78–81. (In Russian)
6. Shadmonkhodzhaev M. Sh., Zelenchenko A. P. *Pozitsiya vibroakusticheskoy diagnostiki podshipnikov kacheniya elektricheskogo podvizhnogo sostava* [Position of vibroacoustic diagnostics of rolling bearings of electric rolling stock]. St. Petersburg, 2019, pp. 63–69. (In Russian)
7. Zelenchenko A. P., Bogdan A. A., Shadmonkhodzhaev M. Sh. Istochnik pitaniya dlya pozitsii bezrazbornoy diagnostiki podshipnikov [Power supply for CIP bearing position]. *Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the St. Petersburg State University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS, 2021, vol. 18, I. 4, pp. 554–560. (In Russian)
8. Shadmonkhodzhaev M. Sh., Zelenchenko A. P. Razrabotka istochnika pitaniya dlya pozitsii vibroakusticheskoy diagnostiki podshipnikov lokomotivnogo depo [Development of a power source for the position of vibroacoustic diagnostics of bearings of a locomotive depot]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Research Results]. 2022, I. 2, pp. 43–49. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-43-49. (In Russian)
9. Osipov S. I. *Teoriya elektricheskoy tyagi. Rukovodstvo k vypolneniyu laboratornykh rabot dlya studentov V kursa* [Theory of electric traction. Guide to the implementation of laboratory work for students of the 5th year]. Moscow, 2005. (In Russian)

Received: September 26, 2022

Accepted: November 06, 2022

Author's information:

Murodilla Sh. SHADMONKHODJAEV — Postgraduate Student; smurodilla@gmail.com

Aleksey P. ZELENCHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; v-zelenchenko46@mail.ru

Igor A. ROLLE — PhD in Engineering, Associate Professor; igor.rollet@inbox.ru

УДК 656.073.2

Модель приоритетов обслуживания подач вагонов

Н. В. Малышев¹, С. А. Бойков²

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

²Октябрьская железная дорога — филиал ОАО «РЖД», Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, Подъездной пер., 1

Для цитирования: Малышев Н. В., Бойков С. А. Модель приоритетов обслуживания подач вагонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 839–846. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-839-846

Аннотация

Цель: Для определения оптимальной точки переключения работы крана между платформами выполнить моделирование задачи выбора приоритетов обслуживания подач вагонов краном, отличающейся учетом штрафов за излишний простой подач на грузовом фронте. **Методы:** Для поиска распределения используются методы теории вероятностей, массового обслуживания и математической статистики, а также экспертных оценок. **Результаты:** Разработана модель приоритетов обслуживания подач вагонов. Определены зависимости средней стоимости времени простоя двух подач вагонов под грузовыми операциями — от момента переключения между подачами при распределении Эрланга k -го порядка времени выполнения грузовой операции и его частного случая — экспоненциального распределения при смешанном приоритете обслуживания подач вагонов. **Практическая значимость:** Предложено рациональное распределение работы крана, позволяющее снизить расходы терминала на штрафы за излишний простой подач на грузовом фронте.

Ключевые слова: Автоматизация, пути необщего пользования, терминал, контейнерно-транспортная система, ускоренная доставка грузов.

Введение

Одной из основных задач, стоящих перед терминалом, является повышение перерабатывающей способности [1]. На этот показатель непосредственным образом влияет работа крана на погрузо-разгрузочном пути [2, 3]. Для поиска оптимального приоритета обслуживания на грузовом фронте выбрана теория массового обслуживания (ТМО), так как вся грузовая работа заключается в том или ином виде обслуживания:

работа с транспортными средствами на грузовых фронтах; выполнение маневровых операций по подаче и уборке вагонов на пути терминала; логистические операции; определение структуры парка подъемно-транспортных машин и др. [4].

В ТМО входящие потоки требований различают по физической природе и математической структуре [5]. В разработанной модели входящие потоки требований — это вагонопотоки. Основной характеристикой входящих потоков в ТМО

является изменение частоты поступления требований в единицу времени, проявляющееся при различных законах распределения.

К особенностям функционирования систем массового обслуживания относится дисциплина очереди в виде приоритета обслуживания требований. Проблема приоритета обслуживания вагонов имеет важное значение в условиях оперативного руководства и текущего планирования работы контейнерного терминала [6, 7]. Порядок работы при погрузо-разгрузочных операциях с вагонами непосредственно влияет на такие показатели, как простой вагона, эксплуатационные расходы, а значит, и доход терминала [8–10].

Если в момент выполнения грузовых операций с вагонами меньшей стоимости за простой на грузовой фронт поступают вагоны с большей стоимостью за простой, предпочтения отдаются только прибывшим вагонам, причем в виде абсолютного приоритета. Причина такого решения заключается в большей стоимости простоя такого вагона, а также в больших штрафах при нарушении времени отправления ускоренных контейнерных поездов. При этом на практике выбор приоритета обслуживания в сторону этих вагонов не всегда рационален, так как не учитывается количество времени до завершения обслуживания подачи уже обслуживаемых вагонов.

Для модели выбран смещенный приоритет — это дисциплина очереди, при которой прерывается требование обслуживания с низким приоритетом при поступлении требований более высокого приоритета, если оно непрерывно обслуживалось в течение времени z_0 , и не вытесняется, если оно обслуживается в течение времени $\geq z_0$. В таком случае момент z_0 является точкой переключения.

Наилучший приоритет обслуживания вагонов на грузовом фронте можно выбрать непосредственным расчетом, сравнивая эксплуатационные затраты при разных вариантах последовательности выполнения

грузовых операций, в виде стоимости времени простоя, штрафов за излишний простой. Размеры затрат для каждого варианта обслуживания определяются умножением среднего времени пребывания на грузовом фронте (времени ожидания) на стоимость 1 минуты простоя и на число обслуженных вагонов. Выбор же оптимального смешанного приоритета в основном заключается в определении точки переключения z_0 работы крана между подачами. Для выявления ситуации, при которой необходимо использовать точку переключения работы крана между подачами, предлагается алгоритм на рис. 1.

Цель поиска z_0 состоит в минимизации целевой функции, выражающей среднюю стоимость времени простоя двух подач вагонов под грузовыми операциями на погрузо-разгрузочном пути, минута-рубль:

$$T(z) = c_1 \lambda_1 t_{10}^{\text{преб}} + c_2 \lambda_2 t_{20}^{\text{преб}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где c_1 и c_2 — штраф за излишний простой первой и второй подач вагонов, отнесенных к минуте, руб.;

λ_1 и λ_2 — интенсивность поступления первой и второй подач вагонов;

$t_{10}^{\text{преб}}$ и $t_{20}^{\text{преб}}$ — среднее время пребывания первой и второй подач вагонов на грузовом фронте, являющиеся функциями от z_0 , минуты.

Следовательно, используя формулы из [108], среднее время пребывания первой подачи, мин.:

$$t_{10}^{\text{преб}} = \frac{\lambda_1 \sigma^2(t_1) + \lambda_2 \int_z^\infty (x_2 - z)^2 p_2(x_2) dx_2}{2(1 - p_2)}, \quad (2)$$

а также выражения для величины $t_{20}^{\text{преб}}$, мин.:

$$t_{20}^{\text{преб}} = t_2 + \frac{p_1}{1 - p_1} \int_0^z F_2^c(x_2) dx_2 + \frac{\lambda_1 \sigma^2(t_1) + \lambda_2 \sigma^2(t_1)}{2(1 - p_1)(1 - p_1 - p_2)}, \quad (3)$$

получаем, минута-рубль:

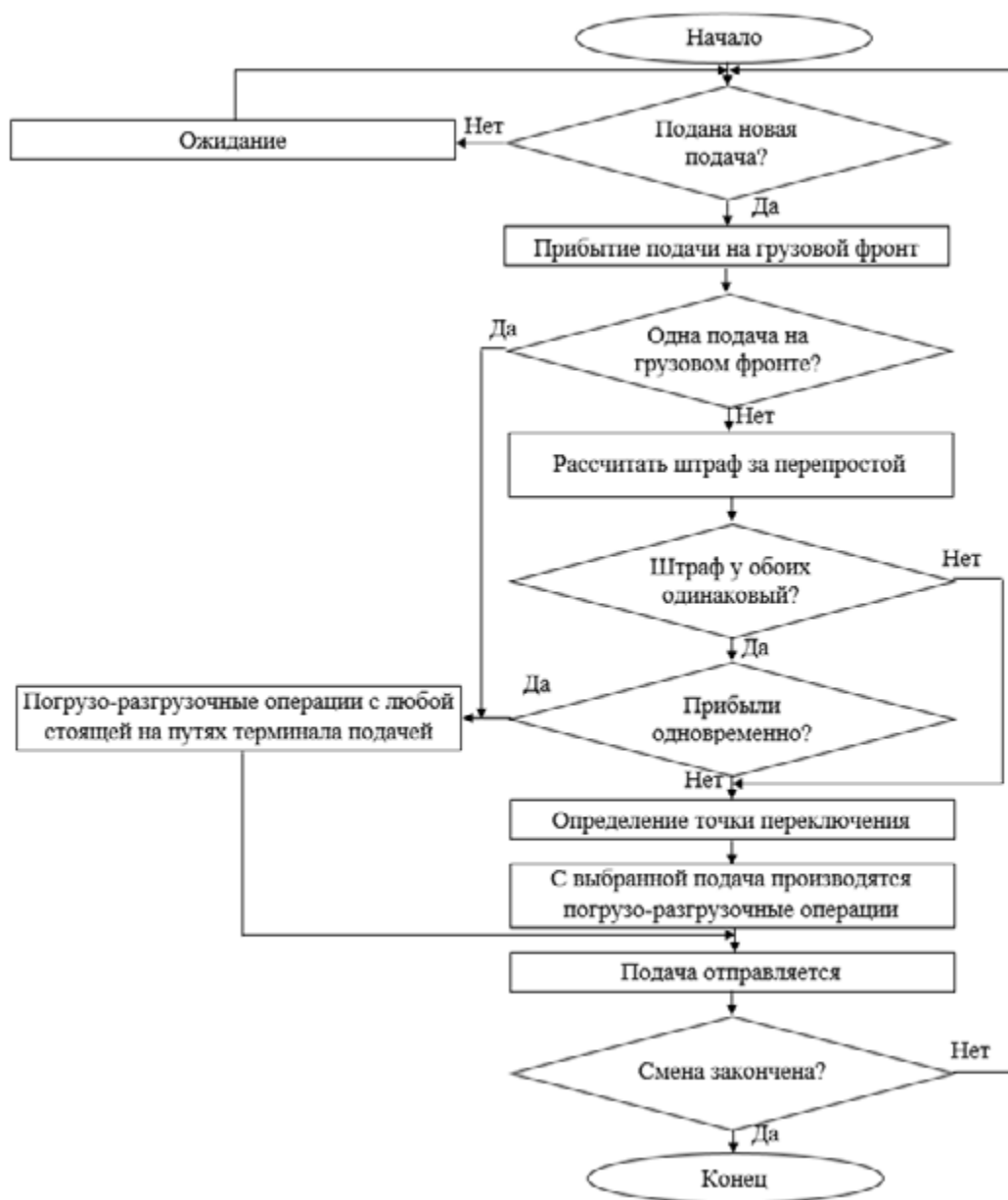


Рис. 1. Алгоритм применения точки переключения работы крана между подачами

$$\begin{aligned}
 T(z) = & \frac{c_1 \lambda_2 \lambda_1}{2(1-\rho_1)} \int_z^{\infty} (x_2 - z)^2 S_2(x_2) dx_2 - \\
 & - \frac{c_2 \lambda_2 \rho_1}{1-\rho_1} \int_z^{\infty} (x_2 - z) S_2(x_2) dx_2 + c_1 \left[\rho_1 + \frac{\lambda_1^2 E(S_1^2)}{2(1-\rho_1)} \right] + \\
 & + c_2 \left[\frac{\rho_2}{1-\rho_2} + \frac{\lambda_2 \lambda_1 E(S_1^2) + \lambda_2^2 E(S_2^2)}{2(1-\rho_1-\rho_2)(1-\rho_1)} \right], \quad (4)
 \end{aligned}$$

где ρ_2 — нагрузка крана от неприоритетных вагонов;

$E(S_2^2)$ — математическое ожидание оставшейся длительности обслуживания;

x_2 — точка времени;

$S(x)$ — плотность вероятности;

$F(x)$ — функция распределения.

Оптимальная точка переключения работы крана между подачами вагонов

Оптимальное значение относительного времени переключения обслуживания потоков z_0 величины z можно рассчитать по формуле $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ или:

$$\frac{c_1}{t_1} = \frac{c_2}{E(S_2^{z_0})}, \quad (5)$$

где t_1 — среднее время выполнения грузовых операций с первой подачей;

$E(S_2^{z_0})$ — среднее время, оставшееся до завершения обслуживания требования, которое уже обслуживалось в течение времени z_0 , мин.:

$$E(S_2^{z_0}) = \frac{\int_{z_0}^{\infty} (x_2 - z_0) S_2(x_2) dx_2}{\int_{z_0}^{\infty} S_2(x_2) dx_2}. \quad (6)$$

Для того чтобы точка z_0 давала минимум целевой функции, необходимо выполнение следующего условия:

$$\frac{S_2(z_0)}{F_2^c(z_0)} < \frac{c_1}{c_2 t_1}, \quad (7)$$

Используя (5), получаем следующее достаточное условие для того, чтобы z_0 являлась точкой минимума:

$$\frac{S_2(z_0)}{F_2^c(z_0)} < \frac{1}{E(S_2^{z_0})} = \frac{F_2^c(z_0)}{\int_{z_0}^{\infty} F_2^c(x_2) dx_2}. \quad (8)$$

Если $E(S_2^z)$ — среднее оставшееся время обслуживания — является монотонно убывающей функцией переменной z , то равенство (5) можно интерпретировать следующим образом.

Если $\frac{c_2}{E(S_2^z)} < \frac{c_1}{t_1}$, то поступившее требование прерывает обслуживание, в противном случае этого не происходит. Если выполняется условие (8),

то такая модель минимизирует общую стоимость пребывания требования в системе. Таким образом, если длительность обслуживания обрабатываемого требования имеет такое распределение, что среднее оставшееся время обслуживания является монотонно убывающей функцией переменной z , то можно минимизировать стоимость пребывания, выбрав указанную выше целевую функцию. В приведенных ниже примерах определяется оптимальное значение z_0 для некоторых типов распределений длительности обслуживания обрабатываемых требований.

При распределении Эрланга k -го порядка если

$$\frac{1}{k} < \frac{c_2 t_1}{c_1 t_2} < 1, \quad (9)$$

то, используя правило знаков (правило Декарта),

можно показать, что у уравнения $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ суще-

ствует корень z_0 , $0 \leq z_0 < \infty$ и $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} > 0$, так что

функция $T(z)$ достигает минимума в точке z_0 . В случае $z_0 = \infty$ общая стоимость пребывания вагонов на грузовом фронте равна соответствующей стоимости для абсолютного приоритета с дообслуживанием. При постоянной длительности

обслуживания $z_0 = t_2 - \frac{c_2}{c_1} t_1$.

На рис. 2 показан график нормированной функции стоимости времени простоя двух подач

вагонов под грузовыми операциями $\frac{T(z)}{T(\infty)}$ (отно-

шению функции стоимости к ее дисперсии) при различных значениях k , созданный на последнем этапе разработки математической модели выбора приоритетов обслуживания вагонов краном в написанной программе «Выбор приоритета

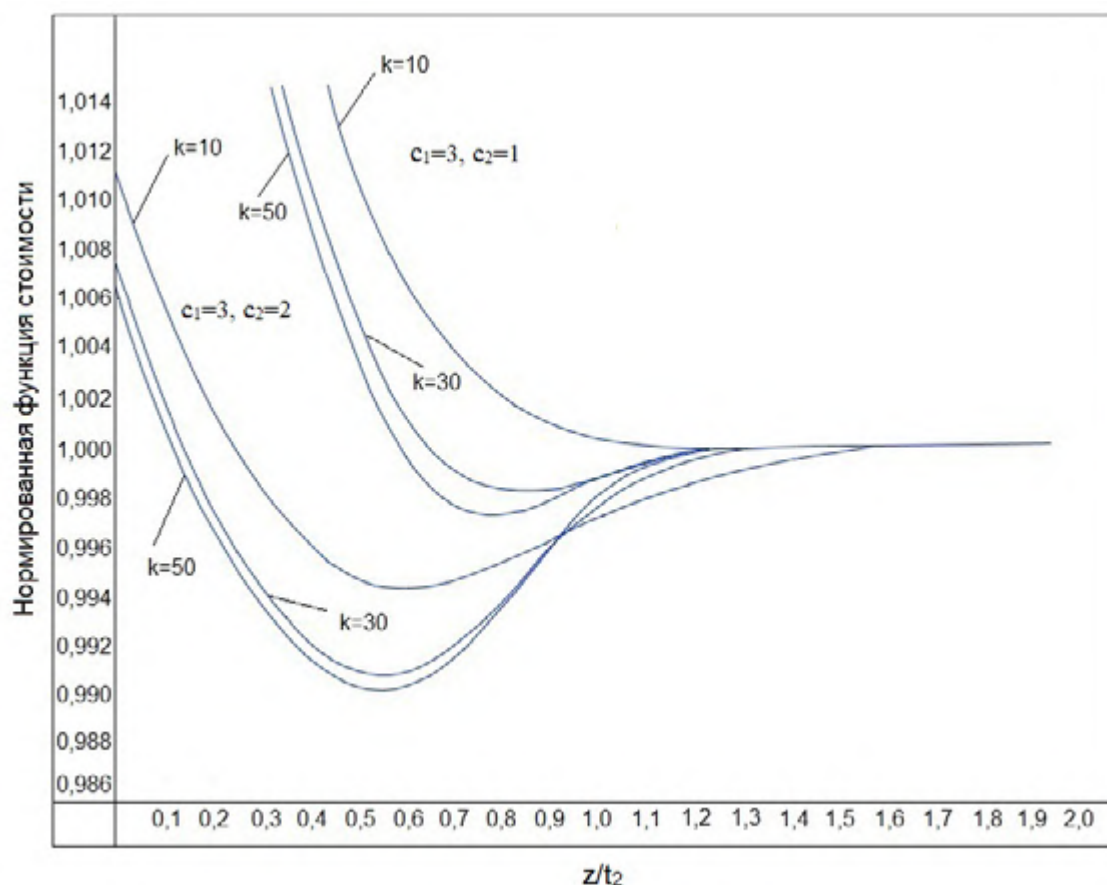


Рис. 2. Зависимость средней стоимости времени простоя двух подач вагонов под грузовыми операциями от момента переключения крана между подачами

обслуживания вагонов» как модуль в АСУ контейнерного терминала на языке программирования Visual Basic.

При экспоненциальном распределении времени выполнения грузовой операции если $c_1 t_2 > c_2 t_1$, то функция $T(z)$ имеет минимум в точке $z = \infty$, т. е. в этом случае оптимальной дисциплиной является абсолютный приоритет с дообслуживанием. Аналогично, если $c_1 t_2 < c_2 t_1$, то целевая функция минимум в точке $z = \infty$, т. е. в этом случае оптимальной дисциплиной является относительный приоритет. Если $c_1 t_2 = c_2 t_1$, то стоимость является постоянной величиной, не зависящей от z , и, таким образом, в этом случае нет смысла вводить смешанную приоритетную дисциплину. Эти выводы проиллюстрированы на рис. 3.

При равномерном распределении, плотность которого имеет вид:

$$S_2(x_2) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{при } a \leq x_2 \leq b, \\ 0 & \text{иначе} \end{cases}, \quad (10)$$

в противном случае оптимальная величина z_0 определяется равенствами:

$$z_0 = \frac{b+a}{2} - \frac{c_2}{c_1} t_1, \quad \text{если } b-a < \frac{2c_2}{c_1} t_1 \quad (11)$$

и

$$z_0 = b - \frac{2c_2}{c_1} t_1, \quad \text{если } b-a > \frac{2c_2}{c_1} t_1. \quad (12)$$

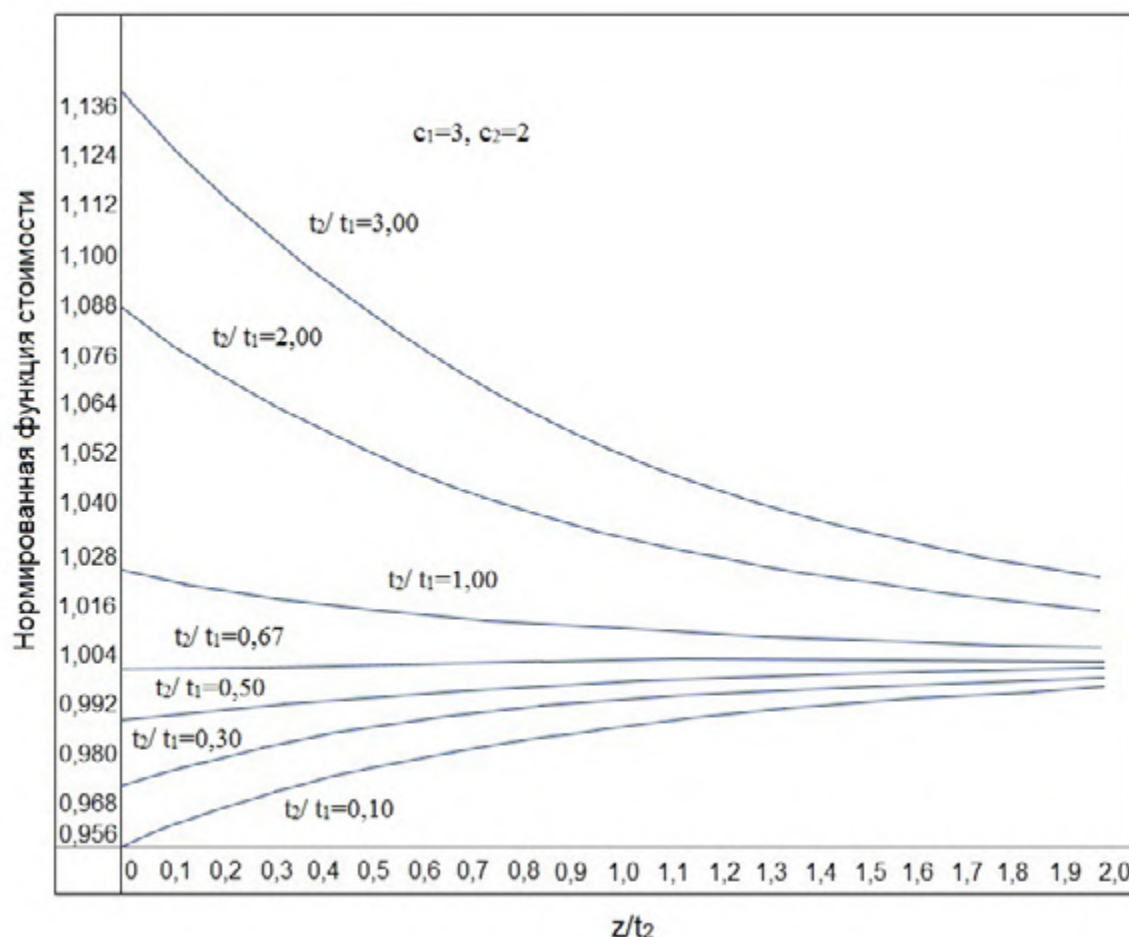


Рис. 3. Зависимость средней стоимости времени простоя двух подач вагонов под грузовыми операциями от момента переключения крана между подачами

Библиографический список

1. Бадецкий А. П. Оптимизация распределения контейнеропотоков на направлении Китай — европейский союз / А. П. Бадецкий, А. Н. Деревянко // *Russian Journal of Logistics & Transport Management*. — 2020. — Т. 5. — № 1. — С. 69–86.
2. Малышев Н. В. К вопросу роботизации тыловых контейнерных терминалов / Н. В. Малышев, Е. К. Коровяковский // *Бюллетень результатов научных исследований*. — 2020. — № 1. — С. 15–25. — DOI: 10.20295/2223-9987-2020-1-15-25.
3. Паламарчук Г. И. Имитационное моделирование мультимодальной цепи поставок / Г. И. Паламарчук, В. Н. Кузьменкова, Н. В. Малышев // *Специальная техника и технологии транспорта*. — 2019. — № 3(41). — С. 112–117.
4. Арефьев И. Б. Анализ и моделирование транспортных узлов / И. Б. Арефьев, Е. К. Коровяковский. — СПб.: ЮПИ, 2018. — 228 с.
5. Кирпичников А. П. Прикладная теория массового обслуживания / А. П. Кирпичников. — Казань: Казанский гос. ун-т, 2008. — 116 с.
6. Паламарчук Г. И. Порядок занятия инфраструктуры железнодорожного транспорта подвижным составом / Г. И. Паламарчук, В. Н. Кузьменкова, Н. В. Малышев // *Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности, на транспорте и в логистике: сборник трудов XXII Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 19–21 апреля 2022 года* / Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I. — Санкт-Петербург: Медиапапир, 2022. — С. 194–198.

7. Коровяковский Е. К. Разработка модели-тренажера морского порта / Е. К. Коровяковский, Н. С. Белых, Е. А. Андреева и др. // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке: сборник трудов XI Санкт-Петербургского конгресса, Санкт-Петербург, 23–24 ноября 2017 года. — Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2017. — С. 138.

8. Кобозева Н. Г. Анализ показателей эффективности использования железнодорожного подвижного состава / Н. Г. Кобозева // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2020. — Т. 17. — № 1. — С. 77–83. — DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-77-83.

9. Бадецкий А. П. Перспективные технологии адаптивного управления грузопотоками / А. П. Бадецкий // Логистика: современные тенденции развития: материалы XIX Международной научно-практической конференции,

Санкт-Петербург, 2–3 апреля 2020 года. — Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2020. — С. 39–44.

10. Конограй О. А. Перспективы конверсии международных транспортно-логистических потоков и потенциал Арктической транспортной инфраструктуры в транзите «Китай — Европа» / О. А. Конограй, А. А. Воронов // Экономика устойчивого развития. — 2022. — № 2(50). — С. 190–193. — DOI: 10.37124/20799136_2022_2_50_190.

Дата поступления: 10.08.2022

Решение о публикации: 10.11.2022

Контактная информация:

МАЛЫШЕВ Николай Валерьевич — ассистент; kol.pgups@mail.ru

БОЙКОВ Сергей Анатольевич — начальник железнодорожной станции Шушары; dcs2_boykovsa@orw.ru

Priority Model of Car Delivery Service

N. V. Malyshev¹, S. A. Boikov²

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

²Oktyabrskaya railroad — JSC “Russian Railways” Subsidiary, 1, Podyezdnoy lane, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

For citation: Malyshev N. V., Boikov S. A. Priority Model of Car Delivery Service // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 839–846. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-839-846

Summary

Purpose: for the definition of optimal switch point of crane operation between platforms, to perform task simulation of priority choice in car delivery service, the task should feature penalty consideration for excessive idle delivery at freight front. **Methods:** Methods of probability theory, queuing and mathematical statistics as well as expert assessments are used to find distribution. **Results:** Priority model for car delivery service has been worked out. The dependences of average cost of idle time of two car delivery under freight operations — from the moment of switch between deliveries at distribution of Erlang of k^{th} order of freight operation implementation time and the distribution special case — exponential one at mixed priority of car delivery service — are determined. **Practical significance:** Rational distribution of crane operation is proposed allowing to reduce terminal's costs for penalties for excessive idle delivery at freight front.

Keywords: Automation, non-public railways, terminal, container-transport system, accelerated cargo delivery.

References

1. Badetskiy A. P., Derevyanko A. N. Optimizatsiya raspredeleniya konteyneropotokov na napravlenii Kitay — evropeyskiy soyuz [Optimization of the distribution of container flows in the direction of China — the European Union]. *Russian Journal of Logistics & Transport Management* [Russian Journal of Logistics & Transport Management]. 2020, vol. 5, I. 1, pp. 69–86. (In Russian)
2. Malyshev N. V., Korovyakovskiy E. K. K voprosu robotizatsii tylovykh konteynernykh terminalov [On the issue of robotization of rear container terminals]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Research Results]. 2020, I. 1, pp. 15–25. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-1-15-25. (In Russian)
3. Palamarchuk G. I., Kuz'menkova V. N., Malyshev N. V. Imitatsionnoe modelirovanie mul'timodal'noy tsepi postavok [Simulation modeling of a multimodal supply chain]. *Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta* [Special vehicles and transport technologies]. 2019, I. 3(41), pp. 112–117. (In Russian)
4. Aref'ev I. B., Korovyakovskiy E. K. *Analiz i modelirovanie transportnykh uzlov* [Analysis and modeling of transport hubs]. St. Petersburg: YuPI Publ., 2018, 228 p. (In Russian)
5. Kirpichnikov A. P. *Prikladnaya teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Applied Queuing Theory]. Kazan': Kazanskiy gos. un-t Publ., 2008, 116 p. (In Russian)
6. Palamarchuk G. I., Kuz'menkova V. N., Malyshev N. V. *Poryadok zanyatiya infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta podvizhnym sostavom* [Procedure for Occupation of the Railway Transport Infrastructure by Rolling Stock]. St. Petersburg: Mediapapir Publ., 2022, pp. 194–198. (In Russian)
7. Korovyakovskiy E. K., Belykh N. S., Andreeva E. A. *Razrabotka modeli-trenazhera morskogo porta* [Development of a seaport simulator model]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2017, p. 138. (In Russian)
8. Kobozeva N. G. Analiz pokazateley effektivnosti ispol'zovaniya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Analysis of efficiency indicators for the use of railway rolling stock]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the St. Petersburg University of Communications]. 2020, vol. 17, I. 1, pp. 77–83. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-77-83. (In Russian)
9. Badetskiy A. P. *Perspektivnye tekhnologii adaptivnogo upravleniya gruzopotokami* [Promising technologies for adaptive traffic management]. St. Petersburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova Publ., 2020, pp. 39–44. (In Russian)
10. Konogray O. A., Voronov A. A. Perspektivy konversii mezhdunarodnykh transportno-logisticheskikh potokov i potentsial Arkticheskoy transportnoy infrastruktury v tranzite “Kitay — Evropa” [Prospects for the Conversion of International Transport and Logistics Flows and the Potential of the Arctic Transport Infrastructure in China-Europe Transit]. *Ekonomika ustoychivogo razvitiya* [Economics of sustainable development]. 2022, I. 2(50), pp. 190–193. DOI: 10.37124/20799136_2022_2_50_190. (In Russian)

Received: August 10, 2022

Accepted: November 10, 2022

Author's information:

Nicolay V. MALYSHEV — Assistant; kol.pgups@mail.ru
Sergey A. BOIKOV — Head of the Shushary railway station; dcs2_boykovsa@orw

УДК 624.075.235

Работоспособность опор контактной сети на высокоскоростных железнодорожных магистралях

В. В. Веселов

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

Для цитирования: *Веселов В. В.* Работоспособность опор контактной сети на высокоскоростных железнодорожных магистралях // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 847–855. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-847-855

Аннотация

Цель: Выполнить анализ работоспособности отдельно стоящих железобетонных опор контактной сети в условиях высокоскоростных железнодорожных магистралей, разработать мероприятия и конструктивные решения опор повышенной надежности и долговечности. **Методы:** Анализ типовых конструктивных решений по ГОСТ 19330—99 с учетом опыта их эксплуатации, применение численных методов расчета с привлечением расчетных программ. **Результаты:** Проанализированы недостатки применяемых конструкций опор контактной сети на железных дорогах с применением стали и железобетона. Выполнены расчеты несущей способности и жесткости типовых железобетонных опор по ГОСТ 19330—99 с применением вычислительного комплекса SCAD на действие актуальных климатических и эксплуатационных нагрузок, в том числе от ветрового давления при движении высокоскоростных составов со скоростью движения 300 км/ч. Разработана конструкция инновационной опоры, включающей стойку из железобетона, фибробетона или стали, на железобетонном фундаменте, объединенную методом безвыверочного монтажа для обеспечения герметичности соединяемых частей конструкций. **Практическая значимость:** Выявлены резервы работоспособности типовых отдельно стоящих железобетонных опор контактной сети в условиях высокоскоростной железнодорожной магистрали Санкт-Петербург — Москва по проектным материалам. Установлена возможность восприятия опорами давления от ветрового потока при движении поездов со скоростью 300 км/ч. Предложены применение инновационной комбинированной сталебетонной конструкции опоры контактной сети и способы ее монтажа. Использование нового способа монтажа и конструкции опоры позволит снизить трудоемкость ее монтажа, а также повысить надежность и долговечность опоры в изменяющихся условиях эксплуатации.

Ключевые слова: Опора контактной сети, железобетонная конструкция, сталебетон, монтаж, надежность, долговечность.

Введение

Неотъемлемой частью инфраструктуры железных дорог являются опоры контактной сети, которые могут быть выполнены в железобетонных

или металлических конструкциях. Железобетонные опоры чаще всего применяются в качестве промежуточных, переходных и анкерных консольных опор, а также в качестве фиксирующих,

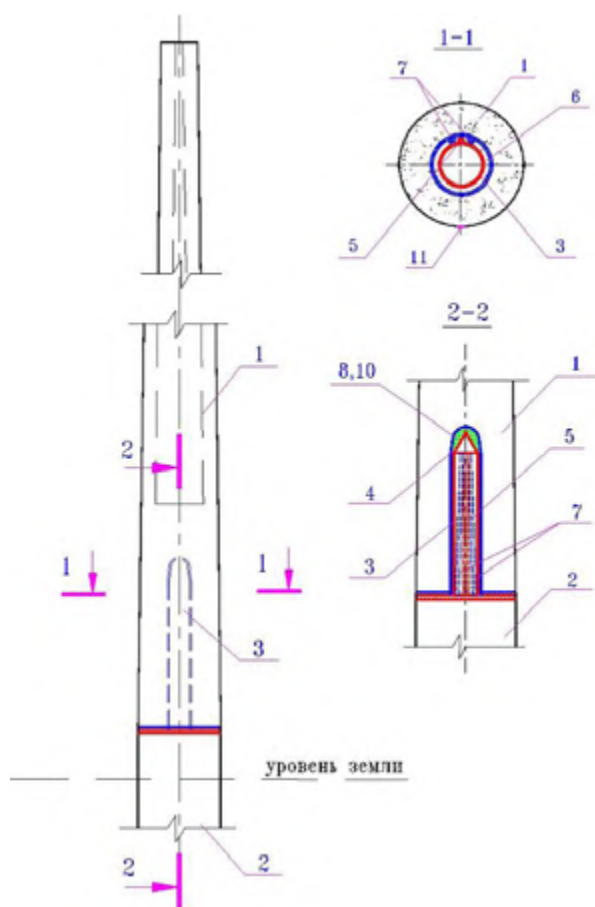


Рис. 1. Общий вид опоры:
 1 — стойка; 2 — фундамент;
 3 — фиксатор; 4 — конусообразный оголовок; 5 — направляющий линейный выступ; 6 — полость;
 7 — парные наклонные направляющие;
 8 — монтажный контейнер;
 9 — герметичная оболочка;
 10 — затвердевающий клеевой состав;
 11 — риски

фидерных, специальных опор и стоек жестких поперечин [1]. Такие опоры, как правило, представляют собой сборные полые цилиндрические стойки, замоноличиваемые в стаканы столбчатых фундаментов. Металлические опоры используют в основном для гибких поперечин, двухпутных консолей и анкерных самонесущих (без оттяжек) опор, а иногда в качестве консольных промежуточных, переходных, анкерных, фиксирующих, фидерных и других назначений. Такие опоры,

как правило, состоят из стоек сквозного сечения, прикрепляемых анкерными болтами или сваркой к закладным деталям фундаментов. Основными проблемами опор контактной сети при монтаже и эксплуатации являются: трудоемкость установки и коррозионный износ опорных частей, как металлических, так и железобетонных опор [2, 3]. Для решения данных проблем разрабатываются новые конструкции опор [4]. Общим недостатком предлагаемых технических решений является, как правило, повышенная трудоемкость монтажа стойки, а также пониженная долговечность узла соединения стойки с фундаментом, что обусловлено недостаточностью конструктивной защиты элементов узла от атмосферных воздействий в условиях эксплуатации на открытом воздухе. Дополнительные проблемы объективного характера заключаются в изменении климата, что фиксируется нормами по нагрузкам и воздействиям в СП 20.13330.2016, а также в увеличении эксплуатационных нагрузок, вызванных изменением скоростного режима движения поездов [5]. Данные обстоятельства требуют исследования несущей способности существующих опор контактной сети и разработки новых, более рациональных конструктивных решений, обладающих достаточной работоспособностью в изменяющихся условиях эксплуатации.

Практическое применение и результаты

На кафедре «Строительные конструкции, здания и сооружения» разработана новая конструкция опоры, включающая стойку из железобетона, фибробетона или стали, на железобетонном фундаменте, в верхней части которого расположен фиксатор из железобетона, фибробетона или стали, снабженный конусообразным оголовком и имеющий направляющий линейный выступ, ориентированный вдоль оси стойки, которая в нижней части имеет полость с парными наклонными направляющими, расходящимися вниз (рис. 1).

В верхней части полости закреплен монтажный контейнер, включающий герметичную оболочку, например, из тонкого металлического листа, листа пластмассы, полимерной пленки, заполненную затвердевающим клеевым составом. При этом высота фиксатора с конусообразным оголовком превышает расстояние между низом стойки и низом герметичной оболочки монтажного контейнера. На наружных поверхностях стойки и фундамента в зоне их примыкания нанесены риски, совмещаемые при монтаже. Такое решение опоры, запатентованное при участии автора [6], позволит снизить трудоемкости монтажа опоры, а также повысить ее долговечность [7].

В качестве дальнейшего развития опор контактной сети в части совершенствования конструкции их поперечных сечений с целью повышения несущей способности, надежности и долговечности могут быть использованы комбинированные конструкции опор — сталебетонные, состоящие из стальной оболочки переменного сечения с перфорациями, заполненной бетоном. Данное конструктивное решение также запатентовано при участии автора [8] и позволяет использовать достоинства стальных и железобетонных конструкций при компенсировании их недостатков.

Для эффективного восприятия ветрового воздействия опорами (минимизации давления ветра), особенно в условиях высокоскоростных магистралей [9], важное значение имеет форма поперечного сечения стоек. С точки зрения аэродинамики форма стоек должна стремиться к круглому очертанию, что характерно для железобетонных опор.

Был выполнен анализ работоспособности (несущей способности и жесткости) железобетонных опор контактной сети на проектируемом высокоскоростном участке Октябрьской железной дороги Санкт-Петербург — Москва. Опоры контактной сети на этом участке дороги запро-

ектированы в основном в соответствии с ГОСТ 19330—99 «Стойки железобетонные для опор контактной сети железных дорог. Технические условия».

Исследуемые опоры состоят из столбчатых фундаментов и стоек, установлены с переменным шагом до 65 м (рис. 2). Конструкция стоек — железобетонные, предварительно напряженные, конические, кольцевого сечения, изготовлены из тяжелого бетона методом центрифугирования, марки установленных опор в основном ССА 100.6-3 по ГОСТ 19330—99.

Стойки выполнены из бетона марки по водонепроницаемости не ниже W8, по морозостойкости не ниже F150, класса по прочности В40 и армированы стержневой арматурой класса А-V. Стойки марки ССА 100.6-3 имеют параметры: длину — $L = 10$ м, диаметр по низу — $D_n = 435$ мм, по верху — $D_v = 290$ мм, толщину стенки — $t = 60$ мм, масса стоек — $m = 1,44$ т, несущая способность стоек по нормативному изгибающему моменту в соответствии с ГОСТ 19330—99 составляет $[M_n] = 8$ тсм (по нижнему сечению стойки). На стойках имеются кронштейны с подвешенными проводами и кабелями (рис. 2).

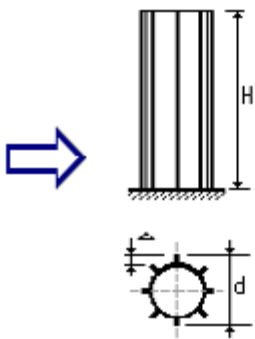
Нагрузками на стойку опоры являются:

- постоянные вертикальные нагрузки от массы стоек и навешенного оборудования (металлические кронштейны с проводами и тросами);
- гололедные нагрузки на проводах и тросах;
- ветровые климатические воздействия;
- ветровые воздействия от движения составов.

Климатический район данного участка железной дороги относится к III гололедному с возможной толщиной стенки гололеда 10 мм и ко II ветровому району с нормативным давлением $w_0 = 0,3$ кПа в соответствии с СП 20.13330.2016.

Ветровые воздействия от движения составов должны рассматриваться в плоскости движения поездов. Скорость поездов на данном участке железной дороги предполагается 300 км/ч =

ТАБЛИЦА 1. Определение ветрового воздействия на стойку опоры

Исходные данные	
Нормативное значение ветрового давления	0,299 Т/м ²
Тип местности	А — открытые побережья морей, озер и водохранилищ, пустыни, степи, лесостепи, тундра
Тип сооружения	Вытянутые сооружения и элементы с цилиндрической поверхностью
Конструкция сооружения (элемента)	
Параметры и результат расчета	
Поверхность элемента	Шлифованный бетон
Высота элемента, H	10 м
Диаметр элемента, d	0,36 м
Неровности поверхности, Δ	2,е-004 м
Величина нагрузки на элемент, q	0,046 тс/м

= 83,33 м/с. Воздействия от потока воздуха передаются на опоры и кронштейны и принимаются равномерно-распределенными. Давление при известной скорости воздуха в соответствии с СП 20.13330.2016 на вертикальную поверхность составит:

$$w_0 = 0,43 \cdot V^2 = 0,43 \cdot 83,33^2 = 2986 \text{ Па} = 0,299 \text{ тс/м}^2.$$

Величина ветрового воздействия на стойку цилиндрического сечения может быть определена расчетными программы, например в программе «ВЕСТ» проектно-вычислительного комплекса SCAD Office, результаты расчета представлены в табл. 1.

Статический расчет стойки по определению усилий и деформаций был выполнен в вычислительном комплексе ВК SCAD с учетом нормативных нагрузок в комбинациях и представлен на рис. 3–7.

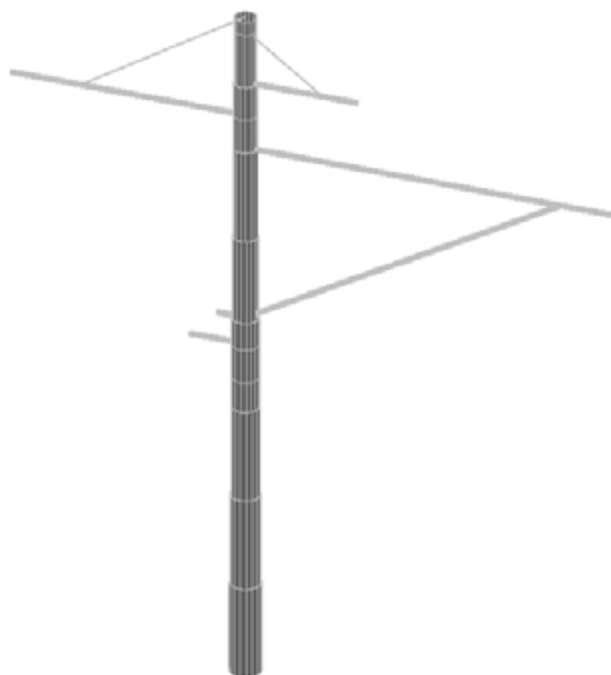


Рис. 3. Геометрическая схема стойки опоры контактной сети CCA-100.6 в ВК SCAD

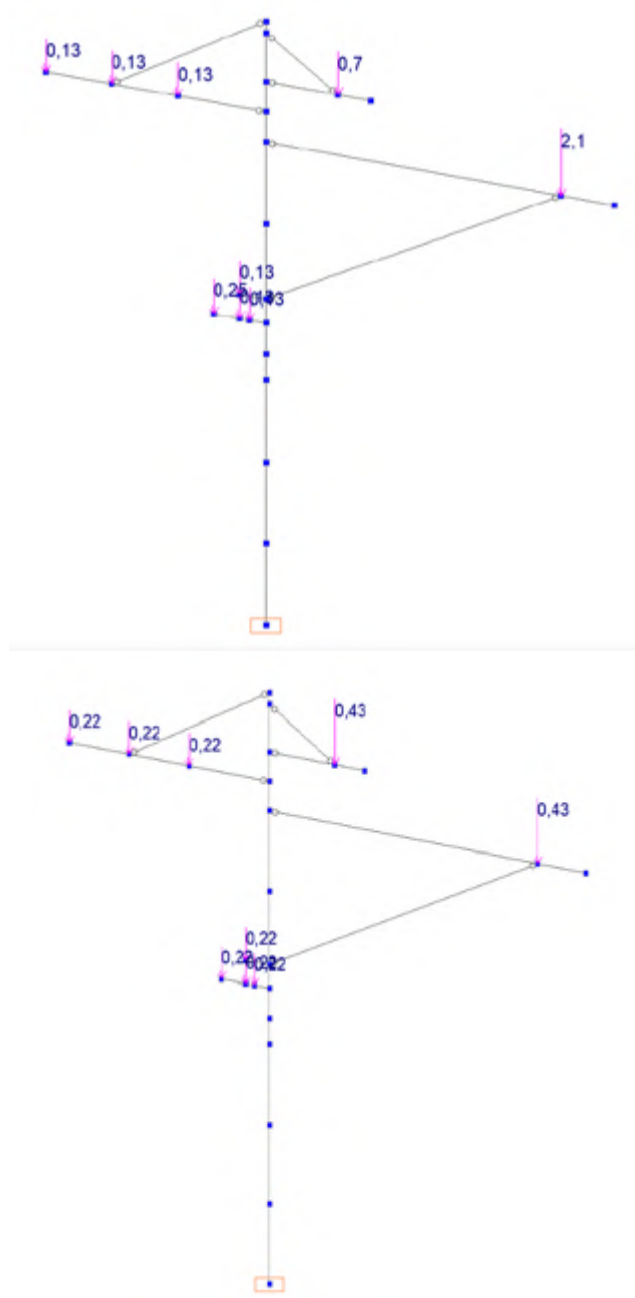


Рис. 4. Расчетные схемы стойки с нагрузкой от оборудования и гололедной нагрузкой, кН

Нагрузки в расчете приняты нормативными — с учетом того, что в ГОСТ 19330—99 задается нормативное значение предельного изгибающего момента, который, как правило, лимитирует несущую способность опоры [10].

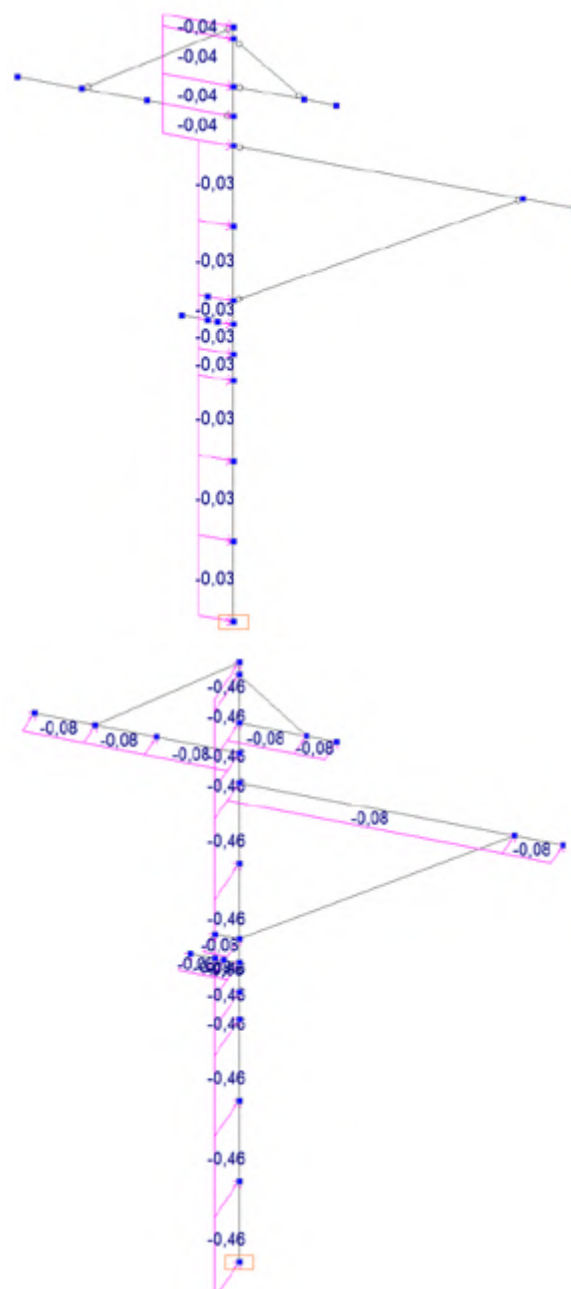


Рис. 5. Расчетные схемы стойки с ветровой климатической нагрузкой и от потока воздуха при движении состава, кН/м

По результатам расчетов стоек на проектные параметры установлено, что прочность и изгибная жесткость опор (рис. 6, 7) при действии комбинации постоянных и временных нагрузок обеспечивается с существенным запасом (46 % — по прочности и 10 % — по жесткости).

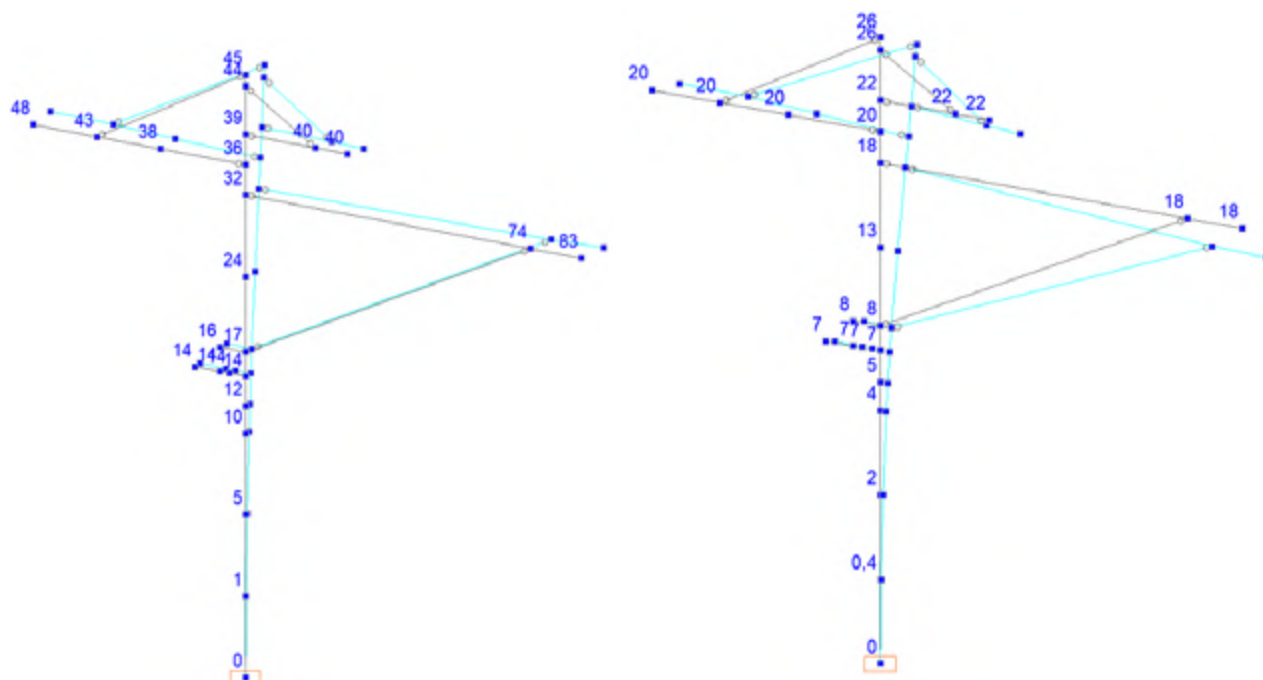


Рис. 6. Схемы деформаций стойки вдоль и поперек пути, мм (max — 45 мм < 50 мм)

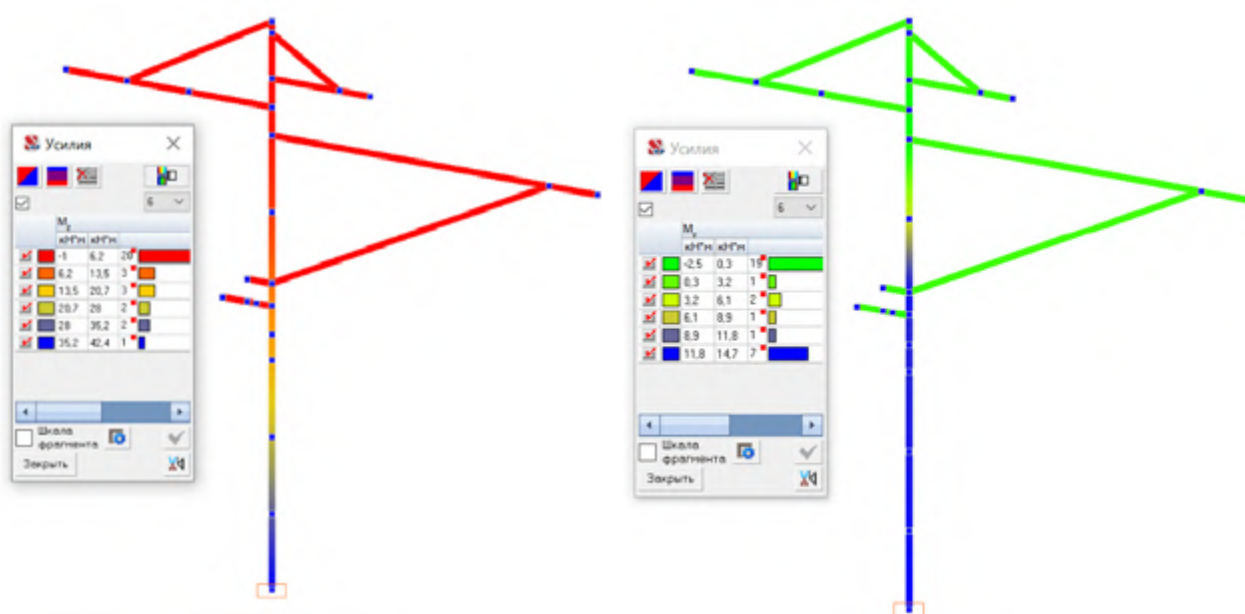


Рис. 7. Эпюры максимальных изгибающих моментов в стойке вдоль и поперек пути, кНм (max — 42,4 кНм < 80 кНм)

Заключение

Существующие опоры контактной сети на железных дорогах имеют ряд недостатков: трудоемкость установки и коррозионный износ опорных частей, как металлических, так и железобетонных опор. Стойки железобетонных опор, выполненные из цилиндрического поперечного сечения по ГОСТ 19330—99, применяются наиболее часто и обладают достаточной проектной работоспособностью при увеличивающихся климатических, эксплуатационных нагрузках и воздействиях, в том числе в условиях увеличения скорости движения поездов на высокоскоростных магистралях до 300 км/ч. Предложено применение инновационной опоры, выполненной из железобетона, фибробетона или стали, с менее затратным способом монтажа стойки. Новая конструкция опоры позволит снизить трудоемкость монтажа опоры, минимизировать повреждения стойки от коррозионного износа, а также повысить ее надежность и долговечность.

Библиографический список

1. Чекулаев В. Е. Устройство и техническое обслуживание контактной сети / В. Е. Чекулаев и др.; под ред. А. А. Федотова. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на ж. д. транспорте», 2014. — 436 с.
2. Подольский В. И. Эксплуатационные воздействия на опоры контактной сети электрифицированных железных дорог и повышение их надежности: дисс. ... д-ра техн. наук / В. И. Подольский. — М.: ВНИИЖТ, 1996. — 303 с.
3. Кудрявцев А. А. Разрушение фундаментов транспортных сооружений при электрокоррозии / А. А. Кудрявцев, В. Г. Каратаев, С. Е. Гуков и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010. — Вып. 4(25). — С. 178–186.
4. А. с. 763544 Российская Федерация Е04В1/36. Опора с железобетонными приставками / В. П. Нехотин, А. А. Кудрявцев, В. П. Попов и др.; заявитель и патенто-

обладатель Ленинградский ордена Ленина институт инженеров железнодорожного транспорта им. Акад. В. Н. Образцова. — № 2613132/29-33; заявл. 04.05.78; опубл. 15.09.80.

5. Киселев И. П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта в 2 томах / И. П. Киселев, Л. С. Блажко, М. Я. Брынь и др. — М., 2020. — Т. 1. — 2-е изд., перераб. и доп.

6. Пат. 168411 Российская Федерация, МПК Е04Н 12/22. Опора: / Е. Н. Алексахин, В. В. Веселов, В. В. Егоров; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ПГУПС Императора Александра I. — № 2016134587; заявл. 23.08.16; опубл. 02.02.17, Бюл. № 4.

7. Веселов В. В. Повышение эксплуатационной надежности опор контактной сети / В. В. Веселов, М. С. Абу-Хасан // БСТ: Бюллетень строительной техники. — 2019. — № 9(1021). — С. 54–56.

8. Пат. 185035 Российская Федерация, МПК Е04С 3/293 (2006.01). Сталебетонный элемент / В. В. Веселов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ПГУПС Императора Александра I. — № 2018129556; заявл. 13.08.2018; опубл. 19.11.2018, Бюл. № 32.

9. Дьяченко Л. К. Особенности аэродинамического воздействия высокоскоростных поездов на объекты инфраструктуры / Л. К. Дьяченко, Д. Е. Воробьев, А. А. Барановский // Новые технологии в мостостроении: сборник трудов Международной научно-технической конференции. — 2018. — С. 66–75.

10. Ли В. Н. Опрокидывающий момент опоры контактной сети / В. Н. Ли, А. С. Сапов, Л. С. Демина // Мир транспорта. — 2012. — Т. 10. — № 2(40). — С. 4–11.

Дата поступления: 05.11.2022

Решение о публикации: 30.11.2022

Контактная информация:

ВЕСЕЛОВ Виталий Владиславович — канд. техн. наук, доц.; veselov.1977@inbox.ru

Working Efficiency of Catenary Supports on High-Speed Railways

V. V. Veselov

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

For citation: Veselov V. V. Working Efficiency of Catenary Supports on High-Speed Railways // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 847–855. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-847-855

Summary

Purpose: To perform working efficiency analysis of catenary separately standing reinforced-concrete supports in high-speed railway conditions, to develop measures and constructive solutions of the supports of increased reliability and durability. **Methods:** Analysis of typical constructive solutions according to Russia State Standard GOST 19330—99 given their exploitation experience, the use of numerical calculation methods involving calculation programs. **Results:** The disadvantages of being applied structures of catenary supports on railways with the use of steel and reinforced concrete are analyzed. The calculations of typical reinforced-concrete support bearing capacity and rigidity according to GOST 19330—99 with the use of SCAD computing complex for the effect of vital climatic and exploitation burdens, including ones from wind pressure at high-speed rolling stock motion trains at the speed of 300 km/h, are made. Innovative support construction has been developed which includes pillar of reinforced concrete, fiber-reinforced concrete or steel on reinforced-concrete foundation, the construction is combined with alignment-free mounting method to ensure the impermeability of construction being united parts. **Practical significance:** The reserves for working efficiency of typical separately-standing reinforced-concrete catenary supports in the conditions of high-speed railway trunk St. Petersburg — Moscow on project documentation basis are revealed. The possibility of pressure perception by supports from wind flow at train motion of 300 km/h speed has been established. The application of innovative combined steel-concrete structure of catenary support construction and its mounting ways are proposed. The use of support mounting and construction new way would allow to reduce support mounting laboriousness as well as to rise support reliability and durability in exploitation changing conditions.

Keywords: Catenary supports, reinforced concrete structure, steel concrete, mounting, reliability, durability.

References

1. Chekulaev V. E. *Ustroystvo i tekhnicheskoe obsluzhivanie kontaktной seti* [Device and maintenance of the contact network]. Moscow: FGBOU “Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zh. d. transporte” Publ., 2014, 436 p. (In Russian)
2. Podol'skiy V. I. *Ekspluatatsionnye vozdeystviya na opory kontaktной seti elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog i povyshenie ikh nadezhnosti: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Operational impacts on the supports of the contact network of electrified railways and improving their reliability: diss. ... Dr. tech. Sciences]. Moscow: VNIIZhT Publ., 1996, 303 p. (In Russian)
3. Kudryavtsev A. A., Karataev V. G., Gukov S. E. Razrushenie fundamentov transportnykh sooruzheniy pri elektrokorrrozii [Destruction of the foundations of transport structures during electrocorrosion]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the St. Petersburg University of Communications]. Saint Petersburg: Peterburgskiy gos. un-t putey soobshcheniya, 2010, vol. 4(25), pp. 178–186. (In Russian)
4. Nekhotin V. P., Kudryavtsev A. A., Popov V. P. 763544 E04V1/36. *Opora s zhelezobetonnyimi pristavkami* [Support with reinforced concrete attachments]. Avtorskoe svidetel'stvo RF, no. 2613132/29-33. (In Russian)

5. Kiselev I. P., Blazhko L. S., Bryn' M. Ya. *Vysokoskorostnoy zhelezнодорожный transport. Obshchiy kurs: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov zhelezнодорожного транспорта v 2 tomakh* [High speed rail transport. General course: textbook for students of railway transport universities in 2 volumes]. Moscow, 2020, vol. 1. (In Russian)

6. Aleksashkin E. N., Veselov V. V., Egorov V. V. *Opora* [Support]. Patent RF, no. 2016134587, 2017. (In Russian)

7. Veselov V. V., Veselov V. V., Abu-Khasan M. S. *Povyshenie ekspluatatsionnoy nadezhnosti opor kontaktnoy seti* [Improving the operational reliability of contact network supports]. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki* [BST: Building Machinery Bulletin]. 2019, I. 9(1021), pp. 54–56. (In Russian)

8. Veselov V. V. *Stal'betonnyy element* [Steel concrete element]. Patent RF, no. 2018129556, 2018. (In Russian)

9. D'yachenko L. K., Vorob'ev D. E., Baranovskiy A. A. *Osobennosti aerodinamicheskogo vozdeystviya vysoko-*

skorostnykh poezdov na ob'ekty infrastruktury [Features of the aerodynamic impact of high-speed trains on infrastructure facilities]. *Novye tekhnologii v mostostroenii: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [New Technologies in Bridge Engineering: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. 2018, pp. 66–75. (In Russian)

10. Li V. N., Sapov A. S., Demina L. S. *Oprokidyvayushchiy moment opory kontaktnoy seti* [Overturning moment of contact network support]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2012, vol. 10, I. 2(40), pp. 4–11. (In Russian)

Received: November 05, 2022

Accepted: November 30, 2022

Author's information:

Vitaliy V. VESELOV — PhD in Engineering, Associate Professor; veselov.1977@inbox.ru

УДК 656.7.025

Архитектура системы сбора данных с датчиков контроля поведения пассажира авиационного транспортно-логистического узла

Г. И. Паламарчук¹, О. В. Бородина², Н. В. Иванова³

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

²Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, Российская Федерация, 190078, Санкт-Петербург, 12 линия Васильевского острова, 13

³Санкт-петербургский государственный университет гражданской авиации, Российская Федерация, 196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38

Для цитирования: Паламарчук Г. И., Бородина О. В., Иванова Н. В. Архитектура системы сбора данных с датчиков контроля поведения пассажира авиационного транспортно-логистического узла // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 856–866. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-856-866

Аннотация

Цель: Рассматриваются вопросы повышения эффективности наземного обслуживания пассажиров в авиационно-транспортных логистических узлах. Процессы наземного обслуживания прогнозируемы с точки зрения теории транспортных систем и нормируются применением инструментов теории расписания. Действия или бездействие в процессах обслуживания пассажира как участника процесса вносит в транспортную систему элемент случайности. Управление инициативой пассажира не влияет на прогнозируемость времени окончания операции наземного обслуживания. В статье предложены описание процессов производственной деятельности логистического узла, а также роль поведения пассажира в наземном обслуживании. Представлены направления исследования когнитивной модели поведения пассажира в рамках структурно-поточной схемы аэровокзала. В работе предлагается система предиктивной аналитики в виде телематики, собирающей данные о фактическом поведении пассажиров в функциональных зонах аэропорта. В качестве предложения по повышению эффективности работы узла предлагается внедрять модели поведения пассажиров для прогнозирования времени завершения процессов наземного обслуживания пассажиров и за счет алгоритмов оценки данных, что является продолжением работы. **Методы:** Общая теория систем, теория когнитивных транспортных систем. **Результаты:** Разработана архитектура системы сбора данных с датчиков контроля поведения пассажира в аэровокзале по процессу наземного обслуживания в авиационно-транспортном логистическом узле; приведена структурно-логическая схема сценария возникновения негативного с точки зрения регулярности события. **Практическая значимость:** Оптимизация процессов наземного обслуживания пассажиров авиационного транспортного логистического узла.

Ключевые слова: Авиационно-транспортный логистический узел, система, авиапассажир, когнитивная модель, процесс наземного обслуживания пассажира, структурно-поточные схемы регистрации, выход на посадку, архитектура системы сбора данных по процессам обслуживания пассажира.

Аэропорт — комплекс зданий и сооружений, оперативное управление которыми сопряжено с передачей информации участникам операций. Рыночные условия деятельности предприятий воздушного транспорта не способствуют равномерному распределению добавленной стоимости между участниками.

Аэропортовое обслуживание потоков пассажиров — стандартный набор сервисов (регистрация на рейс, оформление и доставка багажа на борт, организация посадки в самолет, выгрузка багажа из самолета, его транспортировка и выдача, оформление перевозочной документации), регламентированных федеральным законодательством по наземному обслуживанию. Оператор аэропорта является юридическим лицом, заинтересованным в оптимизации набора процессов наземного обслуживания пассажиров [1, 2].

Существует два подхода к сокращению производственных затрат. Первый предполагает модернизацию производственного оборудования, что требует значительных финансовых ресурсов, обширной подготовки и несет за собой определенные риски окупаемости. Второй подход предполагает повышение эффективности уже используемых на предприятии ресурсов и мощностей или, другими словами, оптимизацию производственных процессов [3].

Оптимизации технологических процессов авиационных транспортно-логистических узлов (АТЛУ) посвятили свои работы многие авторы: Б. В. Артамонов, Л. Г. Большедворская, А. А. Брагин, А. В. Губенко, Б. П. Елисеев, Е. Н. Зайцев, Б. В. Зубков, Г. А. Крыжановский, Е. В. Конинова, Е. А. Куклев, В. В. Купин, В. П. Маслаков, Е. Е. Нечаев, Ю. И. Палагин, П. Ю. Либерман, И. Г. Шайдуров, А. Р. Яшкин и др. С технологической точки зрения оптимизационные задачи решены достаточно глубоко.

Меняющаяся роль автоматизации в задачах технологического обеспечения работы аэропор-

тов вносит постоянные изменения во взаимодействие предприятий транспорта между собой, в то время как участие пассажира комплементарно. Однако фактическое поведение пассажира влияет на время завершения некоторых операций наземного обслуживания. Ассоциация предприятий воздушного транспорта ИАТА акцентирует внимание на инициативе пассажира [4]. Но результаты прогноза в процессном управлении возможны только на основе достоверных данных (predictability data) о времени завершения операций и невозможны без предсказательной аналитики.

Как правило, системы управления трафиком пассажиров собирают данные с мобильных устройств [5]. Такой способ управления временем завершения операций наземного обслуживания лишает систему частно-потокowego управления субсидиарностью. Тогда как частные свойства субсидиарного потока дают основание управлять им [6].

Производственная деятельность авиационного транспортно-логистического узла

Сервисы АТЛУ специализируются по объектам обслуживания — пассажир, багаж, груз, воздушное судно, экипаж. Процессы коммерческого обслуживания в аэропортах происходят одновременно в воздухе (air side) и на земле (ground side) (рис. 1). В тот момент, когда борт воздушного судна переместился на стоянку и ему установили колодки под шасси, начинается наземное обслуживание.

Процессы наземного обслуживания пассажира имеют исключительную важность для коммерческой деятельности АТЛУ — от времени оборота борта воздушного судна (от 35 минут до 1,5 часов) зависит операционный доход всех участников перевозки. Временные рамки большинства процессов наземного обслуживания борта воздушного судна синхронизируются с вре-

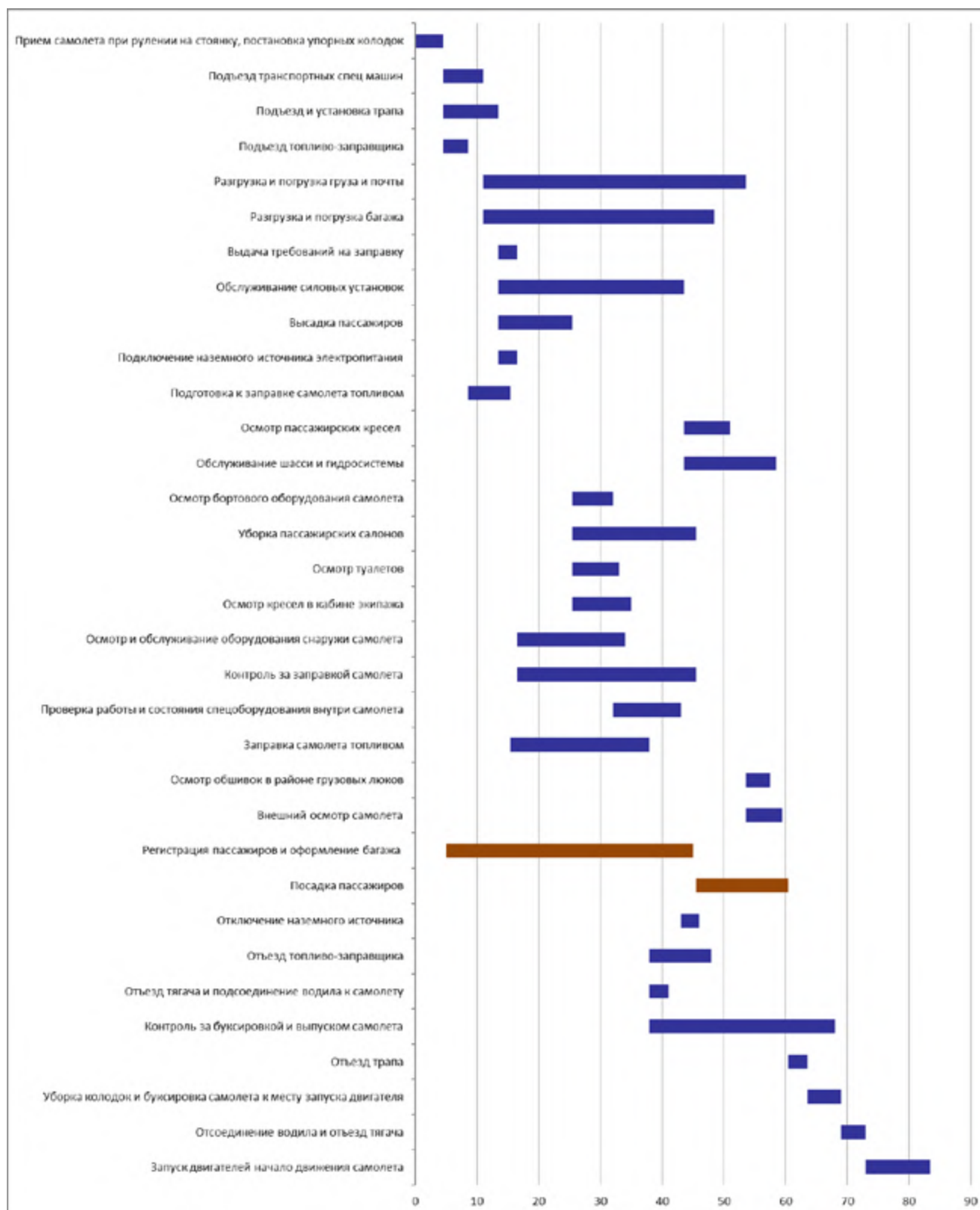


Рис. 1. Процессы наземного обслуживания авиационного транспортно-логистического узла

менем начала и окончания обслуживания пассажиров (операции выделены цветом на рис. 1).

Направления исследования когнитивной модели поведения пассажира

Специфика исследования поведения пассажира в контуре транспортной системы имеет два направления. По времени воздействия на процессы транспорта его можно разделить на исследование модели отложенного (отдаленного) воздействия (задача авиационного маркетинга). Второе направление — моделирование динамики перемещения пассажира в пространстве аэровокзала (текущая задача).

Для решения первой подзадачи — исследования особенностей потребительского поведения — некоторые авторы [7] предлагают создавать модели поведения пассажиров, применяя данные из социальных сетей. Такой подход весьма актуален при переходе к новой концепции продаж в авиационном маркетинге — NDC (New Distribution Concept), согласно которому продажи и предложения услуг воздушного транспорта персонализированы под каждого пассажира [4]. Однако данный подход имеет ограничения. Масштаб данных, на которых строится модель поведения, огромен, и объектом исследования является, по сути, психология личности. Тогда как для целей наземного обслуживания пассажиров важным является не психотип личности пассажира, а его рефлексия (реакция) на текущие задачи по

процессам АТЛУ. Например, пассажир должен отреагировать на оповещение об окончании регистрации и предпринять верные с точки зрения процесса наземного обслуживания действия.

Структурно-поточная схема организации обслуживания пассажира

Технологическая схема организации потоков пассажиров в аэровокзале, на привокзальной площади и пассажирском перроне должна обеспечивать требования безопасности и выполнять задачи операторов аэропорта. Задачами оператора аэропорта являются быстрое и качественное обслуживание пассажиров, а также эффективное использование сооружений и технических средств [8] как ресурсов оператора аэропорта.

Пространство аэровокзала относится к ресурсам АТЛУ. Эффективность управления ресурсами аэровокзального комплекса заключается в повышении проходимости (чел/м²) и сокращении площадей аэровокзала (м²) за счет планирования операционных зон и проходов между ними.

Оператор аэропорта при планировании рабочего пространства предусматривает зоны вылета и прилета для пассажиров и сопровождающих лиц, зоны регистрации на рейс самого пассажира и оформления его багажа (эти зоны могут не совпадать), зоны досмотра и зоны ожидания перед вылетом.

Руководство по проектированию аэропортов рекомендует [8] планировать магистральные про-

ТАБЛИЦА 1. Требования к магистральным проходам аэровокзала

Аэровокзал пропускной способностью, пасс/ч	Минимальная ширина, м	
	магистральных проходов	зоны образования очереди пассажиров на регистрацию
50	2,0	5,0
100	2,0	6,0
160	3,0	6,0
200	3,0	6,0
300	3,0	9,0
400	3,0	9,0

ТАБЛИЦА 2. Структурно-логическая схема принятия решения пассажиром по этапам процесса наземного обслуживания

Процесс наземного обслуживания	Позитивный результат завершения процесса	Негативный результат завершения процесса
Начало регистрации	Пассажир прошел на стойку регистрации своего рейса	Пассажир прошел на стойку регистрации чужого рейса
		Пассажир не прошел на стойку регистрации (например, заблудился)
Проверка условий договора воздушной перевозки пассажира	Пассажир предъявил действующий документ и договор воздушной перевозки, его ручная кладь соответствует нормам	Пассажир предъявил недействительный документ
		Условия договора воздушной перевозки изменились
		Ручная кладь превышает нормы провоза
Проверка условий договора воздушной перевозки багажа пассажира	Условия договора воздушной перевозки багажа пассажиром не нарушены	Багаж пассажира превышает нормы провоза
		Багаж пассажира не соответствует требованиям безопасности
Посадка на борт воздушного судна	Пассажир прошел к выходу на посадку своего рейса	Пассажир прошел к выходу на посадку чужого рейса
		Пассажир не прошел к выходу на посадку (например, заблудился)
		Пассажир потерял посадочный талон и (или) бирку на ручную кладь
Выход в аэровокзал по завершении воздушной перевозки	Пассажир вышел в аэровокзал, получил багаж и вышел из аэровокзала	Пассажир не вышел в аэровокзал
		Пассажир не получил свой багаж
		Пассажир получил чужой багаж и вышел с ним из аэропорта

ходы так, чтобы они могли соединять входы и выхода из здания, лестницы с основными зонами в пассажирском зале. Магистральные проходы должны быть свободны от очередей пассажиров, мебели и иметь ширину не менее значений, приведенных в табл. 1.

Выполнение поставленных задач решается для каждого АТЛУ индивидуально и решает задачи:

- разработки наиболее прямых маршрутов передвижения пассажиров в аэровокзале — минимум пересечений при подходе к очередным пунктам обслуживания;

- безопасности передвижения пассажиров и персонала — исключение пересечения путей движения основных потоков пассажиров, ручной клади со средствами транспорта и механизации;

- сокращение времени прохода пассажиров с ручной кладью из зоны контроля при изменении статуса рейса [8].

Эффективность информационной поддержки пассажиров достигается путем использования соответствующих надписей, знаков, информационных подсказок.

Структурно-логическая схема принятия решений пассажиром

Принцип моделирования иерархий существует более 90 лет, разработан Саати [9]. Модель связи состояний системы, влияющих на регулярность полетов по причине наземного обслуживания, иерархическая.

Структурно-логическая схема конечного в иерархии события в наземном обслуживании пассажиров аэропорта строится на регламентированных технологиями процессах обслуживания пассажиров и обработки багажа в аэропортах [10]. Каждый технологический цикл включает отдельные технологические операции. Перечень операций в цикле может изменяться в зависимости от принятого аэропортом метода обслуживания перевозчика (авиакомпания). Функция пассажира в стандартных процессах регламентироваться не может априори, если он не нарушает норм авиационной безопасности.

Пассажиру для реализации условий договора авиационной перевозки необходимо не только купить авиационную перевозку (заключить договор), но и подтвердить свое намерение осуществить перелет, пройдя к стойке регистрации перед вылетом, предъявить документ (если это необходимо) и багаж для оформления, а также самостоятельно пройти в зону посадки на борт ВС своего рейса. Действия сотрудника компании регламентированы — своевременно передавать информацию остальным участникам, занятым в процессе обслуживания пассажира (как правило, посредством внесения информации в систему автоматизированной обработки информации аэропорта), а также удостовериться в личности пассажира и соответствии его ручной клади и багажа правилам безопасной перевозки (табл. 2).

В табл. 2 приведено описание верхнего уровня иерархии событий наземного обслуживания пассажира АТЛУ и отражена роль самого пассажира.

Негативный с точки зрения регулярности результат завершения процесса предлагается нивелировать системой наблюдения за поведенческими модальностями пассажира и системой

алгоритмов предсказательной аналитики по принятию пассажиром решений.

Когнитивная система сбора и оценки данных поведения пассажиров строится по аналогии с естественным интеллектом, на оценке эмоциональных аффектов, зрительных реакциях и речевой функциональной активности.

Механизм эмоциональных реакций на базе эмоциональных аффектов

На элементарный когнитивный механизм «критическая оценка ситуации» возникает некоторая эмоциональная реакция, например страх, которая тесно связана с физиологическим возбуждением и вызывает врожденное поведение. На основе этого триплета (анализ — реакция — поведение) с возрастом у человека возникает гамма стратегий поведения [11]. Группой отечественных разработчиков (рук. М. Таланов) использована трехмерная модель, связывающая человеческие эмоции и вычислительные процессы на основе нейромодуляторов: дофамина, серотонина, норадреналина [12]. Данный механизм на сегодня труднореализуем ввиду высокой нагрузки на вычислительные мощности. Например, симуляция использует до 10 нод вычислительного кластера Казанского федерального университета и производит вычисления одной секунды симуляции в течение недели [13].

Оценка зрительных реакций

Самым изученным методом оценки психоэмоционального состояния является исследование движения зрачков [14].

Оценка речевой функциональной активности имеет самый проработанный научный [15] и аппаратный комплекс и реализована в том числе в свободно распространяемых средах, например IBM Watson, Cogno и др.

Архитектура системы сбора данных по процессу наземного обслуживания пассажира авиационного транспортно-логистического узла (АТЛУ)

Задача сбора данных для построения структуры когнитивной системы управления является перспективным исследованием. Все существующие на данный момент методы сбора данных о пассажирах делятся на три категории: сбор данных с помощью технических средств, сбор данных с помощью цензоров и волонтеров и интерпретация оплаты проезда [16].

Для когнитивных транспортных систем устройствами служат бортовые видеокамеры, лидары, датчики состояния, радары, GPS, ГЛОНАСС, навигационные устройства; для подсистемы когнитивных транспортных коммуникаций (в зависимости от вида транспорта) — системы комплексного мониторинга, данные с детекторов, данные с систем фиксации RFID-меток и др.; для подсистемы когнитивного управления — данные систем транспортно-логистического мониторинга, социально-экономические показатели, транспортный баланс, показатели и индикаторы транспортных сетей по видам транспорта и другие [17]. Выбор технических средств телематики для сбора данных модели когнитивного поведения авиапассажира зависит от существующей системы информационного обмена в АТЛУ.

Модель архитектуры системы сбора данных по процессу наземного обслуживания пассажиров с датчиков контроля поведения трехуровневая: сенсорный (IoT Layer); посредник (Mediator Layer); прикладной (Application Layer).

На первом (нижнем) уровне находятся устройства Интернета вещей трех типов — датчики движения глаз, микрофон и камеры для отнесения данных к определенному пассажиру. Пакет данных может быть реализован как вектор, содержащий: данные датчиков, отнесенных к определенному пассажиру; время получения (с

часов IoT-устройства) и место получения. К этой модели данных могут быть добавлены дополнительные метаданные в соответствии с потребностями системы второго и высшего (третьего) прикладного уровней (например, схемы пассажиропотоков внутри аэровокзала для привязки данных о фактических перемещениях пассажира).

Второй уровень (Mediator Layer) поддерживает группы функций, которые предназначены для обеспечения доступа к данным с устройств Интернета вещей. Функции устройств второго уровня:

- создание коммуникационной среды (создавать сеть и права доступа);
- аутентификация (авторизация) и отнесение пакета данных к одному объекту (пассажиру) для обработки алгоритмами предсказательной аналитики и классификации на поведенческие модальности;
- модули периодического сбора и хранения, которые обеспечат доступ к данным прикладного программного обеспечения без необходимости прямого обмена сообщениями между устройствами IoT.

Третий (верхний) уровень (Application Layer) содержит приложения, которые преобразуют данные в удобную для оператора аэропорта информацию (Human Machine Interface).

Модель позволит создавать информационные табло с прогнозами по длине очереди на регистрацию; информационные мобильные приложения для общего использования; приложения, которые способны проводить углубленный анализ и визуализацию данных для целей управления, например, выдавать сообщения о тревоге (в случае высокой загрузки стоек регистрации и отмены рейсов).

Выводы

Пространство аэровокзала относится к ресурсам АТЛУ. Актуальность прогноза времени использования операционных зон аэровокзала

под операции наземного обслуживания позволяет оператору аэропорта быть эффективным в управлении ресурсами площадей аэровокзала.

Для повышения актуальности прогноза занятия пассажирами площадей аэровокзала выстраивается система сбора и обработки данных.

Когнитивность системы сбора и оценки данных поведения пассажира строится на оценке эмоциональных аффектов, зрительных реакциях и речевой функциональной активности.

Предлагаемая модель архитектуры способна прогнозировать поведение отдельного пассажира и выдавать прогноз времени окончания операций наземного обслуживания.

Такой способ управления временем завершения операций наземного обслуживания наделяет систему частными свойствами субсидиарного потока и дает основание управлять неопределенным поведением пассажира.

Библиографический список

1. Малышев Н. В. Роль оператора аэропорта в создании и распределении добавленной стоимости аэропортового обслуживания потоков пассажиров / Н. В. Малышев, О. В. Бородина, Г. И. Паламарчук // *Russian journal of logistics & transport management*. — 2021. — № 6(1). С. 44–46.
2. Паламарчук Г. И. Аспекты повышения конкурентоспособности логистических услуг транспортных предприятий / Г. И. Паламарчук, В. Н. Кузьменкова // *Russian journal of logistics & transport management*. — 2020. — № 5(1). — С. 19–27.
3. Иванова Н. В. Управление производственным потенциалом предприятия с целью повышения эффективности деятельности / Н. В. Иванова // *Управление и планирование в экономике*. — 2018. — № 3(19). С. 66–68.
4. IATA. Passenger Experience & Facilitation. — URL: <https://www.iata.org/en/programs/passenger/>.
5. SITA. SITA Passenger Processing. — URL: <https://www.sita.aero/solutions/sita-at-airports/sita-passenger-processing/>.
6. Козлов А. В. Субсидиарные транспортные потоки / А. В. Козлов // *Наука и технологии железных дорог*. — 2022. — № 22(2). — С. 17–22.
7. Матушкин И. В. Применение когнитивного анализа данных из социальных сетей в авиационном маркетинге / И. В. Матушкин, О. В. Бородина // *Сборник статей и тезисов докладов XLIV Международной молодежной научной конференции. Гагаринские чтения*. — Москва — Барнаул — Ахтубинск. — С. 377–378.
8. Руководство по проектированию аэропортов местных воздушных линий / Государственный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Аэропроект». — М., 1985. — 82 с.
9. Шаталова Н. В. Иерархический метод выбора рационального варианта реконструкции автомобильных дорог вблизи населенных пунктов / Н. В. Шаталова // *Науковедение*. — 2014. — № 21(2). — С. 48.
10. Приказ Минтранса РФ от 28 июня 2007 г. № 82 «Об утверждении Федеральных авиационных правил “Общие правила воздушных перевозок пассажиров, багажа, грузов и требования к обслуживанию пассажиров, грузоотправителей, грузополучателей”». — URL: <https://base.garant.ru/191872/>.
11. Кугуракова В. В. Антропоморфный социальный агент с симуляцией эмоций и его реализация / В. В. Кугуракова, М. О. Таланов, Н. Р. Манахов и др. // *Russian Digital Libraries Journal*. — 2015. — № 18(5). — С. 254–268.
12. Сафандеева Ю. С. Низкоуровневая реализация модели норадреналиновой системы нейронной импульсной сети / Ю. С. Сафандеева // *Электронные библиотеки*. — 2016. — № 3(19). — С. 251–268.
13. Таланов М. О. Мемристорные эмоциональные вычисления / М. О. Таланов // *Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта*. — Казань, 2017. — С. 10.
14. Волков А. К. Применение системы регистрации движения глаз для оценки окуломоторных параметров зрительного поиска опасных предметов операторами досмотра / А. К. Волков // *Материалы Международной научно-практической конференции: Транспорт России:*

проблемы и перспективы. — СПб.: ИПТ РАН, 2017. — С. 359–363.

15. Крыжановский А. Г. К задаче оценки мотивационных и волевых тенденций операторов / Г. А. Крыжановский, В. В. Купин // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. — 2012. — № 1. — С. 54–62.

16. Аникеев Е. А. Архитектура системы управления транспортом регионального центра / Е. А. Аникеев // Моделирование систем и процессов. — 2014. — № 3. — С. 4–11.

17. Селиверстов С. А. Разработка структурной схемы когнитивной транспортной системы / Я. А. Селиверстов, А. Г. Котенко, О. Ю. Лукомская и др. // Морские интел-

лектуальные технологии. — 2021. — № 4–1(54). — С. 166–174.

Дата поступления: 02.08.2022

Решение о публикации: 16.11.2022

Контактная информация:

ПАЛАМАРЧУК Геннадий Иванович — канд. техн. наук; palamarchuk.67@mail.ru

БОРОДИНА Ольга Владимировна — научный сотрудник; borodinaov@gmail.com

ИВАНОВА Наталья Васильевна — канд. техн. наук; nvivanova@spbguga.ru

Architecture of the System for Data Collection from Transducers for Behavior Monitoring of the Passenger of Airborne Transport-Logistic Junction

G. I. Palamarchuk¹, O. V. Borodina², N. V. Ivanova³

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

²Solomenko Institute of Transport Problems of Russian Academy of Sciences, Russian Federation, 190078, St. Petersburg, 12-th Line VO, 13

³St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Russian Federation, 196210, St. Petersburg, st. Pilotov, 38

For citation: Palamarchuk G. I., Borodina O. V., Ivanova N. V. Architecture of the System for Data Collection from Transducers for Behavior Monitoring of the Passenger of Airborne Transport-Logistic Junction // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 856–866. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-856-866

Summary

Purpose: The issues of increasing the efficiency of passengers' ground service in airborne-transport logistic junctions are considered. Ground service processes are predictable from the point of transport system theory and are normalized using time-schedule theory tools. Actions or inaction in the service processes of a passenger as a process participant introduce an accidental element into transport system. Managing passenger's initiative does not affect the predictability of the end time of ground service operations. The article proposes the description of the processes of logistic junction production activity as well as the role of passenger's behavior in ground service. Directions for the study of passenger behavior cognitive model in the frames of air-terminal structural-flowing scheme are proposed. The paper proposes predictive analytics system in the form of telematics which collects data on passenger factual behavior in airport functional areas. As a proposal to improve junction operation efficiency it is proposed to introduce passenger behavior models for the prediction of time ending of passenger ground service processes and for - at the expense of data evaluation algorithms - constituting operation process continuation. **Methods:** System general theory, cognitive transport system theory. **Results:** The architecture of the system for data collection from transducers for passenger

behavior monitoring at air terminal on the process of ground service in airborne-transport logistic junction was developed; structural-logical scheme of negative scenario occurrence, that's negative one from the point of event regularity, is given. **Practical significance:** Passenger ground service process optimization of airborne transport logistic junction.

Keywords: Airborne-transport logistic junction, system, airborne passenger, cognitive model, passenger ground service process, check-in structural-flowing schemes, boarding gate, architecture of data collection system on passenger service processes.

Reference

1. Malyshev N. V., Borodina O. V., Palamarchuk G. I. Rol' operatora aeroporta v sozdanii i raspredelenii dobavlennoy stoimosti aeroportovogo obsluzhivaniya potokov passazhirov [The role of the airport operator in the creation and distribution of the added value of airport services for passenger flows]. *Russian journal of logistics & transport management* [Russian journal of logistics & transport management]. 2021, I. 6(1), pp. 44–46. (In Russian)
2. Palamarchuk G. I., Kuzmenkova V. N. Aspekty povysheniya konkurentosposobnosti logisticheskikh uslug transportnykh predpriyatiy [Aspects of increasing the competitiveness of logistics services of transport enterprises]. *Russian journal of logistics & transport management* [Russian journal of logistics & transport management]. 2020, I. 5(1), pp. 19–27. (In Russian)
3. Ivanova N. V. Upravlenie proizvodstvennym potentsialom predpriyatiya s tsel'yu povysheniya effektivnosti deyatel'nosti [Management of the production potential of the enterprise in order to improve the efficiency of activities]. *Upravlenie i planirovanie v ekonomike* [Management and planning in the economy]. 2018, I. 3(19), pp. 66–68. (In Russian)
4. IATA. Passenger Experience & Facilitation. Available at: <https://www.iata.org/en/programs/passenger/>.
5. SITA. SITA Passenger Processing. Available at: <https://www.sita.aero/solutions/sita-at-airports/sita-passenger-processing/>.
6. Kozlov A. V. Subsidiarnye transportnye potoki [Subsidiary transport flows]. *Nauka i tekhnologii zheleznikh dorog* [Science and technologies of railways]. 2022, I. 22(2), pp. 17–22. (In Russian)
7. Matushkin I. V., Borodina O. V. *Primenenie kognitivnogo analiza dannykh iz sotsial'nykh setey v aviatsionnom marketinge* [Application of cognitive analysis of data from social networks in aviation marketing]. Moscow — Barnaul — Akhtubinsk, pp. 377–378. (In Russian)
8. *Rukovodstvo po proektirovaniyu aeroportov mestnykh vozdushnykh liniy. Gosudarstvennyy proektno-izyskatel'skiy i nauchno-issledovatel'skiy institut Aeroproekt* [Guidelines for the design of airports of local airlines. State Design and Survey and Research Institute “Aeroproekt”]. Moscow, 1985, 82 p. (In Russian)
9. Shatalova N. V. Ierarkhicheskiy metod vybora ratsional'nogo varianta rekonstruktsii avtomobil'nykh dorog vblizi naselennykh punktov [Hierarchical method of choosing a rational variant of the reconstruction of roads near settlements]. *Naukovedenie* [Science of Science]. 2014, I. 21(2), p. 48. (In Russian)
10. *Prikaz Mintransa RF ot 28 iyunya 2007 g. № 82 “Ob utverzhdenii Federal'nykh aviatsionnykh pravil “Obshchie pravila vozdushnykh perevozok passazhirov, bagazha, gruzov i trebovaniya k obsluzhivaniyu passazhirov, gruzootpraviteley, gruzopoluchateley”* [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated June 28, 2007 № 82 “On Approval of the Federal Aviation Regulations “General Rules for the Air Transportation of Passengers, Baggage, Cargo and Requirements for Servicing Passengers, Consignors, Consignees”]. Available at: <https://base.garant.ru/191872/>. (In Russian)
11. Kugurakova V. V., Talanov M. O., Manakhov N. R. Antropomorfnyy sotsial'nyy agent s simulyatsiey emotsiy i ego realizatsiya [Anthropomorphic social agent with

simulation of emotions and its implementation]. *Russian Digital Libraries Journal* [Russian Digital Libraries Journal]. 2015, I. 18(5), pp. 254–268. (In Russian)

12. Safandeeva Yu. S. Nizkourovnevaya realizatsiya modeli noradrenalinovoy sistemy neyronnoy impul'snoy seti [Low-level implementation of the model of the norepinephrine system of the neural pulse network]. *Elektronnye biblioteki* [Electronic libraries]. 2016, I. 3(19), pp. 251–268. (In Russian)

13. Talanov M. O. Memristornye emotsional'nye vychisleniya [Memristor emotional calculations]. *Bespilotnye transportnye sredstva s eelementami iskusstvennogo intellekta* [Unmanned vehicles with artificial intelligence elements]. Kazan, 2017. p. 10. (In Russian)

14. Volkov A. K. *Primenenie sistemy registratsii dvizheniya glaz dlya otsenki okulomotornykh parametrov zritel'nogo poiska opasnykh predmetov operatorami dosmotra* [Application of the eye movement registration system for the assessment of oculomotor parameters of the visual search for dangerous objects by inspection operators]. St. Petersburg: IPT RAS, 2017, pp. 359–363. (In Russian)

15. Kryzhanovsky A. G., Kupin V. V. K zadache otsenki motivatsionnykh i volevykh tendentsiy operatorov [To the problem of assessing the motivational and volitional tendencies of operators]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo*

gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii [Bulletin of the St. Petersburg State University of Civil Aviation]. 2012, I. 1, pp. 54–62. (In Russian)

16. Anikeev E. A. Arkhitektura sistemy upravleniya transportom regional'nogo tsentra [Architecture of the transport management system of the regional center]. *Modelirovanie sistem i protsessov* [Modeling of systems and processes]. 2014, I. 3, pp. 4–11. (In Russian)

17. Seliverstov S. A., Seliverstov Ya. A., Kotenko A. G. Razrabotka strukturnoy skhemy kognitivnoy transportnoy sistemy [Development of the structural scheme of the cognitive transport system]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii* [Marine Intelligent Technologies]. 2021, I. 4–1(54), pp. 166–174. (In Russian)

Received: August 02, 2022

Accepted: November 16, 2022

Author's information:

Gennady I. PALAMARCHUK — PhD in Engineering, Associate Professor; palamarchuk.67@mail.ru

Olga V. BORODINA — Scientific Researcher; borodinaov@gmail.com

Natalya V. IVANOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; nvivanova@spbguga.ru

УДК 351

Государственное управление в области обеспечения благоприятной информационной среды в общественном транспорте

А. К. Полянина

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Российская Федерация, 603087, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23;
Самарский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 603087, Нижний Новгород, Комсомольская пл., 3

Для цитирования: Полянина А. К. Государственное управление в области обеспечения благоприятной информационной среды в общественном транспорте // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 867–875 DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-867-875

Аннотация

Цель: Рассмотреть проблему обеспечения благоприятной информационной среды в общественном транспорте, провести анализ результатов опроса общественного мнения, организованного разными субъектами социального контроля. Проанализировать предлагаемые инициативы в области решения вопросов регламентации правил поведения пассажиров по использованию устройств трансляции аудио- и видеопроодукции в общественном транспорте, в том числе вопросов, связанных с применением средств индивидуализации потребления медиасигналов — наушников. **Методы:** Контент-анализ текстов предлагаемых инициатив по решению проблемы регулирования общественных отношений в этой сфере, размещенных в общедоступных источниках, а также аргументов сторонников и противников таких инициатив. Вторичный анализ результатов опросов общественного мнения. **Результаты:** Впервые сформулирован экологический уровень проблемы медиашумового загрязнения информационной среды общественного транспорта и предложен комплексный подход к ее решению через применение средств, методов и принципов гигиенического нормирования, а также использование всего потенциала неформального социального контроля, включая пропаганду здорового образа медиапотребления, социальную рекламу, направленную на формирования внутренних убеждений и этических принципов поведения в общественном транспорте. **Практическая значимость:** Выработаны принципы обеспечения благоприятной информационной среды как важнейшей задачи государственного управления в области регулирования общественных отношений в общественном транспорте. Показана недостаточность регулирования практик трансляции аудио- и видеосигналов в общественных пространствах, обуславливающая их отрицательное влияние на здоровье и благополучие человека. Предложены пути решения этой проблемы с помощью стандартизации и нормирования функционирования физических величин, поддающихся измерению.

Ключевые слова: Информационная экология, медиашум, информационная гигиена, общественный транспорт, права пассажиров.

К проблеме медиашума в общественном месте

Работа аудио- и видеосигнала в настоящее время приобрела особую проблематику в связи с массовым распространением и небывалой доступностью устройств трансляции сигнала. Например, беспроводные колонки, смартфоны, плееры и т. п. Сегодня общество стоит перед проблемой загрязнения информационного пространства, которая восходит к экологическим проблемам, а именно — к информационной экологии.

Концептуализация информационной экологии имеет давнюю историю и связана с теоретическими и практическими разработками зарубежных и отечественных ученых. Неблагоприятные информационные воздействия изначально рассматривались в аспекте умственного труда как профессиональная гигиена [1]. Новые аспекты проблемы благополучия человека, спровоцированные небывалым технологическим и техническим прогрессом, заключаются в возрастании силы воздействия факторов информационной среды, в частности потока медийной информации. Их осмысление привело отечественных исследователей к выделению в 1998 г. целого раздела гигиенической науки. Предложено понимание информационной гигиены как «раздела медицинской науки, изучающей закономерности влияния информации на психическое, физическое и социальное благополучие человека, его работоспособность, продолжительность жизни, общественное здоровье социума, разрабатывающей нормативы и мероприятия по оздоровлению окружающей информационной среды и оптимизации интеллектуальной деятельности» [2]. Информационная перегрузка есть причина психических и соматических информационно-зависимых заболеваний и требует скорейшего применения мер гигиенического нормирования.

В рамках информационной гигиены стали разрабатываться пределы информационных нагрузок,

а также гигиеническое нормирование сигналов — носителей зрительной и аудиальной информации. В российском санитарном законодательстве определяется дозирование в отношении отдельных показателей, например уровня звука, света, количества считываемых (вводимых) знаков. Средствами профилактики выступает количественное и качественное гигиеническое нормирование производства, распространения, потребления, хранения и воспроизведения информации, а также меры совершенствования организации и оздоровления информационного пространства.

В настоящей работе предприняты концептуализация проблемы шумового загрязнения, опосредованного трансляцией медиасигнала в локациях общественного транспорта, а также анализ результатов эмпирических исследований общественного мнения по данному вопросу и обзор вносимых законодательных инициатив

Методы исследования

Общей целью исследования выступает постановка и концептуализация проблемы обеспечения благоприятной информационной среды в пространстве общественного транспорта. В связи с этим задачами исследования являются: анализ теоретических основ информационного загрязнения общественных пространств; анализ инициатив по регулированию практик потребления медиасигнала в общественных местах; формулирование итоговых выводов.

Среди методов исследования используется вторичный анализ результатов эмпирических исследований, опросов общественного мнения по данной проблематике, организованных автором и субъектами неформального контроля. Также использован метод контент-анализа текстов политико-правовых инициатив по регулированию общественных отношений в области практик потребления медиасигналов в общественном транспорте.

На сегодняшний день гигиеническое нормирование описывает такие физические факторы, как звуковое давление, уровень звука и его допустимый предел (ПДУ), превышение которого способно вызвать значительное беспокойство и существенное изменение показателей состояния систем и анализаторов, чувствительных к шуму. Однако мощность давления акустического сигнала на воспринимающую систему (слуховой анализатор) измеряется в единицах, которые нельзя в полной мере назвать единицей измерения. Децибелы есть соотношение величин, требующее эталонного значения, ориентира, для возможности универсального применения, поскольку острота восприятия звука может отличаться у разных людей. Гигиеническое нормирование опирается на измеримость факторов среды как на принцип регулирования. Поэтому, несмотря на условность эталонного значения восприятия звука, волнового движения в какой-либо среде, требуется единица измерения. Принципы гигиенического нормирования и уровни эпидемиологических рисков определяются в соответствии с дозовым принципом нормирования воздействия. Поэтому выявление допустимых уровней вредных факторов среды, а именно уровня звука, опирается на прогнозирование эффектов воздействия на организм с использованием соотношения «доза — эффект» через количественные характеристики интенсивности и продолжительности воздействия. Однако измерение эффектов воздействия потребления информационного сигнала, создаваемого и транслируемого устройствами массификации информации, нуждается в учете особенностей кодирования информации в головном мозге, выявлении последствий переработки, восприятия, запоминания информации.

В отличие от зрительной информации, восприятие звука совпадает с моментом его реализации, поэтому нельзя при оценке возможностей контроля собственного восприятия использовать

аналогию с возможностью индивидуального снижения интенсивности (или затемнение) визуальной информацией, например при использовании солнцезащитных очков или фокусирования взгляда (управление органами восприятия). В отличие от ряда других физических факторов, шум всегда воспринимается организмом как раздражитель. При этом анализатор поступающей аудиальной информации не приспособлен к адаптации к шуму.

Самостоятельное установление барьера для проникновения аудиальной информации в информационное общественное пространство возможно при помощи средств индивидуализации сигнала, например наушников.

Отечественные исследователи установили разность в чувствительности людей к шуму. В натуральных и камеральных условиях выявлено, что для нечувствительных индивидов действующим уровнем авиационного шума является 95 дБА, нормально чувствительных — 85 дБА, сверхчувствительных — 65 дБА [3]. В 2004 г. было изучено специфическое действие шума на орган слуха при использовании тональной аудиометрии и опроса. При этом учитывались шумы, создаваемые «проигрывающей аппаратурой в квартирах, автомобилях, на улицах, шумы от водопроводно-канализационного оборудования и работы лифтов в зданиях, а также шумы от теле- и радиопередач, противоугонных средств и звуков, издаваемых людьми и животными», исключая транспортные шумы. Такой комплексный учет источников шума позволил авторам разработать новые единицы измерения: «Индекс тишины» (ИТ, %) и «Коэффициент шумовой загруженности» (КШЗ, %) и рассчитать их. Отмечается, что рост коэффициента шумовой загруженности до 50% и более свидетельствует о чрезвычайно высоком уровне звуковой загруженности органа слуха людей. Другое исследование этих же авторов выявило зависимость оценки людьми тестов

вых заданий от шумовой загруженности мест проживания. Проживающие в тихих районах обычную умственную нагрузку оценивали как легкое тестовое задание, а большинство проживающих в очень шумных районах эту стандартную умственную нагрузку оценивали как тяжелое тестовое испытание, т. е. давали этой нагрузке неадекватную оценку.

Наши ранние исследования установили локации наибольшего зашумления медийными сигналами, то есть пространства, где человек более всего подвержен влиянию вынужденного прослушивания аудиопродукции, транслируемой извне, из неподконтрольного ему источника. Первой из таких локаций является общественный транспорт, его в качестве места и ситуации вынужденного медиапотребления назвали 55 % респондентов — учащихся отделений среднего профессионального образования при вузах Нижнего Новгорода. Объем выборки составил 1675 человек в возрасте от 14 до 22 лет. Сроки исследования: апрель — май 2021 года. На втором месте оказалось домашнее пространство (25,3 %) и на третьем — торговые центры и другие общественные пространства (13 %). Также выявлено, что время нахождения в ситуации вынужденного потребления, инициированного извне медиасигнала составляет для пятой части опрошенных более четырех часов ежедневно. Нами впервые был описан и концептуализирован данный тип зашумления, который был назван медиазашумлением. Медиазашумление определяется нами как загрязнение окружающей информационной среды сигналами медиа — медиашумом. Медиашум характеризуется фоновой трансляцией аудиосигналов медийного происхождения, которая неподконтрольна воспринимающему субъекту, в результате чего автоматически активизируются сенсорные и энергетические системы организма и создается угроза информационного стресса [4].

Фоновое медиапотребление в общественном транспорте актуализирует проблему предела пропускной способности когнитивных систем обработки информационного сигнала. Наибольшее негативное влияние медиашум оказывает на детей как социальную группу, не обладающую по объективным причинам властью над источником медиасигнала — транслирующим устройством, например, когда дети являются пассажирами в транспорте.

Особенности слухового анализатора исключают возможность фокусирования органов рецепции, как это допускает зрительный анализатор. Иными словами, можно не смотреть, но не слушать нельзя.

Эта проблема осознается и артикулируется в форме дискуссий и инициатив. Субъекты неформального контроля, общественные организации, некоммерческие ассоциации и партнерства проводят исследования общественного мнения относительно проблем загрязнения информационного пространства, в частности практик потребления (прослушивания и просмотра) в общественном транспорте аудио- и видеопродукции. Так, в ходе организованного Национальной ассоциацией экспертов по деловой этике, этикету и протоколу (НАДЭП) опроса выявлено, что 94 % представителей экономически активного населения Москвы, которые ежедневно пользуются общественным транспортом, крайне негативно относятся к публичному воспроизведению музыки и видео в общественном транспорте, 13 % из них готовы к физическому воздействию в целях решения проблемы [5]. Далее этой организацией было сформулировано и выдвинуто предложение Министерству транспорта РФ о введении изменений в правила перевозки пассажиров в части установления запрета прослушивания музыки и просмотра видео в общественном транспорте без наушников. Эта инициатива обосновывается необходимостью предотвращения конфликтов в

Как вы считаете, нужны ли «вагоны тишины» в поездах «Ласточка» на МЦК?



общественном транспорте и повышением культуры поведения в транспорте, а также опытом регулирования этой сферы за рубежом.

Авторы предложения утверждают, что особенности и строение органов восприятия человека звуковой информации «не могут быть игнорированы только лишь из желания самого человека». Звучание музыки невозможно не слышать, как это возможно в отношении «неприятной картинки или неприятного зрелища», от которого «можно отвернуться или закрыть глаза». Особенно это заметно в транспорте, когда невозможно поменять место дислокации, то есть в условиях замкнутого пространства и вынужденности ситуации проезда.

Другое исследование, организованное в системе электронных опросов «Активный гражданин», учрежденной в рамках реализации проекта правительства Москвы 21 мая 2014 года, выявило значительное преобладание мнения граждан о необходимости создания «вагонов тишины» в поездах «Ласточка» на Московском центральном кольце — маршрутной линии железнодорожного пассажирского транспорта в Москве (рисунок). Опрос был направлен на определение общественного мнения относительно возможности повышения комфортности поездок на МЦК в поездах «Ласточка» подобно

существующим во многих европейских государствах. Предполагается, что в «вагонах тишины» пассажиры будут отключать звук на мобильных устройствах и не разговаривать по телефону, а также избегать прослушивания громкой музыки и при использовании наушников. Обязательное информирование пассажиров и оповещения их о ходе движения поезда будет функционировать по-прежнему [6].

Эти инициативы вызвали отклики, контент-анализ которых позволил сформулировать основные аргументы за и против такого предложения. В качестве поддержки такой инициативы упоминалась необходимость выделения ситуации (места и времени), когда человек будет свободен от постоянного навязанного потребления информационных сигналов различного происхождения и находиться в ситуации тишины и покоя, «наблюдения за внутренним состоянием», обеспечения возможности почитать книгу, «побыть наедине с собой», чего особенно не хватает жителям мегаполисов. Отмечается важное значение инициативы и в связи с постоянным стрессовым давлением и многозадачностью жизни современного жителя большого города, а также необходимостью распространения этой практики на все поезда в целях увеличения «психологического ресурса для восстановления».

Одним из важнейших обоснований введения запрета на прослушивание аудиоинформации в общественном транспорте выдвигалось обеспечение защиты детей от негативной информации, в частности вынужденного потребления музыки с ненормативной лексикой, а также сам по себе факт нарушения тишины как этической нормы. Предлагалось дополнить квалификацию административного правонарушения «Мелкое хулиганство» нормой о нарушении тишины в общественном транспорте, включая громкое прослушивание аудиопроизведений. Это считается сторонниками инициативы эффективной превентивной мерой.

Среди аргументов против подобной инициативы значилась незначительность времени, которое пассажир проводит в поездах «Ласточка» на МЦК, это около 25 минут, а также сопутствующие любому движению поезда шумы и трудоемкость выбора и прохода к «вагону тишины» в условиях интенсивного пассажиропотока [7]. Кроме того, отмечалась сложность обеспечения изоляции таких вагонов от других при условии сквозного прохода между вагонами, а также порядка регламентирования уровня громкости сигнала в наушниках. Остается нерешенным вопрос, кем будет контролироваться соблюдение правил о тишине: специальной полицией или билетными контролерами. Инициатива признается потерявшей актуальность в связи с массовым использованием и доступностью наушников.

Отмечалась и опасность маргинализации таких вагонов, то есть проезд в них преимущественно тех, то не нацелен на пользование транспортными функциями, — «спящих пассажиров». Однако сама целесообразность этого нововведения не оспаривалась, указывалось на обоснованность таких вагонов для пригородных маршрутов, время которых в пути составляет более 2 часов.

Противниками запрета прослушивания аудиосигналов в транспорте утверждалась необоснованность формализации отношений, относящихся

к сфере морально-нравственных установок и воспитания, а также вероятность целенаправленного нарушения этих правил подростками и молодежью как способ свойственного их возрасту протеста социальным нормам. Предлагается решение этой проблемы через социальную рекламу, пропаганду этических норм поведения и уважения других людей в транспорте, а также в других общественных местах как о необходимых правилах общежития, не нуждающихся в формальном государственно-правовом контроле. Указывается малозначимость проблемы медиашума в транспорте как таковая, ее решение, по мнению противников инициативы, не входит в перечень актуальных для общества и государства и, в частности, для правоохранителей. Председателем Общероссийского объединения пассажиров отмечается нецелесообразность введения нормативно-правовых ограничений по прослушиванию аудиопроизведений в общественном транспорте при наличии и действии на сегодняшний день подобной рекомендательной нормы в поездах дальнего следования, а также недейственность таких ограничений в отсутствие конкретных параметров уровня шума, которые бы позволили точно администрировать эту ситуацию [8].

Анализ аргументов сторонников и противников ограничений сводится к следующим основным моментам. Во-первых, проигрывание и прослушивание аудио- и видеопродукции в общественном транспорте без использования средств индивидуализации — наушников признается нарушением этических норм поведения. Во-вторых, необходимость сохранения тишины в транспорте обусловлена стрессовым воздействием и принуждающим характером аудиосигналов на систему когнитивной обработки информации человеком, особенно при условии продолжительного воздействия (продолжительного проезда). В-третьих, обеспечение соблюдения этих норм входит в задачи воспитания и

культуры и требует широких мер неформального контроля. В-четвертых, реагирование на нарушения этических требований соблюдения тишины в общественном транспорте должно основываться на девиантации такого нарушения и соответствующих законодательных нововведениях и требует разработки и определения конкретных предельно допустимых уровней (ПДУ) шума от устройств трансляции медиасигнала в общественном транспорте. В-пятых, обеспечение благоприятной информационной среды в общественном транспорте нуждается в определении субъектного состава контролирующего элемента, то есть системы органов и должностных лиц, уполномоченных контролировать соблюдение данных правил поведения пассажиров.

Массовая доступность средств воспроизведения медиасигнала каждому человеку, вне зависимости от возраста и степени осознанности, вкупе с устоявшимися стереотипами безвредности музыкального фона для жизненных практик и с недостаточностью государственного регулирования в области обеспечения благоприятной информационной среды создает особые риски в отношении здоровья и благополучия населения. Принуждение органов слуха человека к реагированию на аудиосигналы вызывает информационный стресс, поскольку «запускает» эмоциональную активацию нервной системы, усложняет и угнетает актуальную (релевантную) деятельность как внешний раздражитель. Привычность и обыденность фоновой работы устройств трансляции медиасигнала формирует социальный паттерн потребления медиашума и доводит проблему соблюдения тишины в общественных местах до уровня экологической.

Выводы

Таким образом, проблемы обеспечения благоприятной информационной среды в пространстве общественного транспорта обуславливает реше-

ние ряда задач социального контроля по установлению условий действия неформальных или формальных (государственно-правовых) средств воздействия, а также необходимость научных разработок ПДУ медиашума в общественном транспорте и субъектного состава управленческого компонента.

Полученные результаты подтверждают аргументы авторов рассмотренных выше инициатив и указывают на требующиеся разработки и обсуждение вопросов практической реализации этих инициатив. Предложения, направленные на всестороннее обеспечение благоприятного информационного пространства в общественных местах, особенно в транспорте, можно рассматривать в контексте информационной гигиены и, соответственно, использовать гигиенический инструментарий, включая разработку параметров ПДУ (предельно допустимого уровня) шума и принципов гигиенического нормирования. Например, прогнозирование эффектов, значимость интенсивности и продолжительности воздействия фактора, измеримость факторов среды, дозовый принцип нормирования.

Решение поставленных задач исследования по концептуальному описанию проблемы информационного загрязнения локаций общественного транспорта, анализу предложений по преодолению этой проблемы и общественного мнения по данному вопросу позволяет констатировать появление в общественно-политическом и правовом пространстве значимой области общественных отношений, требующей регулирования с использованием средств формального и неформального контроля.

Гиперстимуляция воспринимающей информационные сигналы системы совместно с неподконтрольностью источника сигнала — устройства трансляции становится экологической проблемой и требует не только общественного обсуждения, но и государственного регулирования. Экологи-

зация информационной среды общественного транспорта настоятельно требует оценки и профилактики негативных воздействий медиашума на пассажиров и установления контроля над факторами медиашумового загрязнения общественных мест, что можно рассматривать в качестве перспектив для проведения дальнейших научных исследований в этой сфере.

Библиографический список

1. Эрисман Ф. Ф. Краткий учебник по гигиене / Ф. Ф. Эрисман. — М.: А. А. Карцев, 1912. — 524 с.
2. Еремин А. Л. Информационная экология / А. Л. Еремин // Международный журнал Экологические исследования — 1998. — Т. 54. — С. 241–253.
3. Некипелова О. О. Срочная адаптация к шуму и ее влияние на интеллектуальную работоспособность человека / О. О. Некипелова, М. Н. Некипелов, Т. И. Шишелова // Современные наукоемкие технологии. — 2005. — № 2. — С. 27–28.
4. Полянина А. К. Управление информационной безопасностью детей: теория и практика / А. К. Полянина. — Нижний Новгород: ННГУ, 2021. — 285 с.

5. Эксперты попросили Минтранс изменить правила перевозки пассажиров // РИА Новости. — URL: <https://ria.ru/20200219/1564951139.html> (дата обращения: 09.08.2022).

6. Объединение пассажиров ответило на идею об использовании наушников (2020) // РИА Новости. — URL: <https://ria.ru/20200219/1564978058.html> (дата обращения: 09.08.2022).

7. Нужны ли «вагоны тишины» в поездах МЦК? (2020) // Активный гражданин. — URL: <https://ag.mos.ru/poll/6631> (дата обращения: 09.08.2022).

8. Миронов Д. Ф. Информационный шум и образовательный процесс / Д. Ф. Миронов // Вестник Санкт-Петерб. гос. ун-та культуры и искусств. — 2015. — № 4. — С. 24–30.

Дата поступления: 09.08.2022

Решение о публикации: 24.11.2022

Контактная информация:

ПОЛЯНИНА Алла Керимовна — канд. соц. наук, доц.; alker@yandex.ru

Public Administration in the Field of Favorable Informational Environment Provision in Public Transport

A. K. Polyagina

Lobachevsky University, 23 Gagarin Ave Nizhny Novgorod, 603087, Russian Federation;
Samara State University of Railway Engineering, Komsomolskaya pl., 3, Nizhny Novgorod, 603087, Russian Federation

For citation: Polyagina A. K. Public Administration in the Field of Favorable Informational Environment Provision in Public Transport // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 867–875. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-867-875

Summary

Purpose: To consider the problem of favorable information environment provision in public transport, to pursue the analysis of the results of opinion poll. organized by various subjects of social monitoring. To analyze the proposed initiatives in the field of solving the issues of rules regulation on passenger behavior on the use of audio and video broadcasting devices in public transport, including the issues related to the use of individualization means of media signal consumption — headphones. **Methods:** Content analysis of the texts, placed in publicly available sources, of proposed initiatives to solve the problem on the regulation of

public relations in this sphere, as well as of the arguments of supporters and opponents of such initiatives. The secondary analysis of public opinion poll results. **Results:** For the first time, there is formulated the ecological level of the problem of media noise pollution of informational environment of public transport, and integrated approach to settle it via means, methods and hygienic regulation principles application is proposed, as well as there's formulated the usage of all of the potential of informal social monitoring, including the advocacy of media consumption healthy way, of social advertisements, aimed at the formation of inner belief and behavior ethical principles in public transport. **Practical significance:** Provision principles for favorable informational environment as the most important task of public administration in the sphere of handling public relations in public transport have been developed. The insufficiency of regulation of audio and video signal broadcasting practices in public spaces, preconditioning their negative impact on human health and well-being, is shown. The ways to settle this problem are proposed with the help of standardization and rationing of the functioning of physical quantities, which are the subject for measurement, namely, of informational signal effects and parameters.

Keywords: Informational ecology, media noise, informational hygiene, public transport, passenger rights.

References

1. Erisman F. F. *Kratkij uchebnik po gigiene* [A short textbook on hygiene]. — Moscow: A. A. Kartsev Publ., 1912, 524 p. (In Russian)
2. Eremin A. L. Informacionnaya ekologiya. [Information ecology]. *Mezhdunarodnyj zhurnal Ekologicheskie issledovaniya* [International Journal of Ecological Research]. 1998, I. 54, pp. 241–253. (In Russian)
3. Nekipelova O. O., Nekipelov M. N., Shishelova T. I. Srochnaya adaptaciya k shum i ee vliyanie na intellektual'nyu rabotosposobnost' cheloveka [Urgent adaptation to noise and its impact on human intellectual performance]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high-tech technologies]. 2005, I. 2, pp. 27–28. (In Russian)
4. Polyanina A. K. *Upravlenie informacionnoj bezopasnost'yu detej: teoriya i praktika* [Information security management of children: theory and practice]. — Nizhny Novgorod: NNGU Publ., 2021, 285 p. (In Russian)
5. Eksperty poprosili Mintrans izmenit' pravila perevozki passazhirov [Experts asked the Ministry of Transport to change the rules of passenger transportation]. *RIA Novosti* [RIA News]. Available at: <https://ria.ru/20200219/1564951139.html> (accessed: August 9, 2022). (In Russian)
6. Ob"edinenie passazhirov otvetilo na ideyu ob ispol'zovanii naushnikov (2020) [The Association of passengers responded to the idea of using headphones (2020)]. *RIA Novosti* [RIA News]. Available at: <https://ria.ru/20200219/1564978058.html> (accessed: August 9, 2022). (In Russian)
7. Nuzhny li "vagony tishiny" v poezdakh MTsK? (2020) [Are "silence cars" needed on MCC trains? (2020)]. *Aktivnyy grazhdanin* [Active Citizen]. Available at: <https://ag.mos.ru/poll/6631> (August 9, 2022). (In Russian)
8. Mironov D. F. Informacionnyj shum i obrazovatel'nyj process [Information noise and the educational process]. *Vestnik Sankt-Peterb. gos. un-ta kul'tury i iskusstv* [Bulletin of St. Petersburg. state University of Culture and Arts]. 2015, I. 4, pp. 24–30. (In Russian)

Received: August 09, 2022

Accepted: November 24, 2022

Author's information:

Alla K. Polianina — PhD in Sociology, Associate Professor; Alker@yandex.ru

УДК 656.224.072

Разработка автоматизированного алгоритма для расчета пропускной способности железнодорожной линии

М. А. Марченко¹, О. Д. Покровская¹, В. В. Щербаков²

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

²Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Российская Федерация, 191023, город Санкт-Петербург, наб. канала Грибоедова, д. 30-32, литер А

Для цитирования: Марченко М. А., Покровская О. Д., Щербаков В. В. Разработка автоматизированного алгоритма для расчета пропускной способности железнодорожной линии // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 876–888. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-876-888

Аннотация

Цель: Разработка автоматизированного алгоритма с применением инструментов имитационного моделирования, позволяющего производить расчет наличной пропускной способности железнодорожной линии со смешанным движением. В его основу заложены аналитические формулы. **Результаты:** Алгоритм отличается использованием инструментов имитационного моделирования и учетом коэффициента с одноименным названием. Применение данного программного продукта позволит повысить эффективность и точность расчетов наличной пропускной способности. Полученные в ходе моделирования данные были сопоставлены с данными в расписании, выявлено их расхождение, на основе которых было найдено значение коэффициента имитационного моделирования, интегрированный в существующие формулы. На основе всех вычислений разработан программный алгоритм с последующей его реализацией в программной среде Maple с целью автоматизации вычислений и повышения их эффективности. **Методы:** Использовались имитационное моделирование и метод аналитических сопоставлений. **Практическая значимость:** Повышение точности вычислений значений наличной пропускной способности на сети ОАО «РЖД» и упрощение реализации подобных вычислений. Данный алгоритм в случае его внедрения позволит приблизить рассчитываемые значения к реальным.

Ключевые слова: Железнодорожный полигон, аналитические формулы, имитационная модель, программный комплекс, сопоставление результатов, программный код.

Введение

В настоящее время вопрос автоматизации расчета пропускной способности на железнодорожном транспорте и его оптимизации является одним из наиболее актуальных. При этом в работе

также поставлена задача автоматизации вычислений с целью увеличения скорости производимых вычислений и повышения эффективности самих расчетов. Для выполнения этой цели была произведена разработка кода программного продукта,

позволяющего производить расчет пропускной способности железнодорожного полигона со смешанным движением.

В работе моделируется ситуация движения скоростных поездов и поездов дальнего следования по существующей железнодорожной линии Москва — Санкт-Петербург. Для упрощения разработки расчетных формул рассмотрим движение лишь выше упомянутых категорий поездов, не затрагивая многочисленные пригородные поезда и грузовое движение, которое сохранено на некоторых участках данной линии. В используемых в настоящее время расчетных формулах наличной пропускной способности закладывается временной промежуток на содержание железнодорожной инфраструктуры [1]. В данных формулах не в полной мере заложено время на разгон и замедление поездов, вследствие чего конечные результаты по общеизвестным формулам в значительной степени отличаются от фактически существующих. Это приводит к отклонениям в расчетах пропускной способности и фактической возможности пропуска поездов по конкретной линии или ее участку.

В целях устранения расхождений в данных расчетах была построена имитационная модель железнодорожного полигона. Путем многочисленного моделирования движения поездов, получения времени проследования поездов по железнодорожной линии был выявлен коэффициент имитационного моделирования, являющийся научной новизной, а также предложен программный код для автоматизации вычислений.

Анализ теоретического состояния вопроса

Проблема, подобная освещаемой в данной работе, рассматривалась в статье из второго выпуска 2021 года журнала «Железнодорожный транспорт» специалистами в области научно-исследовательской работы в сфере проблем железнодорожного транспорта С. В. Калинин,

А. Ф. Бородиным, А. Е. Смирновым, Г. Г. Горбуновым, А. Ю. Соколовым, А. П. Козловским и И. Р. Гургенидзе. В статье описаны методы и способы оптимизации использования путевого развития станции с целью пропуска большего количества поездов. рассматривается актуальный вопрос повышения эффективности использования пропускной способности станций с целью повышения станционной пропускной способности. В работе произведена подробная классификация всех имеющихся на сегодняшний день систем интервального регулирования движения поездов. Кроме того, произведен подробный анализ влияния этих систем на станционные и межпоездные интервалы, в том числе в случае проследования поездов станций без остановок. В работе имеется схема имитационной модели, которая имитирует работу железнодорожной станции и позволяет строить графики движения поездов. Серьезным недостатком данной работы следует отметить отсутствие подробного расчета, поскольку формулы способны дать четкую зависимость полученного результата от сторонних факторов [2].

Также известный специалист Ж. Я. Абдуллаев произвел рассмотрение похожей проблемы, которая непосредственно связана с особенностями определения пропускной способности двухпутных участков. В статье подробным образом рассмотрены и описаны классификации способов расчета пропускной способности железнодорожных линий, представлены аналитические формулы определения пропускной способности. В работе был предложен новый способ построения графика движения поездов, в результате чего возросла пропускная способность. Однако в статье отсутствуют результаты имитационного моделирования, которые могли бы подкрепить аналитические расчеты [3].

Работа [4] освещает предпосылки наиболее рационального распределения потоков поездов

всех категорий в железнодорожном узле в Парижском регионе с последующей максимальной оптимизацией. Путем реализации поставленной задачи появится возможность повышения поточности движения поездов в узле, а также наибольшего увеличения пропускной способности. В работе авторами представлена комплексная реорганизация движения поездов на основе удаления поездов из расписания, внесения корректировок в маршруты следования, изменения количества станций. Реорганизация была выполнена путем применения теории графов. При этом в статье не дается полного аналитического описания проблемы, освещаемой в ней. Полное отсутствие применения инструментов имитационного моделирования, которые бы предоставили возможность наглядной верификации результатов, не дает полной наглядности проведения исследований. Теория графов также применима в контексте расчета пропускной способности, однако требует дополнительной верификации имитационными процессами.

В статье [5] на основе железнодорожной линии R106 было проведено исследование, связанное с поиском наиболее оптимальных вариантов увеличения пропускной способности после завершения капитального ремонта. Авторами был предложен способ имитационного моделирования в программной среде OpenTrack с целью наиболее точного определения существующей наличной пропускной способности и поиска вариантов ее увеличения. В работе представлены имитационные модели до начала капитального ремонта на линии и после его окончания. С помощью подборки наиболее оптимальных параметров и с учетом ограничений, связанных с необходимостью соблюдения безопасного движения поездов авторам удалось добиться увеличения пропускной способности в полтора раза относительно первоначального варианта. Путем реализации описанных в работе мер имеется возможность увели-

чить размеры движения в железнодорожном узле в районе Загреба в первую очередь пригородных поездов — в связи с их сегодняшней нехваткой, что будет способствовать экономическому развитию Хорватии.

В ходе изучения обозначенной в работе проблемы был произведен анализ научной литературы на схожую тематику, где были проанализированы работы на тему имитационного моделирования в транспортной сфере и изучена эффективность применения подобных методов в данной отрасли [6–18].

В работе проанализированы аналитические формулы, по которым в настоящее время выполняется расчет наличной пропускной способности. С целью верификации результатов используется имитационная модель.

Построение имитационной модели железнодорожного полигона

Одной из составляющих исследования является имитационная модель, поскольку с ее помощью возможно получить значения времени проследования поездов по железнодорожной линии, более приближенные к реальным. Целесообразно производить имитационное моделирование в программном комплексе AnyLogic, поскольку он достаточно прост в освоении, не требует больших ресурсов производительности ЭВМ и для работы в нем необязательны знания языков программирования [16]. Для выполнения исследований в рамках этой работы используем железнодорожную библиотеку для построения модели железнодорожного полигона при помощи встроенных инструментов «железнодорожный путь» и «точки железнодорожного пути». Построение производим в масштабе относительного расстояния между железнодорожными станциями. Их удаленность друг от друга находим согласно [19]. Схема полигона приведена на рис. 1.

Для того чтобы запустить процесс имитационного моделирования, необходимо построить блочную структуру имитационной модели. Ее построение также производим в железнодорожной библиотеке с использованием блоков `trainSource`, `trainMoveTo`, `trainDispose`. Они моделируют соответственно зарождение имитационного процесса, его перемещение в заданную точку и последующее погашение после достижения цели. Однако с учетом специфики конкретной модели необходимо выполнять перераспределение моделируемых процессов на различные блоки, чтобы каждый конкретный поезд в расписании производил остановку на необходимых станциях в соответствии с расписанием следования. Для реализации этого процесса используем блок `selectOutput` библиотеки моделирования процессов, который устанавливаем между блоком зарождения процессов и блоком их направления следования. В каждом блоке прописываем распределение по условию:

`entity.size() = j`,

где j — значение от 1 до n ;

n — количество назначений.

Распределение этих потоков осуществляем вручную, путем ввода в модель переменной `trainSizeWithLoco` с целочисленным значением (int) и присвоением каждому поезду в расписании соответствующего целого числа. В процессе моделирования производим изменение значения с клавиатуры в поле `editbox`.

Для того чтобы осуществлять сбор информации о времени следования каждого отдельно взятого поезда по полигону, используем блоки `timeMeasureStart` и `timeMeasureEnd` и гистограмму. Для моделирования остановки на станции используем блок `delay`, в котором устанавливаем значение из расчета 1 минута стоянки = 1 миллисекунда, отталкиваясь от расписания движения поездов [20]. Подобным способом строим все

назначения рассматриваемых поездов различного типа. Блоки соединяем при помощи `connector`.

Таким образом, дополнительно учтенными условиями в имитационной модели является время на разгон и замедление поездов, в то время как в расчетных формулах учитывается среднее значение ходовой скорости.

На рис. 2 представлена блочная часть имитационной модели полигона.

Математический инструментарий расчета

Общеизвестная аналитическая формула расчета наличной пропускной способности, которая используется в настоящее время [1]:

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

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

I_p — расчетный межпоездной интервал;

α_n — коэффициент надежности работы инфраструктуры и подвижного состава, принимаем равным 0,96 [2].

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

$$I_p = \frac{0,5 \cdot L_{i2} + L_{\text{бл1}} + L_{\text{бл2}} + 0,5 \cdot L_{i1}}{V_{\text{ср}} \cdot 16,7} + t_b, \quad (2)$$

где L_{i1} , L_{i2} — длина соответственно впереди и позади идущего поезда;

L_b — расстояние, которое проходит второй поезд за время, необходимое для восприятия машинистом сигнала ближнего светофора;

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

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

t_b — время на восприятие изменения показаний светофора, принимаем равным 0,05 мин.


```

restart :
r := 116 :
t := 1.08 :
Km := ceil( ( r * 1000 * t * 60 ) / ( r / 36.366 * t * 1000 ) );
V := Float( round( Float( evalf( ( r * 1000 ) / ( t * 3600 ) ), 2 ) ), -2 );
Vm := round( V * Km );
Vu := 3 * Km;
Vt := 2 * Km;

Km := 2182
V := 42.95
Vm := 93717
Vu := 6546
Vt := 4364

```

Рис. 3. Расчет модельной скорости в программном пакете Maple

Находим величину расчетного межпоездного интервала I_p , опираясь на имитационную модель. Она находится в зависимости от показателя средней скорости следования поездов. В качестве исходных данных используем существующее расписание движения поездов [20].

Ориентируясь на расписание следования поездов по рассматриваемой железнодорожной линии, определяем маршрутную скорость поезда на отдельных участках полигона по формуле:

$$V_m = \frac{L_{\text{пол}} \cdot 1000}{t_m \cdot 3600}, \quad (3)$$

где $L_{\text{пол}}$ — длина железнодорожного полигона Москва — Санкт-Петербург, принимаемая равной 645,5 км;

t_m — время следования по маршруту,

В работе было введен термин коэффициента модельной скорости. Он используется для пересчета фактической скорости в значения, которые будут введены в блоки имитационной модели. Различие этих значений является следствием построения имитационной модели в сокращен-

ном масштабе. Формула коэффициента имеет следующий вид:

$$K_{\text{vm}} = \frac{L_{\text{пол}} \cdot 1000 \cdot t_m \cdot 60}{\frac{L_{\text{пол}}}{36,366} t_m \cdot 3600}; \quad (4)$$

$$K_{\text{vm}} = \frac{645,5 \cdot 1000 \cdot 3,5 \cdot 60}{\frac{645,5}{36,366} 3,5 \cdot 1000} = 2181,97 = 2182.$$

Ниже представлено аналитическое вычисление значения маршрутной скорости одного из высокоскоростных поездов «Сапсан», следующего по маршруту Москва — Санкт-Петербург под номером 752а.

$$V_m = \frac{645,5 \cdot 1000}{3,5 \cdot 3600} = 51,23 \text{ м/с};$$

$$V_{\text{мм}} = 51,23 \cdot 2182 = 111\,784 \text{ м/с}.$$

Скорости увеличения и уменьшения скорости перед стоянками у «Сапсана» составляют соответственно 3 и 2 м/с². У поездов дальнего следо-

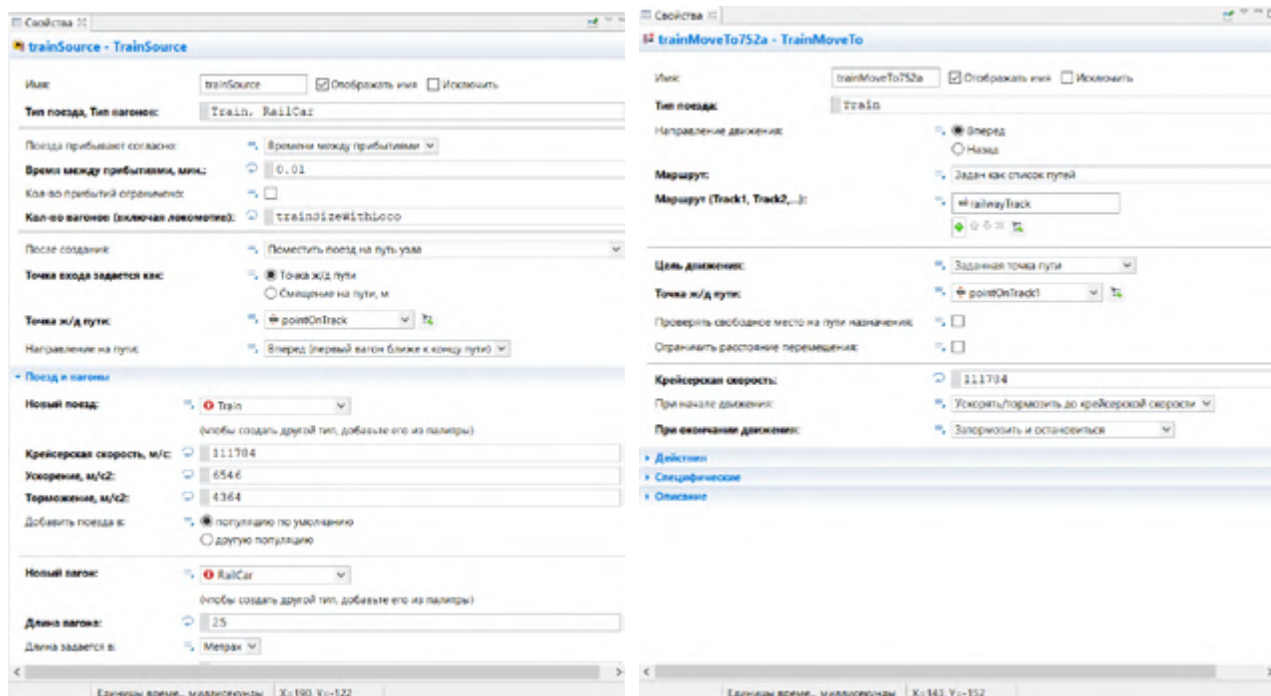


Рис. 4. Ввод найденных значений в блоки имитационной модели

вания эти значения составляют 1 м/с^2 , $0,5 \text{ м/с}^2$. Выполняем их пересчет для последующего ввода в имитационную модель:

$$V_{\text{ускм}} = 3 \cdot 2182 = 6546 \text{ м/с}^2;$$

$$V_{\text{замм}} = 2 \cdot 2182 = 4364 \text{ м/с}^2.$$

Вышеописанные вычисления целесообразно автоматизировать. Ниже на рис. 3 приведен расчет модельной скорости в программном пакете Maple.

Вписываем полученные величины в блоки имитационной модели trainSource и trainMoveTo. Процесс ввода представлен на рис. 4.

Далее процессом имитации движения поездов на гистограмме отображаются времена проследования поездов по линии.

Определяем время проследования каждого из поездов и сопоставляем его с фактическим временем по расписанию. Результаты представлены в табл. 1 и 2.

В виду того, что значения, полученные в процессе имитационного моделирования, отличаются от представленных в расписании движения поездов, находим отклонения по модулю. Они представлены в табл. 2.

Определим среднее отклонение имитационных значений от фактических по формуле:

$$G_v = \sqrt{\frac{X^2}{n(n-1)}}, \quad (5)$$

где X — сумма всех отклонений по двум направлениям;

n — количество поездов всех категорий в двух направлениях.

Подставив значения в формулу, получим следующий результат:

$$G_v = \sqrt{\frac{381,6^2}{51 \cdot (51-1)}} = 7,56 \text{ мин.}$$

Находим погрешность, которая была выявлена в результате имитационного моделирования относительно реального расписания:

ТАБЛИЦА 1. Результаты сопоставления времен проследования поездов согласно имитационной модели и реальных времен хода из Москвы в Санкт-Петербург

№ поезда	Фактическое время	Имитационное время	Отклонение
Москва (Ленинградская) — Санкт-Петербург (Главный)			
752а	210,00	210,67	0,67
756а	235,00	215,65	19,35
758а	244,00	260,00	16,00
760*р	245,00	239,13	5,87
770а	244,00	241,30	2,70
738а	244,00	248,70	4,70
714й	308,00	325,26	17,26
726ч	419,00	431,03	12,03
772а	225,00	221,74	3,26
776а	225,00	240,00	15,00
778а	255,00	234,78	20,22
786а	228,00	226,09	1,91
030у	598,00	580,91	17,09
020у	519,00	520,83	1,83
016а	512,00	502,40	9,60
082в	512,00	503,20	8,80
090ж	569,00	590,00	21,00
172с	579,00	600,95	21,95
160в	437,00	434,67	2,33
136с	571,00	572,73	1,73
120в	520,00	525,83	5,83
132г	559,00	564,35	5,35
028а	490,00	486,92	3,08
006а	477,00	470,37	6,63
054ч	536,00	531,67	4,33
050ч	641,00	660,00	19,00
002а	480,00	488,46	8,46

ТАБЛИЦА 2. Результаты сопоставления времен проследования поездов согласно имитационной модели и реальных времен хода из Санкт-Петербурга в Москву

№ поезда	Фактическое время	Имитационное время	Отклонение
Санкт-Петербург (Главный) — Москва (Ленинградская)			
711а	330,00	325,64	4,36
751а	210,00	210,85	0,85
755а	243,00	240,40	2,60
757а	242,00	238,18	3,82
759а	238,00	233,82	4,18
761а	235,00	233,45	1,55
767а	240,00	235,27	4,73
769а	240,00	238,18	1,82
737в	347,00	349,19	2,19
771а	235,00	230,91	4,09
773а	235,00	230,54	4,46
725ч	402,00	412,90	10,90
777а	235,00	234,18	0,82
119а	580,00	580,00	0,00
159а	492,00	501,60	9,60
171а	667,00	673,68	6,68
145а	624,00	614,29	9,71
049а	536,00	539,17	3,17
081а	511,00	497,69	13,31
029у	544,00	536,80	7,20
027а	494,00	502,40	8,40
015а	516,00	510,40	5,60
053ч	505,00	504,80	0,20
001а	480,00	495,38	15,38

Данной погрешности присваиваем термин «Коэффициент имитационного моделирования». Подставляем его в формулу (2), и она приобретает следующий вид:

$$K_{\text{им}} = \frac{G_v \cdot n}{\sum t_{\text{сл}}}, \quad (6)$$

где $t_{\text{сл}}$ — время следования одного поезда по расписанию.

$$K_{\text{им}} = 1 - \left(\frac{7,56 \cdot 51}{20 \cdot 463} \right) = 0,981.$$

$$I_p = \frac{0,5 \cdot L_{i2} + L_{\text{бл1}} + L_{\text{бл2}} + 0,5 \cdot L_{i1}}{V_{\text{ср}} \cdot 16,7 \cdot K_{\text{им}}} + t_{\text{в}}. \quad (7)$$

Среднюю скорость движения поездов найдем путем деления суммарного расстояния, пройденного всеми рассматриваемыми поездами за сутки, на суммарное время, затраченное ими на преодоление этого расстояния:

$$V_{\text{ср}} = \frac{\sum S_{\text{сл}}}{\sum t_{\text{сл}}};$$

$$V_{\text{ср}} = \frac{645,5 \cdot 51 \cdot 60}{20\,463} = 96,53 \text{ км/ч};$$

$$I_p = \frac{0,5 \cdot 250 + 3900 + 3900 + 0,5 \cdot 250}{96,53 \cdot 16,7 \cdot 0,98} + 0,05 = 5,15 \text{ мин};$$

$$N_{\text{нал}} = \frac{(1440 - 240)}{5,15} \cdot 0,96 = 223,69.$$

Блок-схема алгоритма программы приведена в следующем виде (рис. 5).

Часть кода в программном пакете Maple представлен на рис. 6:

В качестве локальных исходных данных используем сумму всех отклонений во времени следования поездов от времени их расписания, а также количество всех рассматриваемых поездов в обоих направлениях. Вычисляем G — средне-квадратическое отклонение времени следования, после чего производим вычисление коэффициента имитационного моделирования и последовательный расчет соответственно средней скорости следования всех рассматриваемых поездов v , межпоездного интервала I_a и наличной пропускной способности N . Это может быть использовано в развитии методологии, изложенной, например, в работах [21, 22].

Заключение

В процесс выполнения данной работы был разработан автоматизированный алгоритм расчета наличной пропускной способности с использованием имитационной модели движения поездов по существующей железнодорожной линии Москва — Санкт-Петербург с реализацией расчетов в программном пакете Maple. В ходе работы был произведен анализ использую-



Рис. 5. Блок-схема алгоритма

```

X := 381.6 :
n := 51 :

G := Float( round( Float( evalf( sqrt( X^2 / (n - 1) ), 2 ), -2 );
Kim := Float( round( Float( evalf( 1 - G * 51 / 20463 ), 3 ), -3 );
v := Float( round( Float( evalf( (645.5 * 51) / (20463 / 60) ), 2 ), -2 );
Ia := Float( round( Float( evalf( (0.5 * 250 + 3900 + 3900 + 0.5 * 250) / (v * 16.7 * 0.98) + 0.05 ), 2 ), -2 );
N := Float( round( Float( evalf( (1440 - 240) / Ia * 0.96 ), 2 ), -2 );

G := 7.56
Kim := 0.981
v := 96.53
Ia := 5.15
N := 223.69

```

Рис. 6. Программный код алгоритма

щихся в настоящее время аналитических формул для расчета наличной пропускной способности, произведено построение имитационной модели, которая производит симуляцию движения поездов по железнодорожной линии со смешанным движением.

Полученные в ходе моделирования данные были сопоставлены с данными в расписании, выявлены их расхождения, на основе которых было найдено значение коэффициента имитационного моделирования, интегрированного в существующие формулы.

На основе сопоставлений данных, полученных по аналитическим формулам и посредством имитационного моделирования, разработан программный алгоритм с последующей его реализацией в программной среде Maple с целью автоматизации вычислений и повышения их эффективности. Данный алгоритм в случае его внедрения на сети ОАО «РЖД» позволит повысить эффективность расчетов наличной пропускной способности и приблизить рассчитываемые значения к реальным.

Библиографический список

1. Инструкция по расчету наличной пропускной способности. — Утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 16 ноября 2010 г. № 128. — М.: ОАО «РЖД», 2011. — 305 с.
2. Бородин А. Ф. Использование пропускной способности станций при интервальном регулировании движения поездов / А. Ф. Бородин, Г. Г. Горбунов, А. Ю. Соколов и др. // Железнодорожный транспорт. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Вып. 2. — С. 29–36.
3. Абдуллаев Ж. Я. Особенности определения пропускной способности двухпутных участков / Ж. Я. Абдуллаев // Изв. Петербург. ун-та путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2019. — Вып. 3. — С. 361–369.
4. Estelle Altazin, Stéphane Dauzère-Pérès, François Ramond, Sabine Tréfond. A multi-objective optimization-simulation approach for real time rescheduling in dense railway systems. — Leeds, UK: European Journal of Operational Research. — Vol. 286. — Iss. 2, 2020. — Pp. 662–672.
5. Ivica Ljubaj, Matea Mikulčić, Tomislav Josip Mlinarić. Possibility of Increasing the Railway Capacity of the R106 Regional Line by Using a Simulation Tool. — Rome, Italy: Transportation Research Procedia. — 2020. — Vol. 44. — Pp. 137–144.

6. Угрюмов А. К. Вопросы организации движения на двухпутных участках / А. К. Угрюмов // Вопросы эксплуатации железных дорог СССР: Труды ЛИЖТ. — Л.: Трансжелдориздат, 1960. — Вып. 170.
7. Зуев Г. А. Интервального регулирования движения поездов на станции / Г. А. Зуев, А. Г. Савицкий // Железнодорожный транспорт. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Вып. 5. — С. 26–32.
8. Покровская О. Д. Состояние транспортно-логистической инфраструктуры для угольных перевозок в России / О. Д. Покровская // Инновационный транспорт. — 2015. — № 1(15). — С. 13–23.
9. Pokrovskaya O. Evolutionary-Functional Approach to Transport Hubs Classification / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. — 2020. — Vol. 982. — Pp. 356–365.
10. Покровская О. Д. О терминологии объектов терминально-складской инфраструктуры / О. Д. Покровская // Мир транспорта. — 2018. — Т. 16. — № 1(74). — С. 152–163.
11. Куренков П. В. Механизмы государственного регулирования развития транспортной системы региона / П. В. Куренков, Ю. В. Веселова // Транспорт: наука, техника, управление: сборник «Отечественная история». — 2006. — № 7. — С. 8–12.
12. Куренков П. В. План мероприятий (дорожная карта) по реализации программы организации контейнерных перевозок на пространстве 1520 / П. В. Куренков, А. В. Астафьев // Транспорт: наука, техника, управление: сборник «Российская история». — 2015. — № 11. — С. 84–92.
13. Chislov O. Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation / O. Chislov, V. Bogachev, A. Kravets et al. // *Transport problems*. — Katowice: Silesian University of Technology, 2021. — Iss. 2. — Pp. 153–165.
14. Bakyt G. Simulation of dynamic processes of interaction of car and railway track during train passage of curved sections of the track / G. Bakyt, S. Abdullayev, N. Suleyeva et al. // *Transport problems*. — Katowice: Silesian University of Technology, 2020. — Iss. 2. — Pp. 59–70.
15. Oziomek Ja. Improvement of regularity of urban public transport lines by means of intervals synchronization / Ja. Oziomek, A. Rogowski // *Transport problems*. — Katowice: Silesian University of Technology, 2018. — Iss. 4. — Pp. 91–102.
16. Мохонько В. П. Проблемы создания ситуационно-аналитической системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте / В. П. Мохонько, В. С. Исаков, П. В. Куренков // Бюллетень транспортной информации. — 2004. — № 9. — С. 22–27.
17. Мохонько В. П. Ситуационное управление перевозочным процессом / В. П. Мохонько, В. С. Исаков, П. В. Куренков // Транспорт: наука, техника, управление: сб. ОИ / ВИНТИ. — 2004. — № 11. — С. 14.
18. Вакуленко С. П. Финансово-экономическое решение проблемы пригородных перевозок / С. П. Вакуленко, П. В. Куренков // Экономика железных дорог. — 2012. — № 12. — С. 96–99.
19. Тарифное руководство № 4. Книги 1, 2 и 3. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2002.
20. Официальный сайт ОАО «РЖД». — URL: <https://pass.rzd.ru/> (дата обращения: 28.11.2021).
21. Персианов В. А. Проект «Городские железные дороги России» / В. А. Персианов, П. В. Метелкин, Л. С. Федоров и др. // Вестник транспорта. — 2014. — № 5. — С. 2–10.
22. Баритко А. Л. Организация и технология внешне-торговых перевозок / А. Л. Баритко, П. В. Куренков // Железнодорожный транспорт. — 1998. — № 8.

Дата поступления: 20.07.2022

Решение о публикации: 04.09.2022

Контактная информация:

МАРЧЕНКО Максим Александрович — аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой»; maks.marchenko1998@mail.ru

ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна — д-р техн. наук, проф., и.о. зав. кафедрой «Управление эксплуатационной работой»; insight1986@inbox.ru

ЩЕРБАКОВ Владимир Васильевич — д-р экон. наук, проф., зав. кафедрой «Логистика и управление цепями поставок»; shefainn@yandex.ru

Development of Automated Algorithm for Railway Line Capacity Calculation

M. A. Marchenko¹, O. D. Pokrovskaya¹, V. V. Shcherbakov²

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., 9, St. Petersburg, 190031, Russian Federation

²St. Petersburg State University of Economics, 30-32 letter A, nab. Griboyedov Canal, St. Petersburg, 191023, Russian Federation.

For citation: Marchenko M. A., Pokrovskaya O. D., Shcherbakov V. V. Development of Automated Algorithm for Railway Line Capacity Calculation // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 876–888. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-876-888

Summary

Purpose: To develop an automated algorithm using simulation modeling tools that allows calculating actual capacity of railway line with mixed traffic. Analytical formulas underlie the algorithm. **Results:** The algorithm features the use of simulation modeling tools and taking into account of the same name coefficient. The application of the given software product will allow to raise the efficiency and accuracy of actual capacity calculation accuracy. The data, obtained during the simulation, were compared to the data in the timetable, their discrepancy was revealed which basis on, simulation modeling value, integrated into existing formulas, was found. Based on all calculations, software algorithm has been developed with its subsequent implementation in Maple software environment in order to automate calculations and increase their efficiency. **Methods:** Simulation modeling and analytical comparison method were used. **Practical significance:** Improving the accuracy of calculations of the values of available capacity on the network of JSC “Russian Railways” and simplifying the implementation of such calculations. This algorithm, if implemented, would bring the calculated values closer to the real ones.

Keywords: Railway polygon, analytical formulas, simulation model, software package, comparison of results, program code.

References

1. *Instruktsiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti*. — *Utv. Rasporyazheniem OAO “RZhD” ot 16.11.2010 g. № 128* [Instructions for calculating the available throughput. — Approved. Order of Russian Railways OJSC dated November 16, 2010 No. 128]. Moscow: “RZhD” Publ., 2011. 305 p. (In Russian)
2. Borodin A. F., Gorbunov G. G., Sokolov A. Yu., Smirnov A. E., Gurgeneidze I. R., Kalinin S. V., Kozlovskiy A. P. Ispol’zovanie propusknoy sposobnosti stantsiy pri interval’nom regulirovanii dvizheniya poezdov [The use of the capacity of stations in the interval regulation of train traffic]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, I. 2, pp. 29–36. (In Russian)
3. Abdullaev Zh. Ya. Osobennostey opredeleniya propusknoy sposobnosti dvukhputnykh uchastkov [Features of determining the capacity of double-track sections]. *Izv. Peterb. un-ta putey soobshcheniya* [Izv. Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2019, I. 3, pp. 361–369. (In Russian)
4. Estelle Altazin, Stéphane Dauzère-Pérès, François Ramond, Sabine Tréfond. A multi-objective optimization-simulation approach for real time rescheduling in dense railway systems. Leeds, UK: European Journal of Operational Research. 2020, vol. 286, I. 2, pp. 662–672.
5. Ivica Ljubaj, Matea Mikulčić, Tomislav Josip Mlinarić. Possibility of Increasing the Railway Capacity of the R106 Regional Line by Using a Simulation Tool. Rome, Italy: Transportation Research Procedia, 2020, vol. 44, pp. 137–144.
6. Ugryumov A. K. Voprosy organizatsii dvizheniya na dvukhputnykh uchastkakh [Issues of organization of traffic on double-track sections]. *Voprosy ekspluatatsii zheleznikh dorog SSSR : Trudy LIZhT* [Questions of exploitation of railways of the USSR: Proceedings of LIZhT]. Leningrad: Transzheldorizdat Publ., 1960, I. 170. (In Russian)
7. Zuev G. A., Savitskiy A. G. Interval’nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov na stantsii [Interval regulation of train

traffic at the station]. *Zhelezнодороzhnyy transport* [Railway transport]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, I. 5, pp. 26–32. (In Russian)

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

9. Pokrovskaya O., Fedorenko R. Evolutionary-functional approach to transport hubs classification. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020, vol. 982, pp. 356–365.

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

11. Kurenkov P. V., Veselova Yu. V. Mekhanizmy gosudarstvennogo regulirovaniya razvitiya transportnoy sistemy regiona [Mechanisms of state regulation of the development of the transport system of the region]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: SB. Otechestvennaya istoriya* [Transport: science, technology, management: SB. National history]. 2006, I. 7, pp. 8–12. (In Russian)

12. Kurenkov P. V., Astaf'ev A. V. Plan meropriyatiy (dorozhnaya karta) po realizatsii programmy organizatsii kontreylernykh perevozok na prostranstve 1520 [Action plan (road map) for the implementation of the program for the organization of piggyback transportation in the area 1520]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: SB. Rossiyskaya istoriya* [Transport: science, technology, management: SB. National history]. 2015, I. 11, pp. 84–92. (In Russian)

13. Chislov O., Bogachev V., Kravets A., Bogachev T., Zadorozhnyi V., Bakalov M. Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation. *Transport problems*. Katowice: Silesian University of Technology, 2021, I. 2, pp. 153–165.

14. Bakyt G., Abdullayev S., Suleyeva N., Yelshibekov A., Seidemetova Zh., Sadvakassova Zh. Simulation of dynamic processes of interaction of car and railway track during train passage of curved sections of the track. *Transport problems*. Katowice: Silesian University of Technology, 2020, I. 2, pp. 59–70.

15. Oziomek Ja., Rogowski A. Improvement of regularity of urban public transport lines by means of intervals synchronization. *Transport problems*. Katowice: Silesian University of Technology, 2018, I. 4, pp. 91–102.

16. Mokhon'ko V. P., Isakov V. S., Kurenkov P. V. Problemy sozdaniya situatsionno-analiticheskoy sistemy upravleniya perevozhnym protsessom na zhelezнодороzhnom transporte [Problems of creating a situational-analytical system for managing the transportation process in railway transport]. *Byulleten' transportnoy informatsii* [Bulletin of transport information]. 2004, I. 9, pp. 22–27. (In Russian)

17. Mokhon'ko V. P., Isakov V. S., Kurenkov P. V. Situatsionnoe upravlenie perevozhnym protsessom [Situational management of the transportation process]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: sb. OI. VINITI* [Transport: science, technology, management: Sat. OI. VINITI]. 2004, I. 11, p. 14. (In Russian)

18. Vakulenko S. P., Kurenkov P. V. Finansovo-ekonomicheskoe reshenie problemy prigorodnykh perevozok [Financial and economic solution to the problem of suburban transportation]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Railway economics]. 2012, I. 12, pp. 96–99. (In Russian)

19. *Tarifnoe rukovodstvo № 4. Knigi 1, 2 i 3* [Tariff guide No. 4. Books 1, 2 and 3]. Moscow: IKTs "Akademkniga" Publ., 2002. (In Russian)

20. *Ofitsial'nyy sayt OAO "RZhD"* [Official website of Russian Railways]. Available at: <https://pass.rzd.ru/> (accessed: November 28, 2021).

21. Persianov V. A., Metelkin P. V., Fedorov L. S., Kurenkov P. V., Bednyakova E. B., Sysoeva E. A., Proshkina E. S., Kravchenko M. V., Zavarzaeva N. V., Ignatova Ya. S., Dranchenko Yu. M. PROEKT "Gorodskie zheleznyye dorogi Rossii" [Project "urban railways of Russia"]. *Vestnik transporta* [Bulletin of transport]. 2014, I. 5, pp. 2–10. (In Russian)

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

Received: July 20, 2022

Accepted: September 04, 2022

Author's information:

Maxim A. MARCHENKO — Postgraduate Student, "Operational Work Management" Department; maks.marchenko1998@mail.ru

Oksana D. POKROVSKAYA — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Acting Head of "Operational Work Management" Department; insight1986@inbox.ru

Vladimir V. SHCHERBAKOV — Dr. Sci. in Economics, Professor, Head of "Logistics and Supply Chain Management" Department; shefainn@yandex.ru