

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 19, выпуск 3, 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 20.09.2022.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 31,75.
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 3, 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@izvestiapgups.org

Publisher's address

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

Mass media registration certificate number

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

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

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

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

The journal has the Peer-review division

The journal is distributed

Index Direct Mail Agency "Kniga-Service" 33315

JOURNAL STAFF

Alexander Panychev, Editor-in-chief, PhD in Economics,
Associate Professor, Emperor Alexander I 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

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

- Ю. А. Канцибер, В. И. Штыков, А. Б. Пономарев, М. А. Васильева**
Пути повышения гидрологической эффективности осушения земляного полотна железных дорог 411
- А. К. Канаев, Э. В. Логин, К. А. Пудовкина**
Информационная модель перспективной базы данных в системе управления телекоммуникационной сетью Carrier Ethernet 421
- Д. А. Афонин, В. Н. Кавказский, А. А. Никитчин**
Оперативный геодезический контроль деформаций призабойной зоны при инновационных технологиях проходки туннелей 432
- М. Абу-Хасан, В. Я. Соловьева, А. С. Сахарова**
Способы стабилизации и укрепления иольдиевых глин и слабых глинистых грунтов при создании земляного полотна в районах Крайнего Севера 444
- Н. Г. Кобозева**
Анализ мест концентрации чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации за последние годы и вопросы транспортного обеспечения 455
- М. В. Третьяков, А. А. Пискун, О. В. Муждаба**
Неблагоприятные и опасные гидрологические явления р. Яны в районе поселка Усть-Куйга 464
- А. А. Воробьев, А. А. Крутько, Д. А. Седых**
Исследование напряженного состояния твердосплавного инструмента при токарной обработке железнодорожных колес 479
- Г. И. Паламарчук, П. Ю. Либерман**
Императивы управления рисками в авиационной деятельности 489

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

- И. А. Гайшинец, С. В. Доронин, И. И. Доронина**
Модернизация буксы электровоза для радиальной установки колесной пары в кривой 498
- А. К. Канаев, Е. В. Опарин, Е. В. Опарина**
Обеспечение информационной безопасности системы тактовой сетевой синхронизации на основе ее энтропийного анализа 505
- А. В. Агунов, И. А. Терёхин, Д. Д. Лаврухин, И. А. Баранов**
Разработка стационарного устройства по диагностике малообслуживаемой системы заземления опор контактной сети на переменном токе 515

Г. И. Паламарчук, А. А. Фомин

Методы и мероприятия устойчивости процессов функционирования
железнодорожного узла 528

М. Ю. Изварин, М. В. Евстафьева, Д. А. Талюкин, В. С. Павлова

Сравнение энергетической эффективности перевозок на железных дорогах мира 537

И. А. Гребнев, Н. Н. Сидорова, О. Е. Пудовиков

Статистический анализ поездопотока на участке Палласовка – Верхний Баскунчак
с целью выявления ветровых нагрузок..... 550

А. Ф. Колос

Засорение и загрязнение щебеночного балласта
при эксплуатации железнодорожного пути..... 558

В. А. Анисимов, А. С. Григорьева

О прогнозировании пассажиропотоков для высокоскоростных магистралей
с учетом конкуренции на рынке пассажирских перевозок 576

А. А. Воробьев, Я. С. Ватулин, А. С. Ватаев, Д. Д. Каримов, К. А. Сотников

К вопросу снижения негативного эффекта воздействия аэроупругого взаимодействия
высокоскоростного подвижного состава с элементами тоннельных сооружений..... 590

**ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ****В. М. Уваров**

Учет неоднородностей подсеточного масштаба в рамках численной модели глобального
распределения электрических полей в ионосфере Земли..... 600

А. И. Дергачев, О. Н. Куранова, О. А. Степанская, А. К. Черных

Моделирование восстановления железнодорожных объектов, разрушенных
в результате ЧС регионального масштаба 609

Е. В. Буняева, Е. В. Зверева, И. В. Кузнецов, А. А. Холодилов, Ю. О. Савватеева

Методы оценки качества и проектирования веб-сайтов образовательных организаций 618

В. В. Веселов

Гибридные конструкции балок на транспорте с применением металла и композитов 631

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

Модель расчета оптимальной заполняемости контейнерных поездов
в двадцатифутовом эквиваленте 639

Н. В. Малышев, С. А. Бойков

Математическая модель распределения заданий
между подъемно-транспортными машинами 651

CONTENTS

→ PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM

- Yu. A. Kantsiber, V. I. Shtykov, A. B. Ponomarev, M. A. Vasileva**
Ways to Improve Hydrological Efficiency of Railway Subgrade Drainage 418
- A. K. Kanaev, E. V. Login, K. A. Pudovkina**
Informational Model of Promising Database in the System of Management
for Carrier Ethernet Telecommunication Network 429
- D. A. Afonin, V. N. Kavkazskiy, A. A. Nikitchin**
Operational Geodetic Check of Bottom-Hole Zone Deformations
at Innovative Tunneling Technologies..... 442
- M. Abu-Khasan, V. Ya. Soloviova, A. S. Sakharova**
Methods for Stabilizing and Strengthening Yoldian Clays and Weak Clay Soils When Creating
a Subgrade in the Far North Regions..... 453
- N. G. Kobozeva**
Analysis of Emergence Concentration Spots in Russian Federation
Last Years and Transport Provision Issues 462
- M. V. Tretyakov, A. A. Piskun, O. V. Muzhdaba**
Unfavorable and Dangerous Hydrological Phenomena
of the Yana River Near Ust-Kuyga Township 477
- A. A. Vorobyev, A. A. Krutko, D. A. Sedykh**
Investigation of Tense State of Carbide Instrument at Turning Treatment of Railway Wheels..... 487
- G. I. Palamarchuk, P. Yu. Liberman**
Risk Management Imperatives in Aviation Activity 496

→ HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

- I. A. Gaishinets, S. V. Doronin, I. I. Doronina**
Modernization of Electric Locomotive Axle Box for Radial Installation of a Wheelset in a Curve 504
- A. K. Kanaev, E. V. Oparin, E. V. Oparina**
Ensuring Information Security for Clocked Network Synchronization System on the Basis
of the System Entropy Analysis 513
- A. V. Agunov, I. A. Terekhin, D. D. Lavrukhin, I. A. Baranov**
Development of Stationary Device for Diagnostics of Low-Maintenance Grounding System
of Catenary Poles Being on Alternating Current 526

G. I. Palamarchuk, A. A. Fomin	
Methods and Measures for Railway Junction Functioning Stability	535
M. Yu. Izvarin, M. V. Evstafieva, D. A. Talyukin, V. S. Pavlova	
Comparison of Transportation Energy Efficiency on the World Railways.....	548
I. A. Grebnev, N. N. Sidorova, O. E. Pudovikov	
Statistical Analysis of Train Flow on Pallasovka – Verkhniy Baskunchak Section with the Purpose of Wind Burden Identification	556
A. F. Kolos	
Clogging and Pollution of Broken Stone Ballast During Railway Track Exploitation.....	573
V. A. Anisimov, A. S. Grigorieva	
On Passenger Traffic Forecasting for High-Speed Highways Given Competition in Passenger Transportation Market.....	587
A. A. Vorob'ev, Ya. S. Vatulin, A. S. Vatayev, D. D. Karimov, K. A. Sotnikov	
On the Issue of Negative Effect Reduction of Aeroelastic Interaction Between High-Speed Rolling Stock and Tunnel Structure Elements	598

→ GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

V. M. Uvarov	
Accounting for Subgrid Scale Heterogeneity in the Frames of Numerical Model for Global Distribution of Electric Fields in the Earth Ionosphere	607
A. I. Dergachev, O. N. Kuranova, A. K. Chernykh	
Modeling the Restoration of Railway Facilities Destroyed As a Result of Emergences of a Regional Scale	616
E. V. Bunyaeva, E. V. Zvereva, I. V. Kuznetsov, A. A. Kholodilov, Yu. O. Savvateeva	
Website Quality Assessment and Website Design Methods for Educational Organizations.....	628
V. V. Veselov	
Beam Hybrid Structures with Metal and Composites in Transport	637
M. V. Sheverdova, O. D. Pokrovskaya, M. A. Marchenko, V. V. Shcherbakov	
Model for Calculation of Optimal Filling of Container Trains in Twenty-Foot Equivalent	648
N. V. Malyshev, S. A. Boikov	
Mathematical Model for Task Distribution Among Lifting Transport Machines.....	657



УДК 625.123

Пути повышения гидрологической эффективности осушения земляного полотна железных дорог

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

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

Для цитирования: Канцибер Ю. А., Штыков В. И., Пономарев А. Б., Васильева М. А. Пути повышения гидрологической эффективности осушения земляного полотна железных дорог // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 411–420. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-411-420

Аннотация

Цель: Гидрологическое обоснование конструкций дренажных систем, эффективно осушающих слабоводопроницаемые грунты земляного полотна. В результате переувлажнения грунтов атмосферными осадками и грунтовыми водами верхнее строение пути подвергается деформации и теряет свою прочность. Для исключения неблагоприятных процессов применяют различные водоотводные устройства и дренажные системы. В современном мире значительно возросли скорость движения и количество грузоперевозок и увеличилась нагрузка на верхнее строение пути. Для снижения рисков к конструкциям дренажных систем необходимо применять гидрологические требования по обеспечению влажностного режима грунтов земляного полотна. **Методы:** Применительно к новым конструкциям используется традиционный воднобалансовый метод оценки эффективности дренажа, учитывающий два основных типа увлажнения: атмосферный и смешанный. Для атмосферного питания приводятся данные по расчетному притоку воды к дренажу в Северо-Западной зоне России. Атмосферное питание может отсутствовать в случае применения геомембран на основной площадке земляного полотна. Расстояние между коллекторами определено по авторской методике, полученной аналитическим методом. **Результаты:** Предложена новая конструкция бесполостной дрены. Доказано, что предложенная конструкция в слабоводопроницаемых грунтах дренирует земляное полотно эффективнее, чем подкуветный дренаж. Приведен пример гидравлического расчета такой дрены, определено расстояние между отводящими коллекторами в заданных условиях. **Практическая значимость:** Благодаря применению бесполостного дренажа влажность грунтов земляного полотна снизится, что приведет к увеличению его несущей способности. Результаты могут быть использованы в слабоводопроницаемых грунтах, распространенность которых достаточно велика. Конструкции, включающие бесполостный дренаж, могут использоваться в комплексе с традиционными.

Ключевые слова: Земляное полотно, слабоводопроницаемые грунты, дренаж, инфильтрация, грунтовые воды, атмосферные осадки, сроки осушения, геотекстильный материал, геомембрана, расчетный приток, водный баланс, расчетная обеспеченность.

Одной из основных причин деформации верхнего строения, земляного полотна и его основания на железных и автомобильных дорогах является снижение несущей способности грунтов в результате их переувлажнения атмосферными осадками и грунтовыми водами. Для ее исключения (или снижения влияния) применяют различные водоотводные и дренажные устройства (лотки, подкуветный дренаж и др.), которые должны отвести поверхностные и грунтовые воды, уменьшить влажность грунтов и тем самым снизить опасность недопустимых деформаций пути [1].

Опыт применения существующих конструкций дренажа в полосах отвода железных дорог показывает, что в слабоводопроницаемых грунтах земляного полотна и его основания при коэффициентах фильтрации менее 0,01 м/сут они не обеспечивают своевременный отвод атмосферных осадков и понижение уровня грунтовых вод (верховодки), допуская продолжительное переувлажнение этих грунтов, так как дальность действия дренажа, как правило, не превышает 3–5 м, а фактическое расстояние от него до пути может составлять порядка 10 метров.

Для повышения эффективности осушения земляного полотна при существенном увеличении скорости движения и грузоперевозок на железных дорогах, а следовательно, и нагрузки на верхнее строение пути, конструкции дренажа должны отвечать определенным гидрологическим требованиям к отводу поверхностного стока, водопримной и водопроводящей способности дренажа [2].

С целью выполнения этих требований, наряду с применяемыми водоотводными и дренажными устройствами в полосах отвода дороги, для усиления конструкций полотна и верхнего строения пути рекомендуется предусматривать устройство под балластной призмой бесполостного дренажа, которое должно отвести избыток воды, уменьшить влажность грунтов и снизить опас-

ность недопустимых деформаций верхнего строения пути [3–8]. Для лучшего регулирования водно-теплового режима промерзающих пучинистых грунтов земляного полотна возможно также устройство под балластом защитного слоя из дренирующего грунта, а на автодорогах, кроме того, гидроизолирующих, капилляропрерывающих и теплоизолирующих прослоек, изготавливаемых из натуральных, геотекстильных или полимерных материалов [9]. Однако, несмотря на достаточную эффективность, устройство защитного слоя при реконструкции железных дорог может быть ограничено условиями участка: типом и свойствами грунтов земляного полотна, высотными отметками пути, прилегающих участков и контактной сети, технологией и стоимостью работ и т. д.

Применяемые с 90-х гг. на железных дорогах геотекстильные материалы с однородными фильтрационными свойствами, уложенные в основание балласта, усиливают несущую способность верхнего строения пути, но не препятствуют переувлажнению грунтов земляного полотна атмосферными осадками и существенно не увеличивают скорость его осушения. Они целесообразны в основном при атмосферном типе увлажнения в слабдеформируемых грунтах земляного полотна.

Использование геотекстильных материалов с гидроизолирующей прослойкой наряду с усилением несущей способности верхнего строения железнодорожного пути позволит повысить гидрологическую эффективность дренажа за счет снижения инфильтрации осадков и переувлажнения грунтов земляного полотна. Поэтому, по сравнению с геотекстильными материалами с однородными фильтрационными свойствами, область применения геотекстильных материалов с гидроизолирующей прослойкой может быть существенно расширена. Наряду с участками дороги, имеющими атмосферный тип увлажнения, геотекстильные материалы с гидроизолирующей прослойкой можно применить и при смешанном типе

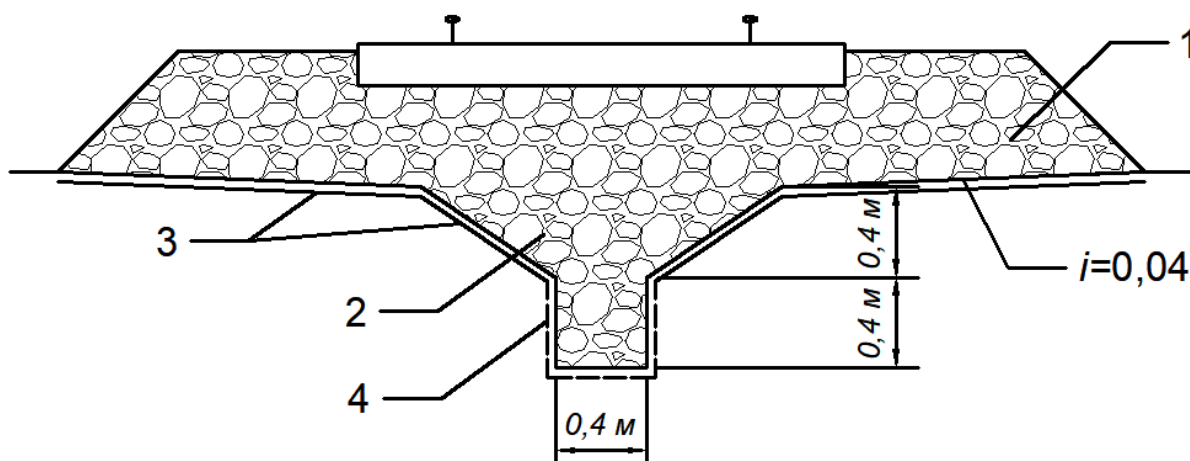


Рис. 1. Поперечное сечение верхнего строения пути с бесполостной дренажью:
 1 — балластная призма; 2 — бесполостная дрена; 3 — водонепроницаемый геоматериал;
 4 — геотекстиль, $i = 0,04$ — уклон поверхности основной площадки земляного полотна

увлажнения (выемка, нулевое место) с залеганием грунтовых вод (верховодки) на «безопасной» глубине (свыше 2 м от бровки земляного полотна), что должно обеспечиваться эффективной работой дренажа в полосах отвода дороги.

На рис. 1 представлена конструкция верхнего строения с бесполостной дренажью в основании балластной призмы, при применении которой практически исключается попадание выпадающих осадков в земляное полотно, сложенное слабопроницаемыми грунтами. В этом случае несущая способность грунта земляного полотна не снижается. Выпадающие осадки стекают по поверхности водонепроницаемого геоматериала в бесполостную дренаж и далее отводятся в коллектор. В нижней части бесполостной дренажи по контакту с грунтом проложен геотекстиль. В случае подъема уровня грунтовых вод в земляном полотне при недостаточной эффективности подкюветного дренажа бесполостная дренаж будет препятствовать его дальнейшему подъему.

При проектировании бесполостного дренажа в земляном полотне необходимо произвести комплекс гидрологических, фильтрационных и гидравлических расчетов притока воды к дренажу и его параметров.

Дренажные устройства в любых строительных сооружениях и конструкциях, в том числе и на железных дорогах, рассчитывают на понижение уровня грунтовых вод и отведение атмосферных осадков определенной интенсивности, препятствуя их проникновению в грунты земляного полотна. Расчетный приток воды к ним определяется в зависимости от условий формирования водного режима и допустимой длительности переувлажнения грунтов земляного полотна (t , сут), уровней грунтовых вод и осадков расчетной обеспеченности (p , %).

Деформационные процессы, происходящие в переувлажненных грунтах земляного полотна, зависят от их физико-химических свойств, климатических условий и проявляются неоднозначно в течение года.

Известно, что наибольшее количество и интенсивность осадков на территории РФ наблюдается в летние месяцы года (июль — август), что приводит к формированию во влажные годы избыточного увлажнения и деформаций в слабопроницаемых грунтах земляного полотна, а также максимального притока воды к дренажу. Поэтому для этих грунтов основным расчетным является летний период.

Деформационные процессы морозного пучения и оттаивания пучинистых грунтов происходят в холодный период года. Однако приток воды к дренажу в этот период, как показали расчеты, будет примерно в 1,5–3 раза меньше, чем летом.

По условиям формирования водного режима грунтов земляного полотна необходимо различать два основных типа их увлажнения: атмосферный и смешанный.

При смешанном типе увлажнения часть осадков поступит в грунтовые воды, поднимая их уровень, который должен понижаться дренажом, уложенным в полосах отвода дороги. Одновременно происходит капиллярный подток в зону аэрации к испаряющей поверхности, а зимой к фронту промерзания грунтов. В выемке или нулевом месте дороги в определенных гидрогеологических условиях кроме инфильтрационного будет наблюдаться дополнительный приток грунтовых вод к земляному полотну с прилегающей территории (склоновый) и (или) снизу из напорного водоносного пласта, перекрытого слабоводопроницаемыми грунтами (напорный). Смешанный тип увлажнения наблюдается, как правило, в дренируемых грунтах (пески, супеси, легкие суглинки). Однако грунты земляного полотна и его основания при этом могут быть слабоводопроницаемыми.

При атмосферном увлажнении слабоводопроницаемых грунтов (тяжелые суглинки и глины), грунтовые воды, как правило, отсутствуют или располагаются глубоко, оказывая слабое влияние на водный режим грунтов земляного полотна дороги, проходящей как в насыпи, так и в выемках. Выпадающие осадки расходуются на поверхностный и дренажный сток, испарение, инфильтрацию в балласт, защитный слой и грунты. На их кровле формируется временная верховодка. Таким образом, при атмосферном типе увлажнения земляного полотна дорог и достаточно эффективной работе подкюветного дренажа влияние грунтовых вод на водный режим слабоводо-

проницаемых грунтов зоны аэрации в земляном полотне можно не учитывать.

При устройстве геотекстильных материалов с гидроизолирующей прослойкой инфильтрация в нижележащие грунты земляного полотна будет практически отсутствовать.

Дополнительный приток воды к бесполостному дренажу следует учитывать только при наличии в полосах отвода дренируемых грунтов, напорного питания и отсутствии (неэффективности) дренажа в полосах отвода.

Расчетный приток воды к дренажу (ω , мм/сут) рекомендуется определять детальным или упрощенным способами, основанными на решении уравнений водного баланса в грунтах зоны аэрации и грунтовых вод для расчетного периода осушения [10].

Ориентировочные значения расчетного притока воды к дренажу 2 % обеспеченности приведены в таблице. Для оценки притока 1 % обеспеченности необходимо ввести поправочный коэффициент, примерно равный 1,2; 5 % обеспеченности — 0,8.

Максимальный приток воды к дренажу в слабоводопроницаемых грунтах земляного полотна для ВСМ и особогрузонапряженных дорог (при $t = 1$ сут и $p = 1-2\%$) в Северо-Западной зоне РФ достигает 30–50 мм/сут.

Известно [10, 11], что до 45–60 % суточных осадков выпадает в течение первого часа. Таким образом, максимальная часовая интенсивность притока воды к бесполостному дренажу может достигнуть 20–30 мм/час. В связи с этим дренажный сток, ограничиваемый только водопропускной способностью материала бесполостного дренажа, на очень короткий период значительно увеличивается. Однако именно в этот период происходит самоочищение коллекторов от образовавшегося в его полости наилка.

Удельный расчетный двухсторонний приток воды на 1 погонный метр дренажа, в том числе бесполостного дренажа, будет равен:

Расчетный приток воды к дренажу 2 % обеспеченности в Северо-Западной зоне России ($\cdot 10^{-3}$, м/сут) [10]

Годовая норма осадков, мм	Период осушения, сут		
	1	5–10	30
< 500	20	9–6	4
501–550	25	12–8	6
551–600	30	14–9	7
601–650	35	17–10	8
> 650	40	20–13	9

Примечание. Годовая норма осадков приведена только к показаниям осадкомера без учета других поправок.

$$q^1 = 10^{-3} \cdot \omega \cdot B_d, \text{ м}^2/\text{сут}, \quad (1)$$

где B_d — ширина зоны стока в бесполостную дренаж, м.

При устройстве бесполостного дренажа между рельсами в нулевом месте или выемке дороги ширина зоны стока в слабоводопроницаемых грунтах примерно на 0,5–1 м больше ширины основной площадки земляного полотна, которая для однопутной дороги составляет 6–7 м [1], т. е. $B_d = 6,5$ –8 м. Для двухпутной линии $B_d \approx 5,5$ –6,5 м.

Отвод воды из бесполостной дрены земляного полотна должен производиться **самотечным** способом с помощью дренажного коллектора в кюветы, лотки и дренаж в полосах отвода дороги.

При невозможности самотечного отвода воды следует предусматривать устройство **механического** водоподъема, включающее специальный бетонный или полимерный колодец, в который вводится дренажный коллектор и устанавливается насос с автоматическим регулятором режима его работы. Высота водоподъема в выемках дороги может достигать 1,5–2 м. Отводная труба от насоса выводится в нагорные канавы, кюветы или лотки, а при их отсутствии — за пределы полосы отвода на поверхность земли, в ложбины, лощины, суходолы и ручьи.

Расстояние между коллекторами (L) можно устанавливать на основе фильтрационных расче-

тов или назначить в пределах 50–200 м с учетом продольного уклона земляного полотна, наличия водопропускных сооружений на участке реконструкции пути и др.

Расчетный расход дренажных вод в устье коллектора (Q) вычисляется по формулам:

$$Q = 0,0116 \cdot q^1 \cdot L, \text{ л/с}, \quad (2)$$

$$Q = 1,16 \cdot 10^{-5} \cdot q^1 \cdot L, \text{ м}^3/\text{с}.$$

При минимальных параметрах коллектора: $D = 0,1$, $I = 0,003$ и $L < 200$ м, которые наиболее часто будут приниматься при проектировании бесполостного дренажа, его пропускная способность ($Q_{\text{пс}}$) изменяется в пределах от 2 до 4 л/с, что в 4–7 раз и более превышает расчетный расход дренажных вод (Q). При больших уклонах и диаметре коллектора $Q_{\text{пс}} > Q$ (на порядок и больше).

Проектирование коллекторов рекомендуется выполнять с учетом требований [12, 13].

Гидравлический расчет бесполостной дрены составного профиля для переходного режима движения фильтрационного потока был нами разработан ранее [14]. Было также показано, что при тех характеристиках бесполостной дрены, которые лучше всего подходят для осушения земляного полотна, именно переходный режим является преобладающим.

Представляет интерес ответ на вопрос: какой же максимальный расход, хотя и продолжительностью не более часа, может наблюдаться в коллекторах при расстояниях между ними до 280 м при двухстороннем впадении в них бесполостных дренажей. Принимаем, что бесполостная дренаж имеет размеры поперечного сечения, представленные на рис. 1, и максимальная глубина воды в ней практически равна полной ее высоте.

Дано: материал заполнителя бесполостной дрены — щебень фракции 20–40 мм; коэффициент фильтрации при ламинарном режиме $K_d = 4,47$ м/с и при турбулентном $K_T = 0,095$ м/с;

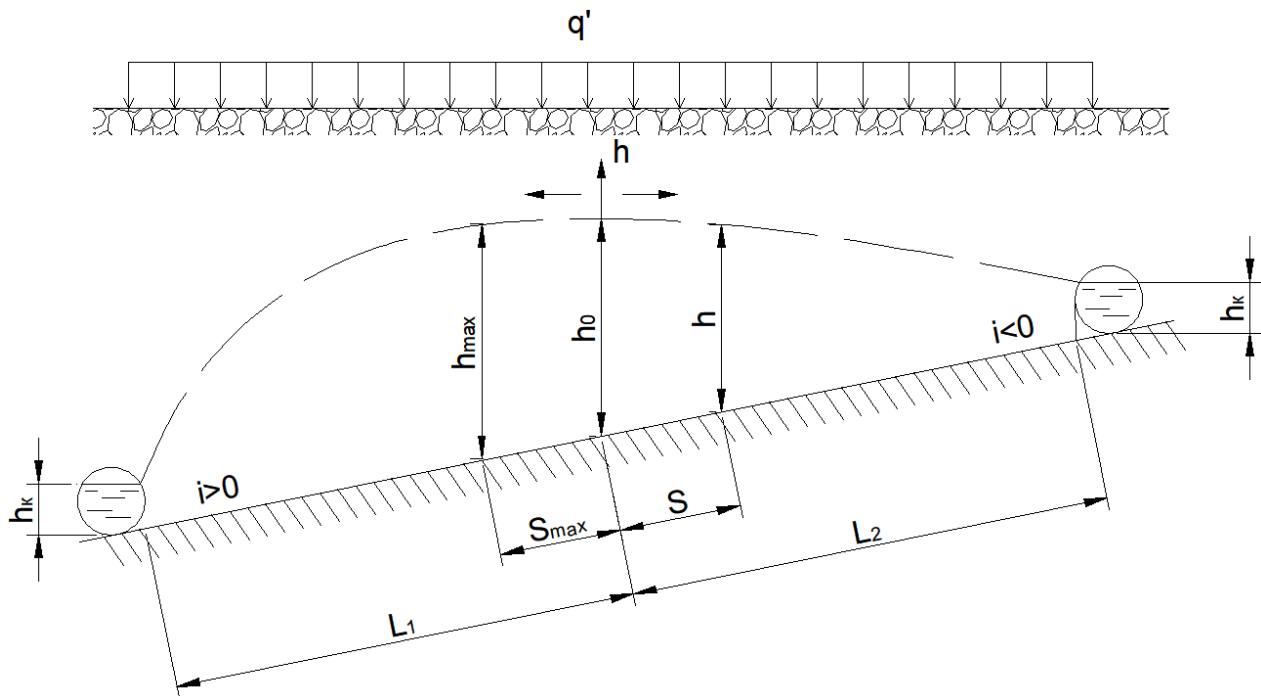


Рис. 2. Расчетная схема движения воды в бесполостной дрене.
Пунктиром показано положение кривой депрессии

удельная приточность q , вычисленная с использованием зависимостей, составляет $0,17 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. Принимаем $L_1 = 175 \text{ м}$. Расчетная схема представлена на рис. 2. Определить h_0 и L_2 .

Порядок расчета и соответствующие расчетные зависимости и расшифровка входящих в них величин изложены в [14]. Используя перечисленные выше исходные данные и задаваясь рядом величин h_0 , добиваемся того, чтобы полученное в результате расчетов значение h_0 равнялось задаваемому. Это и будет искомая глубина фильтрационного потока в начале координат (в точке водораздела).

$$\begin{aligned}
 h_0 &= L_1 \sqrt{\frac{(t_k^3 - i \cdot t_k^2 + U_l \cdot t_k + U_t)^{(1-F_1)}}{(t_k - K_1)^{(1-3F_1)}}} \cdot \exp \left[-\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{p}{2} - \operatorname{arctg} \frac{2t_k + K_1 - i}{\sqrt{N_1}} \right) \right] = \\
 &= 175 \sqrt{\frac{[0,57^3 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,57^2 \cdot 10^{-6} + 0,78 \cdot 10^{-5} \cdot 0,57 \cdot 10^{-3} + 1,338 \cdot 10^{-7}]^{(1-0,227)}}{(0,57 \cdot 10^{-3} + 4,08 \cdot 10^{-3})^{(1-3 \cdot 0,227)}}} \times \\
 &\times \exp \left[\frac{0,108 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{93,43 \cdot 10^{-6}}} \left(\frac{3,14}{2} - \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot 0,57 \cdot 10^{-3} - 4,08 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{93,43 \cdot 10^{-6}}} \right) \right] = 0,73 \text{ м.}
 \end{aligned}$$

Далее, приняв в качестве расчетной величину $h_0 = 0,73 \text{ м}$ и задаваясь значением L_2 , равным, например, 100 м , по формуле при принятых нами ранее остальных исходных и полученных в ходе расчета исходных данных снова вычисляем принятое значение L_2 , как и в предыдущем случае, если принятое значение практически совпадает с полученным по расчету, то оно и принимается в качестве окончательного результата. В рассматриваемом случае $L_2 = 106 \text{ м}$. Следовательно, при тех исходных данных и размерах поперечного

сечения дрены максимальное расстояние между коллекторами равно $L_1 + L_2 = 106 + 175 = 281$ м. Меняя размеры поперечного сечения дрены и допустимую в ней максимальную глубину, мы, соответственно, можем получить в результате расчета меньшее в разы, по сравнению с указанным выше, расстояние между коллекторами.

Выводы

1. Бесполостной дренаж отводит избытки воды в допустимые сроки (период осушения) при выпадении атмосферных осадков расчетной интенсивности превышения (обеспеченности).

2. Для повышения гидрологической эффективности осушения слабоводопроницаемых грунтов земляного полотна железных дорог наряду с применяемыми водоотводными и дренажными устройствами в полосах отвода целесообразно использовать бесполостной дренаж в сочетании с расположением в основании балластной призмы водонепроницаемого геоматериала (геомембраны).

3. Гидравлические расчеты свидетельствуют, что при двухстороннем впадении дрен в коллекторы расстояние между ними может варьировать от десятка метров до 280 м.

4. При минимальных параметрах коллектора ($D = 0,1$ м, $I = 0,003$ и $L < 200$ м), которые наиболее часто будут приниматься при проектировании бесполостного дренажа, его пропускная способность ($Q_{\text{пс}}$) изменяется в пределах от 2 до 4 л/с, что в 4–7 раз и более превышает расчетный расход дренажных вод (Q). При больших уклонах и диаметре коллектора $Q_{\text{пс}} > Q$ (на порядок и больше).

Библиографический список

1. СП 32-104—98. Проектирование земляного полотна железнодорожной колеи 1520 мм. — М.: Госстрой России. 2001.

2. Канцибер Ю. А. Гидрологические требования к режиму осушения грунтов земляного полотна / Ю. А. Кан-

цибер, А. Б. Пономарев, М. А. Васильева // Сборник трудов X Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2018.

3. Штыков В. И. Гидравлический расчет дрен треугольного профиля, усиленных дренажной трубой / В. И. Штыков, А. Б. Пономарев // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2020. — Т. 17. — Вып. 1. — С. 144–156

4. Пономарев А. Б. Влияние систем бесполостного дренажа на несущую способность железнодорожного земляного полотна / А. Б. Пономарев, В. В. Конюшков, В. В. Лушников и др. // Вода и экология: проблемы и решения. — 2019. — № 4(80). С 47–53

5. Штыков В. И. Гидравлический расчет бесполостных дрен треугольного поперечного сечения при переходном режиме / В. И. Штыков, А. Б. Пономарев // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2019. — Т. 16. — Вып. 3. — С. 523–532

6. Штыков В. И. Гидравлический расчет бесполостного пластового дренажа при грунтовом напорном питании / В. И. Штыков, А. В. Козлова // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — 2007. — Т. 247. — С. 84–90.

7. Shtykov V. I. The performance of geotextile materials used for filtration and separation in different structures as an important part of geotextiles requirements / V. I. Shtykov, L. S. Blazhko, A. V. Ponomarev // Procedia Engineering. — 2017. — Pp. 247–251.

8. 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.

9. Пособие по проектированию методов регулирования водно-теплового режима верхней части земляного полотна (к СНиП 2.05.02—85). — М.: Стройиздат. 1989. — 97 с.

10. Канцибер Ю. А. Расчетная приточность к дренируемым площадям в условиях Северо-Запада России / Ю. А. Канцибер, В. И. Штыков // Сб. Акад. чтения к 200-летию ПГУПС. — СПб.: ПГУПС. 2009. — С. 88–90.

11. Справочник по климату СССР. ч. 1-IV. — Л.: Гидрометеиздат, 1972.

12. Технические указания по устройству дренажей для осушения основной площадки земляного полотна в комплексе с ремонтами пути. — М.: Изд. МГУПС, 1999. — 33 с.

13. Прогнозы подтопления и расчет дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях. Спр. пособие к СНиП 2.06-15—85. — М.: Стройиздат, 1991. — 272 с.

14. Shtykov V. Hydraulic Design of a Component Cavity-Free Drains at Transient Water Flow in the Aggregate / V. Shtykov, A. Ponomarev; A. Manakov, A. Edigarian (eds.) // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021. TransSiberia 2021. Lecture Notes in

Networks and Systems. — Springer, Cham, 2022. — Vol. 402. — DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_36.

Дата поступления: 16.05.2022

Решение о публикации: 23.08.2022

Контактная информация:

КАНЦИБЕР Юрий Алексеевич — канд. техн. наук, младший научный сотрудник; kanziber3@yandex.ru

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

ПОНОМАРЕВ Андрей Борисович — канд. техн. наук, доц.; pol1nom@yandex.ru

ВАСИЛЬЕВА Марина Александровна — ассистент; vasilevama_79@mail.ru

Ways to Improve Hydrological Efficiency of Railway Subgrade Drainage

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

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

For citation: Kantsiber Yu. A., Shtykov V. I., Ponomarev A. B., Vasileva M. A. Ways to Improve Hydrological Efficiency of Railway Subgrade Drainage // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 411–420. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-411-420

Summary

Purpose: Hydrological rationale for drainage system buildings that effectively drain poorly permeable subgrade soils. As a result of watering of soils by rainfalls and groundwaters, track upper structure undergoes deformation and loses its strength. To exclude adverse processes, various drainage devices and drainage systems are used. In the modern world, traffic speed and freight transportation quantity have risen and the load on track superstructure has significantly increased. To reduce risk for drainage system buildings it is necessary to apply hydrological requirements to ensure moisturizing regime of subgrade soils. **Methods:** For new structures, traditional water-balance method for drainage efficiency assessment is used. The method takes into account two main types of moisturizing: atmospheric and mixed ones. For atmospheric watering, we used the data on water estimated inflow to a drainage in Russia North-West zone. Atmospheric nutrition may be absent in the case of geomembrane usage on subgrade major platform. The distance between collectors is determined by the author's methodology obtained by an analytical method. **Results:** The new structure of gravel drain is proposed. It has been proven that the proposed structure in poorly permeable soils drains a subgrade more efficiently than a subditch drainage does. An example of a hydraulic calculation of such a drain is given, the distance between outlet collectors in the set conditions is determined. **Practical significance:** Due to the use of gravel drainage, subgrade soil moisture will decrease that will lead to the subgrade bearing capacity increase. The results can be used in poorly permeable soils which prevalence is quite high. Structures, including gravel drainage, can be applied in combination with traditional ones.

Keywords: Subgrade, poorly permeable soils, drainage, infiltration, rainfalls, groundwaters, timeframes for draining, geotextile material, geomembrane, predicted inflow, water balance, predicted sufficiency.

References

1. SP 32-104-98. *Proektirovanie zemlyanogo polotna zhelezнодорожной колеи 1520 mm* [SP 32-104-98. Design of subgrade for 1520 mm railway track]. Moscow: Gosstroy Rossii Publ. 2001. (In Russian)
2. Kantsiber Yu. A., Ponomarev A. B., Vasil'eva M. A. *Gidrologicheskie trebovaniya k rezhimu osusheniya gruntov zemlyanogo polotna* [Hydrological requirements for the regime of drainage of subgrade soils]. *Sbornik trudov X Mezhdunarodnoy konferentsii po problemam prochnosti materialov i sooruzheniy na transporte* [Proceedings of the X International Conference on the Problems of the Strength of Materials and Structures in Transport]. 2018. Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I (Sankt-Peterburg) Publ. (In Russian)
3. Shtykov V. I., Ponomarev A. B. *Gidravlicheskiy raschet dren treugol'nogo profilya, usilennykh drenazhnoy truboy* [Hydraulic calculation of triangular profile drains reinforced with a drainage pipe]. *Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the St. Petersburg State University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2020, vol. 17, I. 1, pp. 144–156. (In Russian)
4. Ponomarev A. B., Konyushkov V. V., Lushnikov V. V., Kirillov V. M. *Vliyanie sistem bespolostnogo drenazha na nesushchuyu sposobnost' zhelezнодорожного zemlyanogo polotna* [Influence of cavityless drainage systems on the bearing capacity of the railway subgrade]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [Water and ecology: problems and solutions]. 2019, I. 4(80), pp. 47–53. (In Russian)
5. Shtykov V. I., Ponomarev A. B. *Gidravlicheskiy raschet bespolostnykh dren treugol'nogo poperechnogo secheniya pri perekhodnom rezhime* [Hydraulic calculation of voidless drains of triangular cross-section in transient mode]. *Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the St. Petersburg State University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2019, vol. 16, I. 3, pp. 523–532. (In Russian)
6. Shtykov V. I., Kozlova A. V. *Gidravlicheskiy raschet bespolostnogo plastovogo drenazha pri gruntovom napornom pitanii* [Hydraulic calculation of cavityless reservoir drainage with ground pressure supply]. *Izvestiya VNIIG im. B. E. Vedeneeva* [Izvestiya VNIIG im. B. E. Vedeneev]. 2007, ol. 247, pp. 84–90. (In Russian)
7. Shtykov V. I., Blazhko L. S., Ponomarev A. B. *The performance of geotextile materials used for filtration and separation in different structures as an important part of geotextiles requirements*. *Procedia Engineering*. 2017, pp. 247–251.
8. 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.
9. *Posobie po proektirovaniyu metodov regulirovaniya vodno-teplovogo rezhima verkhney chasti zemlyanogo polotna (k SNiP 2.05.02-85)* [Manual for the design of methods for regulating the water-thermal regime of the upper part of the subgrade (to SNiP 2.05.02-85)]. Moscow: Stroyizdat Publ. 1989. 97 p. (In Russian)
10. Kantsiber Yu. A., Shtykov V. I. *Raschetnaya pritochnost' k dreniruemykh ploshchadym v usloviyakh Severo-Zapada Rossii* [Estimated inflow to drained areas in the conditions of the North-West of Russia]. St. Petersburg: PGUPS Publ. 2009, pp. 88–90. (In Russian)
11. *Spravochnike po klimatu SSSR* [Reference book on the climate of the USSR]. L.: Gidrometeoizdat Publ., 1972. (In Russian)
12. *Tekhnicheskie ukazaniya po ustroystvu drenazhey dlya osusheniya osnovnoy ploshchadki zemlyanogo polotna v komplekse s remontami puti* [Technical instructions for the installation of drainage for draining the main area of the subgrade in combination with track repairs]. Moscow: MGUPS Publ. 1999. 33 p. (In Russian)

13. *Prognozy podtopleniya i raschet drenaznykh sistem na zastraivaemykh i zastroyennykh territoriyakh. Spr. Posobie k SNiP 2.06-15-85* [Forecasts of flooding and calculation of drainage systems in built-up and built-up areas. Ref. Manual for SNiP 2.06-15-85]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1991. 272 p. (In Russian)

14. Shtykov V., Ponomarev A., Manakov A., Edigarian A. Hydraulic Design of a Component Cavity-Free Drains at Transient Water Flow in the Aggregate. International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia — 2021. TransSiberia 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham. 2022, vol. 402. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_36

Received: May 16, 2022

Accepted: August 23, 2022

Author's information:

Yuriy A. KANTSIBER — PhD in Engineering, Junior Researcher; kanziber3@yandex.ru

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

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

Marina A. VASILEVA — Assistant; vasilevama_79@mail.ru

УДК 007.52

Информационная модель перспективной базы данных в системе управления телекоммуникационной сетью Carrier Ethernet

А. К. Канаев, Э. В. Логин, К. А. Пудовкина

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

Для цитирования: Канаев А. К., Логин Э. В., Пудовкина К. А. Информационная модель перспективной базы данных в системе управления телекоммуникационной сетью Carrier Ethernet // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 421–431. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-421-431

Аннотация

Цель: Разработка информационной модели перспективной базы данных в системе управления телекоммуникационной сетью с применением технологии Carrier Ethernet для обеспечения эффективности хранения, доступа и обновления данных о функционировании телекоммуникационной сети, что позволит увеличить оперативность выполнения встроенных процессов контроля и управления ОАМ при своевременном и обоснованном формировании решений по управлению телекоммуникационной сетью в условиях высокой динамики изменения ее состояния, а также с учетом особенностей технологии Carrier Ethernet. Таким образом, с целью предоставления услуг заданного качества сформирована информационная модель базы данных в системе управления телекоммуникационной сетью с указанием основных источников информации, которыми являются подсистемы и модели системы управления телекоммуникационной сетью, в соответствии с ранее разработанной трехуровневой концептуальной моделью. А также для достижения поставленной цели разработана логическая структура полученной информационной модели базы данных на примере объектов предметной области. **Методы:** Основы теории управления сложными процессами, теория многоагентных систем управления распределенными объектами, теория систем хранения и представления информации, методы объектно-ориентированного проектирования, теоретико-множественный подход для описания множества данных об объекте управления. **Результаты:** Полученная информационная модель базы данных и разработанная логическая трехуровневая структура функционирования описаны вербально и математически. Дана оценка функционирования предложенной логической структуры базы данных в системе управления телекоммуникационной сети связи с применением технологии Carrier Ethernet и механизмов ОАМ. Предложены направления дальнейшего исследования в направлении разработки моделей основных процессов сбора, обработки и предоставления данных о функционировании подсистем в системе управления телекоммуникационной сетью. **Практическая значимость:** Разработанная информационная модель базы данных в системе управления телекоммуникационной сетью отличается от известных возможностью учета и включения в нее данных реализации комплекса уникальных моделей функционирования и управления телекоммуникационной сетью Carrier Ethernet и механизмов управления ОАМ, ранее полученных авторами и являющихся подсистемами в системе управления телекоммуникационной сетью с использованием возможностей технологии Carrier Ethernet. При этом

полученная в работе информационная модель базы данных позволит соответствовать требованиям по оперативности реализации цикла управления и минимизировать финансовые и технические ресурсы для ее реализации за счет эффективного хранения, доступа и обновления данных о функционировании сетевых элементов, а в перспективе эффективное хранение данных о состоянии сетевых элементов и всей сети с применением средств прогноза и интеллектуальной поддержки принятия решений позволит формировать сценарии по эффективному управлению телекоммуникационной сетью.

Ключевые слова: Телекоммуникационная сеть, система управления, объектно-ориентированная база данных, база знаний, интеллектуальная система.

Введение

Функционирование систем управления телекоммуникационными сетями (СУ ТКС) во многом опирается на возможности распределенных подсистем сбора и хранения данных о функционировании объекта управления. А помимо сбора и хранения система управления должна соответствовать требованиям по оперативности реализации ряда процессов, направленных на контроль, оценку и прогнозирование состояния ТКС. Включение в автоматизированные системы управления интеллектуальных компонентов поможет решить эту задачу.

При проектировании информационных и интеллектуальных систем важным этапом является формализация комплекса данных о предметной области и процессах, функционирующих в ней. Для этого необходимо сформировать все пространство информации о предметной области при сохранении свойства адекватности системы управления реальному объекту управления. Данная работа направлена на структуризацию предметной области СУ ТКС, что позволит сформировать объективную информацию о процессах в ней и представить полученную структуру в формализованном виде информационной модели базы данных.

Структура и уровни системы управления телекоммуникационной сетью с применением технологии Carrier Ethernet

В силу отсутствия единой методической основы для разработки СУБД предварительный этап проектирования базы данных должен вклю-

чить определение и описание всех компонентов и отношений между ними, входящих в архитектуру СУБД, являющимися источниками для нее из предметной области. Под предметной областью понимается та часть физической среды, информацию об элементах и семантических связях которой необходимо динамически перенести в подсистему хранения. Поскольку границы между компонентами предметной области всегда носят условный характер, представленная на рис. 1 обобщенная архитектура БД в СУ ТКС Carrier Ethernet демонстрирует некоторые общие элементы представлений знаний об объекте управления и о принципах управления компонентами баз данных [1–3].

Базы данных используют модель «клиент — сервер», в которой компоненты подсистемы БД играют роль серверов, а компоненты СУ ТКС — роль клиентов. При этом узлами подсистемы БД могут также называться компоненты ее архитектуры и/или отдельные группы блоков (кластеров) в рамках реализации типичных сценариев взаимодействия с компонентами СУ ТКС в соответствии с определенным методом [4].

Запросы от компонентов СУ ТКС поступают через транспортную подсистему БД. Помимо этого, транспортная подсистема обеспечивает взаимодействие с другими компонентами кластера БД. Под кластером понимается область подсистемы БД, которая информационно и концептуально описывает уровень СУ ТКС (ОУ, ОТУ и ТУ) (см. рис. 2) [5].



Рис. 1. Архитектура СУБД

Полученный от компонента СУ ТКС запрос транспортная подсистема направляет его компоненту обработчиков запросов, который его анализирует, интерпретирует и проверяет. После чего производится контроль управления доступом, так как для полного цикла функционирования обработчика запросов необходима интерпретация запроса. Компонент оптимизатор запросов

устраняет избыточные части запроса и запускает процесс поиска эффективного способа его выполнения с учетом внутренней статистики (значения весов путей и пересечений) и размещения данных (координаты расположения данных в кластере, классы и типы этих данных, а также затраты на их передачу) [6]. Реляционные операции, представленные в виде дерева зависимостей, опти-

мизатор запросов обрабатывает и проводит ряд оптимизаций (например, упорядочивание индексов, оценка мощности и выбор средств доступа).

По сути, запрос представляется в виде плана выполнения, единицами которого являются операции, последовательное выполнение которых должно соответствовать условию о полноте результата запроса. У одного запроса может быть несколько планов, отличающиеся эффективностью. Оптимизатор в этом случае выбирает тот план, при котором будет получен наиболее полный результат по показателю эффективности.

Подсистема выполнения обрабатывает выбранный план на предмет сбора необходимых результатов выполнения локальных и удаленных операций. Под удаленным управлением в абсолютном смысле понимается запись и чтение данных на других кластерах, а также выполнение репликации (а в частном случае под удаленным управлением понимается набор процессов, методов, команд для управления непосредственно ТКС). Локальные запросы (поступающие непосредственно от компонентов текущего кластера БД или от подсистем соответствующего уровня СУ ТКС) выполняются подсистемой хранения данных [7].

Подсистема хранения данных включает в себя несколько компонентов (блоков) с установленным набором функций: диспетчер транзакций (планировка транзакций и обеспечение логически согласованных состояний), диспетчер блокировок (блокировка объектов БД для выполнения транзакций для исключения конкурентных операций, нарушающих физическую целостность данных), средства доступа организуют структуру для хранения данных (управление доступом и организация данных на диске), диспетчер буферов (кэширование страниц данных в памяти), диспетчер восстановления (ведения журнала операций и восстановление состояния системы в случае сбоя). Комплексно диспетчеры транзакций и блокировок контролируют процесс управления

параллелизмом, что гарантирует логическую и физическую целостность данных, добиваясь при этом максимально эффективного выполнения конкурентных операций [8].

Предложенная концептуальная модель БД в общей модели СУ ТКС на основе Carrier Ethernet включает в себя необходимые компоненты универсальной СУБД и за счет детализации и классификации данных о ТКС предусматривает в ней место и функции компонентов трехуровневой модели СУ ТКС. В частности, выделенные уровни СУ ТКС позволяют учитывать их взаимосвязь с кластерами (узлами) БД.

Подсистема выполнения занимает ключевое место в общей модели БД, так как в ней выделяются границы ответственных компонентов в составе БД, тогда как в концептуальной модели СУ ТКС они уже определены. Данные моделей и блоков контроля и управления состоянием ТКС хранятся в подсистеме хранилища данных, и с помощью компонента взаимодействия хранилищ кластеров обеспечивается непрерывность управления. При этом реализация самих моделей и процессов собирается в подсистеме выполнения в удаленном или локальном компоненте в зависимости от типа запрашиваемого процесса.

Математическое описание информационной модели базы данных в СУ ТКС с применением технологии Carrier Ethernet

Формализованное представление знаний и данных об объекте и процессах в нем является основополагающей задачей в области информационных систем. Для формирования информационной модели, которая будет максимально адекватно отражать состояние и процессы в объекте в рамках целей управления, имеется ряд особенностей:

– сложность и размерность объекта управления, а также большой объем диагностических параметров элементов ТКС. Для этого информационная

модель предусматривает ряд ограничений своей предметной области, использование подмножеств с выделением групп элементов/параметров/механизмов/команд по единому признаку;

– отсутствие достаточной объективной информации об объекте компенсируется использованием экспертной оценки информации;

– изменение состояния и поведения объекта должны своевременно влиять на соответствующие изменения в модели с требуемой временной задержкой [9].

К основным структурным элементами информационной модели СУ ТКС относятся: объекты предметной области (объекты ТКС), семантические отношения между объектами ТКС, процессы, функции, алгоритмы и т. д.

Модель СУ ТКС может быть представлена следующим образом:

$$АСУ = \{O, C, M, R, R', t\},$$

где O — множество объектов ТКС (устройств СЕ);

C — классовая модель множества объектов;

M — множество методов (процессы контроля управления состоянием ТКС СЕ, функции, процедуры логического вывода, направленные на управление состоянием устройств СЕ);

R — множество семантических отношений между объектами (устройствами СЕ);

R' — множество ограничений целостности модели ТКС на основе технологии СЕ;

t — континуальный параметр (время).

Каждый элемент ТКС в математическом представлении имеет свои составляющие. Объектом называется сущность, которая имеет предопределенное множество атрибутов и методов на выбранном времени, а также определена состоянием и правилами поведения. Состояние объекта можно описать с помощью атрибутов и семантических отношений, а правила поведения задаются методами. Некоторый i -й объект

информационной модели ТКС является устройством СЕ (например, коммутатором) и выглядит так:

$$o_i(t) = \{S_i, P_i(t), M_i, O_i, T_i, t, N\},$$

где S_i — множество идентифицирующих атрибутов, которые характеризуют объект в целом и точно определяют его (такие атрибуты статичны и ими являются, например, названия устройств);

$P_i(t)$ — множество атрибутов, отражающих состояние объекта в момент времени (множество параметров устройства СЕ, характеризующих его состояние в момент времени);

M_i — множество методов объекта (алгоритмы и процессы функционирования ТКС на основе СЕ, в данном случае механизмы ОАМ);

O_i — множество встроенных объектов модели в объект $o_i(t)$ (например, порты коммутатора, кнопки управления, индикаторы, питание и др.);

T_i — множество временных характеристик объекта;

t — время;

N — множество натуральных чисел.

Временная характеристика включает в себя множество фаз существования объекта $o_i(t)$. Множество идентифицирующих атрибутов включает в себя значение этого атрибута и множество параметров, характеризующих его $S_i = \{s_{ij}, W_{ij}\}$. Атрибуты, принадлежащие объекту, могут менять свое значение во времени, что применимо как к отдельному атрибуту $P_{im}(t)$, так и всему множеству $P_i(t)$:

$$P_i(t) = \{P_{i1}(t), \dots, P_{im}(t)\}, m \in N,$$

где $P_{ij}(t)$ ($1 = \overline{1, m}$) — атрибут объекта.

Методы объекта определяют алгоритм функционирования установленных в СУ процессов по контролю и управлению состоянием ТКС на основе СЕ. Множество методов отдельного объ-

екта в информационной модели можно представить так:

$$M_i = \{M_{i1}, \dots, M_{id}\}, d = \overline{1, m}.$$

Метод в общем виде можно представить как:

$$M_{ij} = \{X_{ij}, Y_{ij}, U_{ij}, F_{ij}, V_{ij}, T_{ij}^{(M)}\},$$

где X_{ij} — множество входных параметров;

Y_{ij} — множество выходных параметров;

U_{ij} — определение/описание метода;

F_{ij} — операция, математическая функция, процедура логического вывода и др.;

V_{ij} — множество условий применения (возбуждения) метода;

$T_{ij}^{(M)}$ — множество временных характеристик текущего метода.

Структура представления встроеного объекта (в частности, порт коммутатора СЕ) в информационной модели полностью совпадает со структурой основного объекта (коммутатора), а отличие состоит в статусе принадлежности и множестве параметров, характеризующих состояние данного встроеного объекта. При этом процедура миграции из одного объекта в другой объект также считается встраиванием объектов. А временные характеристики способны хранить историю миграции таких объектов.

В общем понимании класс как структурный элемент объекта позволяет задавать общие признаки объектов, атрибутов, методов и т. д. Под классом понимается множество объектов, имеющих общую структуру, состояние элементов объектов, методы и семантические отношения. Множество объявлений (идентифицирующих атрибутов, атрибутов, методов и встроеного объектов) определяют структуру класса. Состояние характеризуется идентифицирующими атрибутами и фиксированными значениями атрибутов. Класс можно представить в виде:

$$C_i = \{U_i^{(Ci)}, S_i', Z_i'', A_i'', B_i'', M_i', M_i'', C_i^{(Ci)}, I_p, T_i^{(Ci)}\},$$

где $U_i^{(Ci)}$ — определение/описание класса;

S_i' — множество идентифицирующих атрибутов;

Z_i'' — множество объявлений идентифицирующих атрибутов;

A_i'' — множество объявлений атрибутов;

B_i'' — множество фиксированных значений атрибутов;

M_i' — множество методов класса;

M_i'' — множество объявлений методов класса;

$C_i^{(Ci)}$ — множество встроеного классов в класс C_i ;

I_p — множество родительских классов;

$T_i^{(Ci)}$ — характеристики класса C_i .

Классы могут быть простыми (без встроеного и родительских классов) и сложными в противном случае.

С помощью семантических отношений объекты и классы объединяются в сеть или множество семантических сетей. Это позволяет расширять возможности информационной модели ТКС на основе СЕ. Множество семантических отношений R имеет вид:

$$R = \{R_1, \dots, R_p\}, \text{ где } p \in N.$$

Тогда как каждый элемент множества R имеют свою структуру, включающую описание данного семантического отношения, множества исходящих и входящих вершин. Также структура R может зависеть от ее реализации и взаимосвязи с классами и входящими в них объектами. Например, объекту СЕ может принадлежать серия (класс) портов (группа сетевых портов для организации трафика со скоростью 10 Гбит — 10 Gbe, группа трибунарных портов — 1 Gbe, группа канальных портов — STM-1/OC-3 и др.), а каждый из этих портов будет характеризовать принадлежность их к другой серии (классу) объектов СЕ (например, устройства сети доступа, агрегации доступа

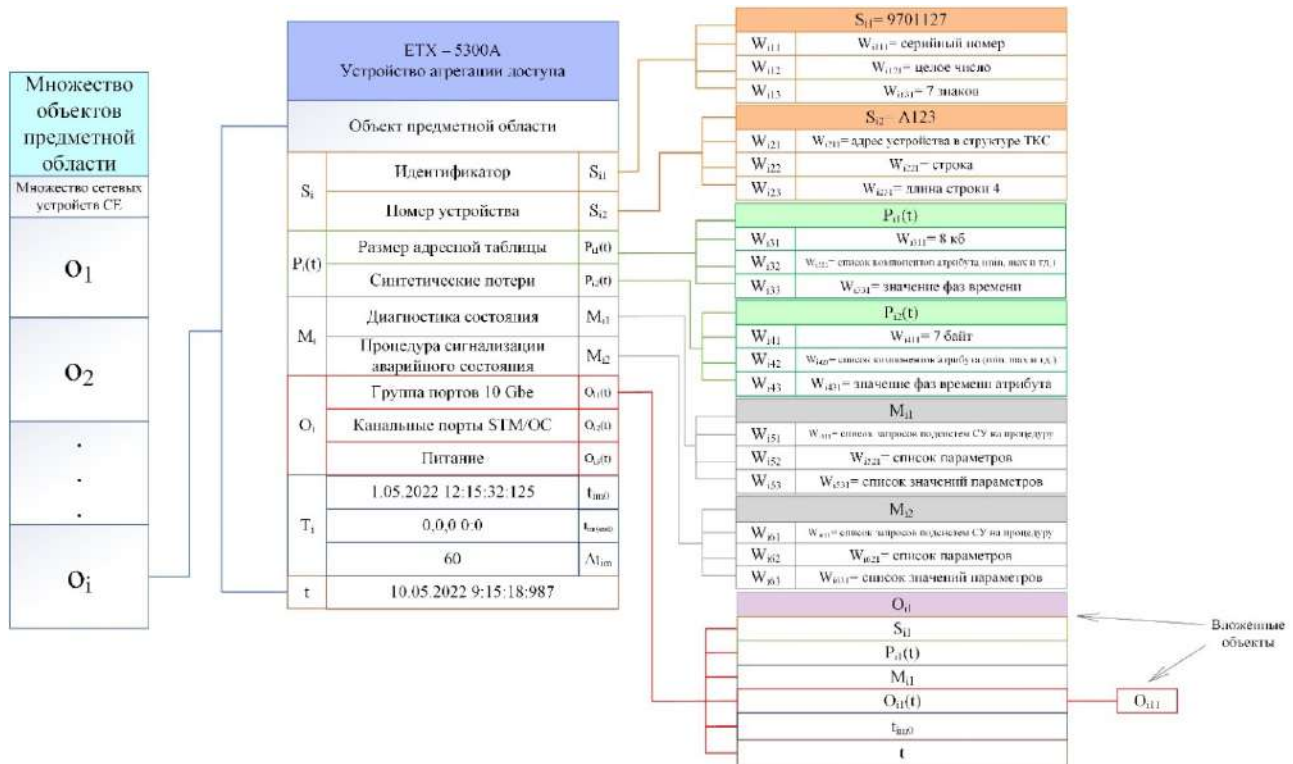


Рис. 2. Логическая структура базы данных в СУ ТКС с применением технологии Carrier Ethernet

или пограничное оборудование), которые также относятся к родительскому классу портов коммутатора как вложенные в них объекты. Для обобщенной модели в данной работе не рассматривались подобного рода семантические отношения.

Динамичность модели достигается тем, что в нее могут включаться новые объекты и исключаться существующие, что приводит к изменениям структуры модели и смене порождающего класса. Для этого вводятся ограничения целостности:

$$R^i = \{R_1^i, \dots, R_n^i\}, \text{ где } i \in N.$$

При этом структура одного элемента множества R^i имеет структуру, совпадающую со структурой элемента множества семантического отношения.

Ограничения целостности позволяют сохранить целостность и адекватность модели предметной области, контролировать число ошибок. Методы предметной области ТКС на основе СЕ имеют такую же структуру, что и методы входя-

щих в нее объектов. Отличие состоит в назначении и порядке использования этих методов. Методы объектов позволяют описать их правила поведения, реализуют интерфейс между ними и логику процедуры вывода. А методы глобальной модели ТКС на основе СЕ определяют ее поведение в целом (механизмы логического вывода, контроль и поддержание требуемых значений надежности и оперативности, которые определяются состоянием ТКС на основе СЕ, интерфейс с СУ и ее подсистемами, обеспечение ввода/вывода информации, контроль целостности и адекватности модели реальному объекту управления. Методы модели, по сути являясь хранилищем основных процедурных знаний о СЕ, осуществляют реализацию алгоритмов функционирования модели (обработка, хранение данных, обращения к хранилищу и т. д.) [10].

На рис. 2 представлена обобщенная структура объекта предметной области на примере устрой-

ства платформы агрегации доступа SE — ETX-5300A, являющегося узлом ТКС на основе SE. Показанные методы, атрибуты и другие компоненты множеств объекта являются условными и не ограничивают перспективное построение данной структуры на более высоких уровнях детализации информационной модели СУ ТКС на основе технологии Carrier Ethernet.

Заключение

На сегодняшний день наблюдается рост разнообразия оборудования и технологий, позволяющих предоставлять телекоммуникационные услуги в соответствии с требуемыми показателями оперативности, надежности, целостности и др. Вместе с тем требования к системам управления для осуществления таких показателей также трансформируются и зачастую не в состоянии эффективно решать задачи управления по причине высокого объема данных, характеризующих состояние ТКС. Все это приводит, например, к использованию сторонних подсистем, выполняющих узкий круг процедур, что нагружает административный центр управления и экономически неэффективно. Глобально решить такую проблему возможно на этапе проектирования при формировании требований и разработке общей структуры перспективной СУ. Функционирование отдельных подсистем внутри СУ должно строго соответствовать ресурсным возможностям входящей в нее базы данных. В работе выбран объектно-ориентированный подход к построению структуры БД. Предложена уровневая архитектура БД с адаптацией под концептуальную модель СУ ТКС, где используется многоагентный способ управления распределенными объектами с включением серии имитационных моделей функционирования ТКС, что значительно нагружает ресурсы хранилища как по части сбора и хранения, так и по частоте обращений, реализации миграции, вложения и вытеснения данных о состоянии сетевых устройств. Определены услов-

ные границы и области взаимодействия компонентов модели предметной области ТКС (БД), а также установлены структуры и классификации данных ТКС. А математически представленные структуры и классы данных ТКС позволят перейти к следующему этапу исследования — добавление в информационную модель процессов и операций, регламентированных в СУ, что в перспективе на этапе эксплуатации позволит масштабировать и наполнять модель реальными значениями параметров, описывающих состояние ТКС, а значит, давать оценку оперативности и надежности с учетом ограничений и допущений по множеству параметров и состояний элементов ТКС.

Библиографический список

1. Логин Э. В. Перспективная телекоммуникационная сеть следующего поколения на основе технологии Carrier Ethernet / Э. В. Логин, А. К. Канаев // Бюллетень результатов научных исследований. — 2014. — Вып. 4(13) — С. 69–76.
2. Гавриленко Т. В. Представление знаний о динамической предметной области методами теоретико-множественного анализа: дис. ... канд. техн. наук / Т. В. Гавриленко. — 2004.
3. Логин Э. В. Формирование требований к системе управления сетью связи на основе технологии Carrier Ethernet / Э. В. Логин, А. К. Канаев // Труды 72-й межвузовской научно-технической конференции СПбНТОРЭС им. А. С. Попова, посвященной Дню радио: сборник трудов Секция: «Телекоммуникации на железнодорожном транспорте» (труды конференции 27–29.04.2017). — СПб.: 2017. — С. 241–243.
4. Логин Э. В. Анализ и классификация существующих систем управления телекоммуникационными сетями / Э. В. Логин // Труды 69-й Международной научно-технической конференции, посв. Дню радио. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. — С. 229–230.
5. Корнеев В. В. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации / В. В. Корнеев, А. Ф. Гареев, С. В. Васютин, В. В. Райх. — М.: Нолидж, 2000. — 352 с.

6. Буч Г. Объектно-ориентированное проектирование с примерами применения: пер. с англ. / Г. Буч — М.: Конкорд, 1992. — 519 с.

7. Гавриленко Т. В. Формализованная объектно-ориентированная модель знаний предметной области / Т. В. Гавриленко, Ф. Ф. Иванов // Системный анализ и обработка информации в интеллектуальных системах: сб. науч. тр. каф. ИВТ. № 2 / Под общ. ред. Ф. Ф. Иванова; Сургут, гос. ун-т. — Сургут: Изд-во СурГУ, 2003. — С. 79–83.

8. Вениаминов Е. М. Алгебраические методы теории баз данных и баз знаний / Е. М. Вениаминов. — М.: Научный мир, 2003. — 184 с.

9. Логин Э. В. Технология Carrier Ethernet для построения транспортных сетей / Э. В. Логин, А. К. Канаев // Сборник научных статей IV Международной конференции СПбГУТ «Актуальные проблемы инфотелекомму-

никаций в науке и образовании», 3–4 марта 2015. — Т. 2. — С. 1065–1069. — URL: www.sut.ru/doci/nauka/4.apino.2015.sut.2.pdf.

10. Древе Ю. Г. Моделирование систем: учеб. пособие / Ю. Г. Древе. — Сургут: СурГУ, 2001. — 71 с.

Дата поступления: 23.05.2022

Решение о публикации: 11.07.2022

Контактная информация:

КАНАЕВ Андрей Константинович — д-р техн. наук, проф. кафедры «Электрическая связь»; kanaev@pgups.ru

ЛОГИН Элина Валерьевна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Электрическая связь»; elinabeneta@yandex.ru
ПУДОВКИНА Ксения — студент группы АС-908, кафедра «Электрическая связь»; serde4ko01@bk.ru

Informational Model of Promising Database in the System of Management for Carrier Ethernet Telecommunication Network

A. K. Kanaev, E. V. Login, K. A. Pudovkina

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

For citation: Kanaev A. K., Login E. V., Pudovkina K. A. Informational Model of Promising Database in the System of Management for Carrier Ethernet Telecommunication Network // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 421–431. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-421-431

Summary

Purpose: To develop an informational model of a promising database in the system of management of telecommunication network which uses Carrier Ethernet technology for to ensure the efficiency of storage, access and update of data on the telecommunication network functioning that will allow to increase the operativeness of implementation of OAM (Operation, Administration and Management) control-management built-in processes at timely and reasonable decision-making on telecommunication network management in conditions of high dynamics of changes in the network state as well as in view of Carrier Ethernet technology specificities. Thus, in order to provide services of given quality, an information model of database in telecommunication network management system has been created with indication of information main sources which're represented by subsystems and models of telecommunications network management system in accordance with the previously developed three-level conceptual model. Also, to achieve the stated goal a logical structure of the obtained database information model on the example of domain objects has been developed. **Methods:** Fundamentals of complex process management theory; theory of multi-agent systems of

management of distributed object; theory of systems of information storage and presentation; object-oriented projection method; set-theoretic approach for the description of data set about a control object. **Results:** The obtained informational model of database and the developed logical three-level structure of functioning are described verbally and mathematically. The evaluation of functioning of the proposed logical structure of the database in the system of telecommunication network management using Carrier Ethernet technology and OAM mechanisms is given. The directions of further research towards development of the models of major processes of collection, processing and provision of data on functioning of subsystems in the system of telecommunications network management are proposed. **Practical significance:** The developed informational model of database in the system of telecommunications network management differs from well-known ones by the possibility of accounting for and including in the data of the implementation of the complex of unique models of functioning and management of Carrier Ethernet telecommunication network and the mechanisms of OAM management, that were previously obtained by the authors and represent subsystems in the telecommunications network management system with the use of Carrier Ethernet technology possibilities. At the same, the obtained in the work information model of database will allow to meet requirements on operativeness of management cycle realization and to minimize financial and technical resources for the model implementation through effective storage, access and update of data on network element functioning and in the future, effective storage of data on the state of network elements and entire network with the application of prognosis and decision-making intellectual support tools will allow to make scenarios on effective management of telecommunications network.

Keywords: Telecommunication network, control system, object-oriented database, knowledge base, intelligent system.

References

1. Login E. V., Kanaev A. K. Perspektivnaya telekommunikatsionnaya set' sleduyushchego pokoleniya na osnove tekhnologii Carrier Ethernet [Prospective telecommunication network of the next generation based on Carrier Ethernet technology]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Prospective telecommunication network of the next generation based on Carrier Ethernet technology]. 2014, I. 4 (13), pp. 69–76. (In Russian)
2. Gavrilenko T. V. *Predstavlenie znaniy o dinamicheskoy predmetnoy oblasti metodami teoretiko-mnozhestvennogo analiza. Kand. Diss* [Representation of knowledge about a dynamic subject area by methods of set-theoretic analysis. Cand. Diss]. (In Russian)
3. Login E. V., Kanaev A. K. *Formirovanie trebovaniy k sisteme upravleniya set'yu svyazi na osnove tekhnologii Carrier Ethernet Trudy 72-oy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsiya SPbNTORES im. A.S. Popova, posvyashchennoy Dnyu radio: sbornik trudov Sektsiya: «Telekommunikatsii na zheleznodorozhnom transporte», (trudy konferentsii 27-29.04.2017)* [Formation of requirements for a communication network management system based on Carrier Ethernet technology. A.S. Popov, dedicated to the Day of Radio: collection of works Section: "Telecommunications on railway transport", (conference proceedings 27-29.04.2017)]. St. Petersburg: 2017, pp. 241–243. (In Russian)
4. Login E. V. *Analiz i klassifikatsiya sushchestvuyushchikh sistem upravleniya telekommunikatsionnymi set'yami Trudy 69-oy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posv. Dnyu radio* [Analysis and classification of existing control systems for telecommunication networks Proceedings of the 69th International Scientific and Technical Conference, dedicated to. Radio Day]. St. Petersburg: SPbGETU «LETI» Publ., 2014, pp. 229–230. (In Russian)
5. Korneev V. V., Gareev A. F., Vasyutin S. V., Raykh V. V. *Bazy dannykh. Intellektual'naya obrabotka informatsii* [Databases. Intelligent information processing]. Moscow: «Nolidzh» Publ., 2000. 352 p. (In Russian)
6. Buch G. *Ob'ektno-orientirovannoe proektirovanie s primerami primeneniya* [Object-oriented design with examples of application]. Moscow: Konkord Publ., 1992. 519 p. (In Russian)

7. Gavrilenko T. V., Ivanov F. F. Formalizovannaya ob"ektno-orientirovannaya model' znaniy predmetnoy oblasti [Formalized object-oriented model of domain knowledge]. *Sistemnyy analiz i obrabotka informatsii v intellektual'nykh sistemakh* [System analysis and information processing in intelligent systems]. Surgut: SurGU Publ., 2003, pp. 79–83. (In Russian)
8. Veniaminov E. M. *Algebraicheskie metody teorii baz dannykh i baz znaniy* [Algebraic methods of the theory of databases and knowledge bases]. Moscow: Nauchnyy mir Publ., 2003, 184 p. (In Russian)
9. Login E. V., Kanaev A. K. *Tekhnologiya Carrier Ethernet dlya postroeniya transportnykh setey* *Sbornik nauchnykh statey IV mezhdunarodnoy konferentsii SPbGUT «Aktual'nye problemy infotelekkommunikatsiy v nauke i obrazovanii» 3–4 marta 2015* [Carrier Ethernet technology for building transport networks Collection of scientific articles of the IV international conference of St. Petersburg State University of Technology "Actual problems of infotelecommunications in science and education" March 3-4, 2015]. 2015, vol. 2, pp. 1065–1069. Available at: www.sut.ru/doci/nauka/4.apino.2015.sut.2.pdf. (In Russian)
10. Dreve Yu. G. *Modelirovanie system* [Systems Modeling]. Surgut: SurGU Publ., 2001. 71 p. (In Russian)

Received: May 23, 2022

Accepted: July 11, 2022

Author's information:

Andrey K. KANAEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, "Electrical Communication" Department; kanaev@pgups.ru

Elina V. LOGIN — PhD in Engineering, Associate Professor, "Electrical Communication" Department; elinabeneta@yandex.ru

Ksenia A. PUDOVKINA — Student, AS-908 study group, "Electrical Communication" Department; serde4ko01@bk.ru

УДК 528.482

Оперативный геодезический контроль деформаций призабойной зоны при инновационных технологиях проходки туннелей

Д. А. Афонин, В. Н. Кавказский, А. А. Никитчин

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

Для цитирования: Афонин Д. А., Кавказский В. Н., Никитчин А. А. Оперативный геодезический контроль деформаций призабойной зоны при инновационных технологиях проходки туннелей // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 432–443. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-432-443

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос выполнения оперативного контроля деформаций призабойной зоны тоннеля с использованием технологии наземного лазерного сканирования при проходке тоннеля новоавстрийским методом туннелирования, который является наиболее прогрессивным и экономически целесообразным методом строительства подземных сооружений горным способом. Сущность этого метода заключается в том, что в качестве крепи призабойной зоны тоннеля используется самонесущая оболочка из набрызг-бетона без использования традиционных методов крепления, что позволяет существенно экономить время на проходку тоннелей, особенно имеющих сложную геометрию и нестандартные габариты. При этом концептуальной основой данного метода является необходимость оперативного выявления деформаций грунтового массива призабойной зоны, обоснованная необходимостью обеспечения безопасности ведения работ. **Методы:** В качестве основного метода определения геопространственного положения призабойной зоны тоннеля предложено рассмотреть технологию наземного лазерного сканирования. Обработка результатов сканирования выполнена в специализированном программном комплексе Leica Cyclone 3DR. **Результаты:** Рассмотрен существующий опыт геодезического контроля деформаций в туннелировании новоавстрийским методом. Представлены результаты обработки данных наземного лазерного сканирования отдельного фрагмента тоннеля, получена его математическая трехмерная модель, и выполнена оценка отклонений фактической поверхности тоннеля от полученной теоретической поверхности. **Практическая значимость:** Полученная трехмерная модель может быть в дальнейшем использована для геодезического контроля деформаций. Обоснованы теоретические основы оценки требуемой точности определения деформационных характеристик, которые базируются на переходе от строительных допусков к средним квадратическим погрешностям определения деформационных характеристик и затем к средним квадратическим погрешностям координат точек лазерного сканирования. Определены укрупненные этапы сканирования с учетом технологии проходки тоннелей новоавстрийским методом.

Ключевые слова: Новоавстрийский метод туннелирования, геодезический контроль деформаций, призабойная зона тоннеля, наземное лазерное сканирование, трехмерная модель.

Введение

Новоавстрийский метод туннелирования (NATM) сегодня является одним из ведущих направлений туннелестроения, так как имеет ряд существенных технических и экономических преимуществ по сравнению с другими традиционными методами проходки тоннелей, а именно: возможность возводить подземные сооружения любой формы и размеров поперечного сечения в сложных инженерно-геологических условиях, в том числе и в слабых грунтах; значительное уменьшение стоимости и времени строительства за счет использования самонесущей конструкции обделки, которая выполняется из набрызг-бетона с применением композитных материалов, без установки усиливающих элементов (арок и анкеров).

Первые упоминания о методе NATM относятся к 1964 г. [1]. За последние тридцать лет активного внедрения реализовано более 250 проектов в подземном строительстве как на объектах транспортной инфраструктуры, гидроэнергетики, городских коммуникаций. Гибкость технологии к конкретным инженерно-геологическим и градостроительным условиям позволила реализовывать различные подходы к реализации проектов, что породило значительное количество новых названий [2], таких как напыляемая бетонная обделка (SCL), метод последовательной выемки грунта (SEM), CD-NATM, центральная разделительная стенка NATM, CDM, метод центральной диафрагмы или CRD-NATM, метод Cross Diaphragm и UHVS, метод ADECO RS, который использует технологию нанесения набрызг-бетона, в туннелестроении позиционируется как новый метод и противопоставляется NATM. Подробные определения NATM доступны в литературе и с описанием исторических предпосылок обсуждаются в статье [2]. На территории Российской Федерации NATM/SCL, ADECO RS применялись дважды при реализации транспортных объектов: первый объект — четырехполосный

двухсекционный автодорожный тоннель протяженностью 1,25 км через р. Уфу, второй объект на участке, начинающемся от 172 км федеральной дороги М-27 «Джубга».

К настоящему времени сформировалась концепция использования метода NATM с набором ряда принципов [3], в основе которых лежит идея управления горным давлением посредством изучения поведения горных пород под нагрузкой и их мониторинга во время всего технологического процесса подземного строительства. Другими словами, метод NATM — это не только набор из конкретных операций и вспомогательных технологий, обеспечивающих оптимальную поддержку выработки, а сложный процесс, основанный на изучении начального поля напряжений в конкретных геологических условиях и на наблюдениях конвергенции (сближение контура горной выработки) и дивергенции (линейные деформации лба забоя). В такой идеологии одним из главных принципов является контроль деформаций грунтового массива как в горной выработке, так и на земной поверхности, и выполняемый как геодезическими методами, так и на основе использования геотехнических датчиков (тензометры, инклинометры). Развитие этот принцип получил после обрушения в тоннеле аэропорта Хитроу в 1994 г., в настоящее время метод NATM в соответствии с жесткими правилами охраны труда и безопасности не допускает присутствия людей в забое, все работы, в том числе и мониторинг деформаций, выполняются удаленно (на расстоянии) за счет автоматизации процессов [4].

В данной статье рассматривается оперативный геодезический контроль деформаций призабойной зоны тоннеля, сооружаемого методом NATM. Оперативность контроля деформаций означает, что выполнение измерений, их математическая обработка с определением деформационных характеристик и анализ деформаций грунтового массива должны осуществляться

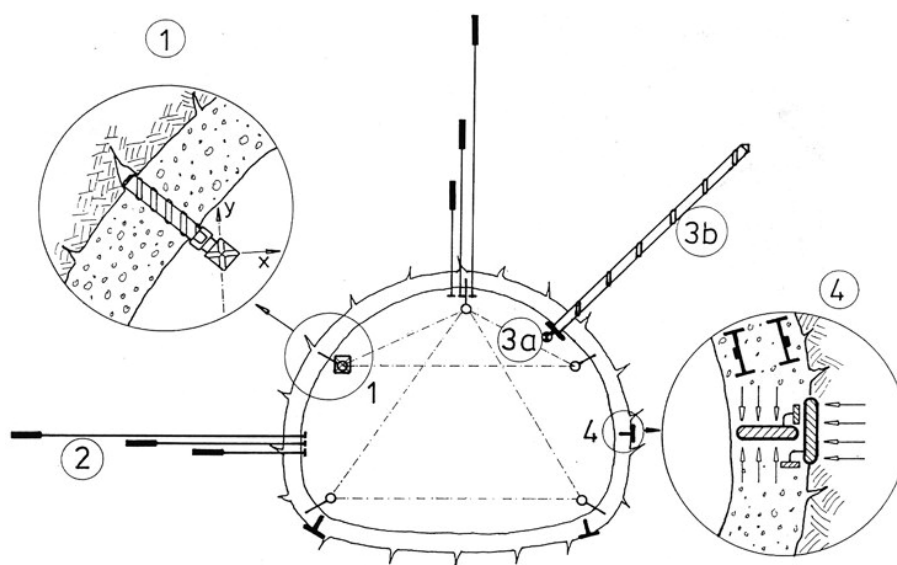


Рис. 1. Пример тоннелеизмерительного оборудования NATM:
1 — геодезическая марка, 2 — тензомер, 3 — полная анкерная сила,
4 — динамометрические датчики

непосредственно на станции наблюдений — идея немедленного получения результатов наблюдений для повышения безопасности строительства. В настоящее время такой подход реализуется в мировой практике. Так, в 2004 г. компаниями BeMo Tunnelling и Morgan Sindall была разработана система Tunnel Beamer™, которая представляет собой систему управления и съемки в режиме реального времени с оперативным получением информации о деформациях и их визуализацией [5].

Методы исследования

Выполнив анализ материалов, посвященных методу NATM и системе Tunnel Beamer™ [6–12], авторы пришли к выводу, что геометрия забоя тоннеля геодезическими методами контролируется электронными тахеометрами точно по специальным закрепленным целям (рис. 1, 2) или в безотражательном режиме. Расстояние между контрольными измерительными профилями может варьироваться от 3 до 50 м и зависит от геотехнических условий строительства [11].



Рис. 2. Геодезическая марка, закрепленная в набрызг-бетоне

В каждом цикле измерений определяются трехмерные координаты контрольных точек сечения (рис. 3). Данные геодезических измерений передаются на компьютер, который содержит информацию о проектной 3D-геометрии тоннеля и результаты предыдущего цикла измерений, тут же определяются горизонтальные и вертикаль-

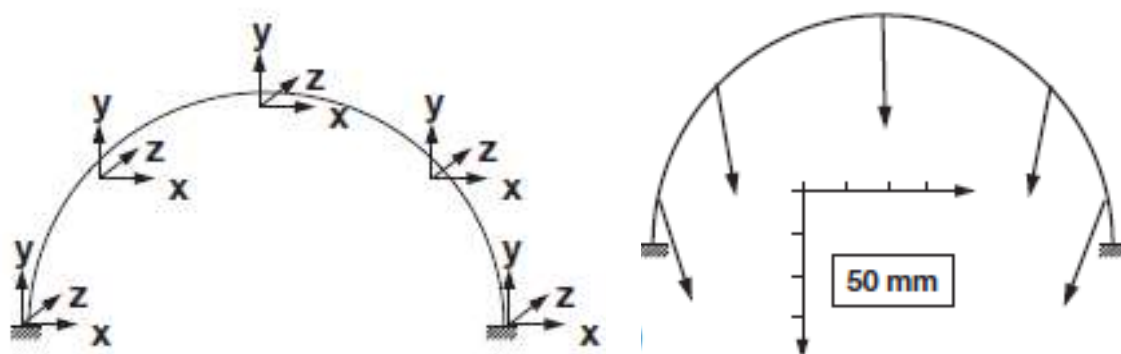


Рис. 3. Пространственные координаты контрольных точек (слева), вектора смещения (справа)

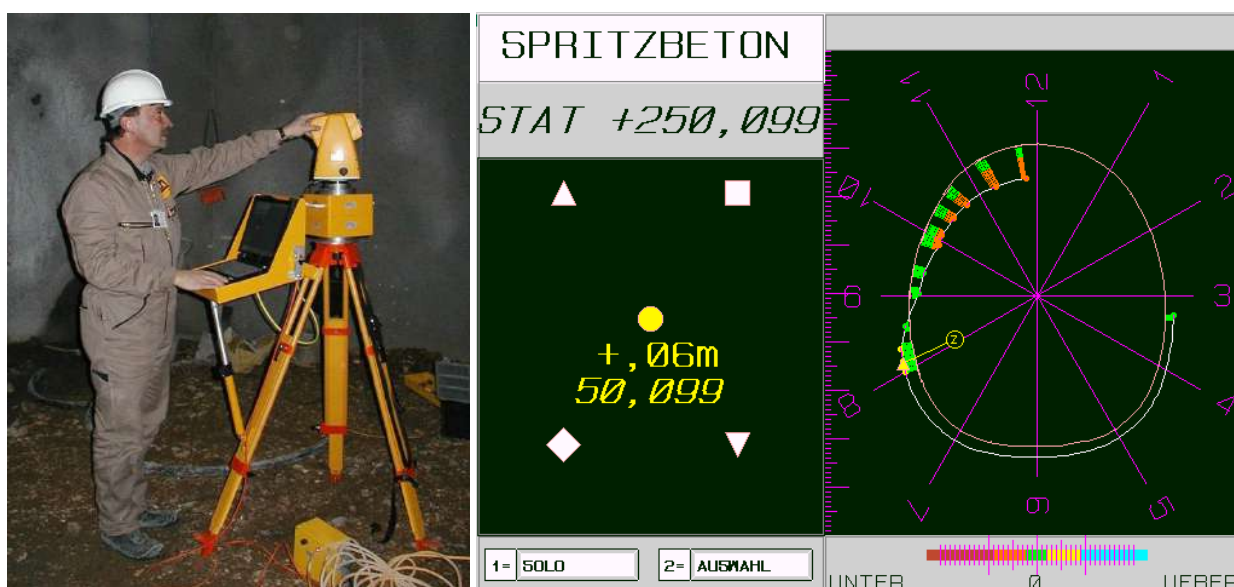


Рис. 4. Система Tunnel Beamer

ные смещения контрольных точек тоннеля [12]. Сравнение теоретического и фактического положения забоя тоннеля визуализируется на компьютере (рис. 4).

Прорывным направлением стало использование технологии NATM в исторических центрах больших городов. Например, развитие технологий строительства тоннелей, особенно тоннелей метро, сталкивается со сложными задачами, требующими оперативного применения решений по сохранности памятников всемирного наследия, жесткими требованиями контроля за осадками дневной поверхности, сжатыми сроками строительства в условиях жесткой бюджетной поли-

тики и конкуренции. Например, теоретические исследования по обоснованию целесообразности применения новых технологий при сооружении односводчатой станции из монолитного железобетона в условиях Санкт-Петербурга показали, что напряженно-деформированное состояние сегодняшние методы расчета позволяют с достаточной точностью спрогнозировать конструктивные технологические параметры (рис. 5). Однако теоретические исследования не позволяют учесть все производственные нюансы и геологические особенности, и в этом случае целесообразно использовать методы оперативного контроля в процессе строительства.

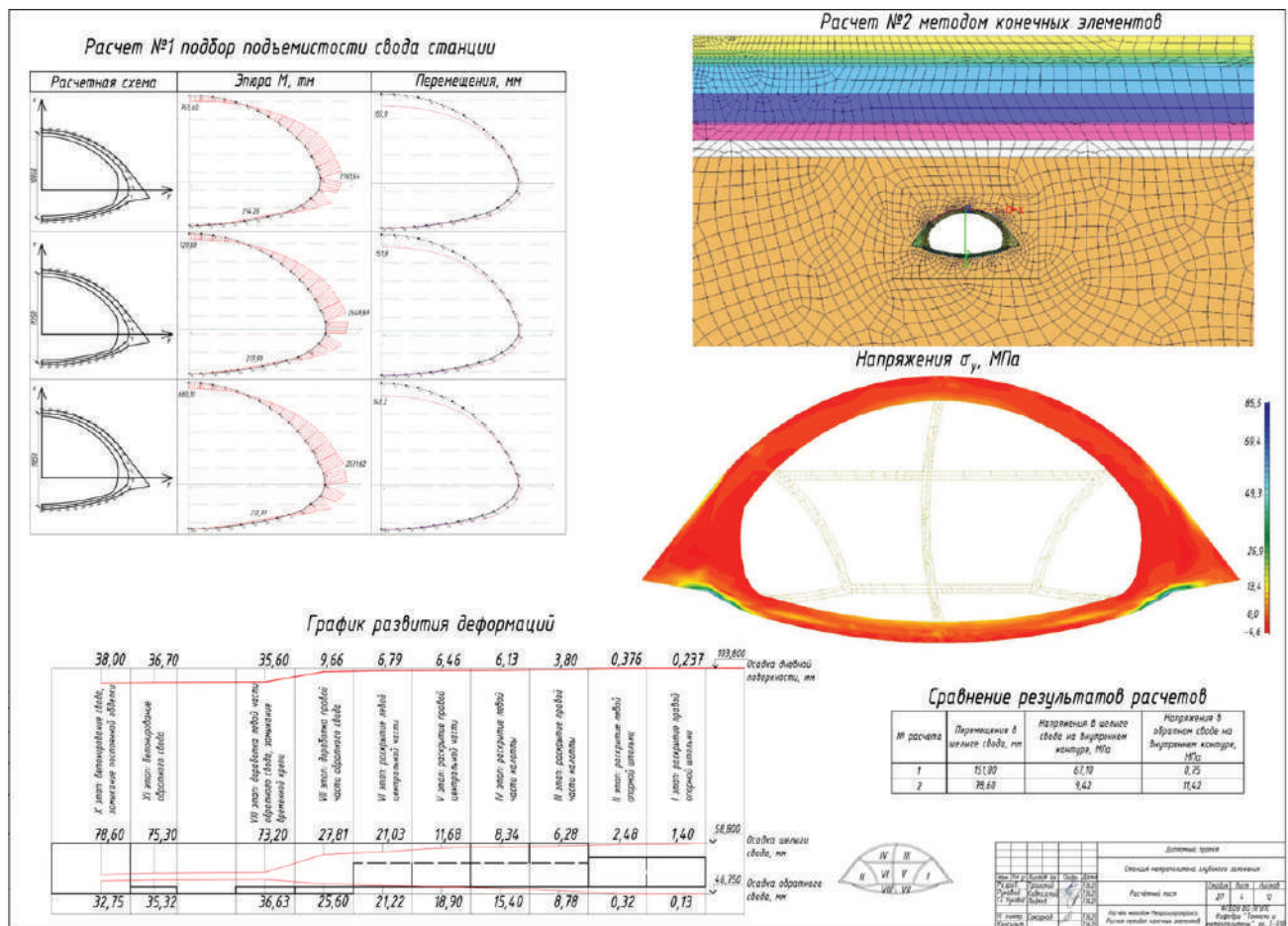


Рис. 5. Результаты теоретических исследований односводчатой станции из монолитного железобетона

В последние годы в практику ведения деформационного контроля различных инженерных сооружений широко внедряется технология наземного лазерного сканирования (НЛС). Поэтому предлагается рассмотреть данный концептуальный подход оперативного контроля при забойной зоны тоннеля, сооружаемого методом NATM, на основе технологии наземного лазерного сканирования (НЛС). Преимущество НЛС будет заключаться в том, что анализ деформаций можно будет выполнять не по дискретным данным, а с использованием трехмерной модели забоя тоннеля. Сегодня НЛС широко используется в инженерно-геодезическом производстве

[13–15], в том числе и для определения деформаций тоннеля [16–18].

Важным критерием выполнения любых геодезических работ являются требования к точности геодезических измерений.

Среди главных факторов, влияющих на точность и качество лазерного сканирования, большинство специалистов выделяют следующие основные факторы: точность прибора (калибровка); условия сканирования (атмосферные факторы); свойства объекта сканирования (отражательная способность); геометрия сканирования; расположение опорных точек; предварительная обработка материалов сканирования.

Координаты точек объекта в системе координат НЛС вычисляются по известным формулам:

$$\left. \begin{aligned} |X &= S \cos \varphi \sin z \\ |X &= S \sin \varphi \sin z \\ |Z &= S \cos z \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где S — измеренная дальность;

φ — горизонтальный угол измеренного направления;

z — вертикальный угол измеренного направления.

Следовательно, средние квадратические погрешности (СКП) определения координат точек сканирования зависят не только от линейно-угловой точности сканера, но и измеряемого расстояния.

Также точность измерения расстояний лазерным сканером зависит от угла падения лазерного луча на объект, чем ближе угол падения к предельному значению, тем грубее измерения.

Обоснование точности определения деформаций должно базироваться на переходе от допустимых величин деформаций (требования строительных норм) к СКП измерения данных деформаций, с учетом обеспечения несоизмеримости величины деформации с ошибками ее определения. В данном случае исходная точность может быть определена исходя из решения двух задач деформационных измерений, возникающих в практике: выявления аварийной ситуации, когда деформация может достигнуть заданной предельной величины, и последовательного во времени описания самого процесса протекания деформации.

При обосновании требуемой точности определения деформаций с точки зрения выявления аварийной ситуации целесообразно потребовать, чтобы средняя квадратическая погрешность (СКП) определения предельной величины деформации не превосходила:

$$m_{\Phi} \leq \frac{\Phi_{\text{пр}}}{2t}, \quad (2)$$

где $\Phi_{\text{пр}}$ — предельная величина деформации,
 t — нормированный множитель, принимаемый обычно 2, 2,5 или 3.

Горизонтальное смещение отдельной точки сканирования можно выразить следующим образом:

$$m_{\Phi}^2 = m_{x,y,z(0)}^2 + m_{x,y,z(i)}^2, \quad (3)$$

где $m_{x,y,z(0)}$ и $m_{x,y,z(i)}$ — СКП определения положения точки сканирования соответственно в начальном (0) и любом другом (i) цикле измерений.

При сохранении идентичности схемы измерений СКП определения положения точек сканирования в двух циклах можно считать одинаковыми, тогда:

$$m_{x,y,z} = \frac{m_{\Phi}}{\sqrt{2}}. \quad (4)$$

Предельная величина деформаций рассчитывается на основе геотехнического прогноза деформаций. Так, максимальное расчетное значение деформации свода тоннеля при строительстве терминала 5 Лондонского аэропорта *Heathrow* составило 35 мм [7]. Тогда $m_{\Phi} \approx 9$ мм, а $m_{x,y,z} \approx 6$ мм.

Измерения со СКП, определенной по предельной величине деформации, позволяют зафиксировать лишь факт превышения деформации предельного значения. В этом случае суждение о критической величине деформации может оказаться запоздалым. Поэтому во втором случае при назначении точности измерений исходят из величины скорости деформаций V_{Φ} :

$$m_{V_{\Phi}} \leq \frac{V_{\Phi}}{2t}, \quad (5)$$

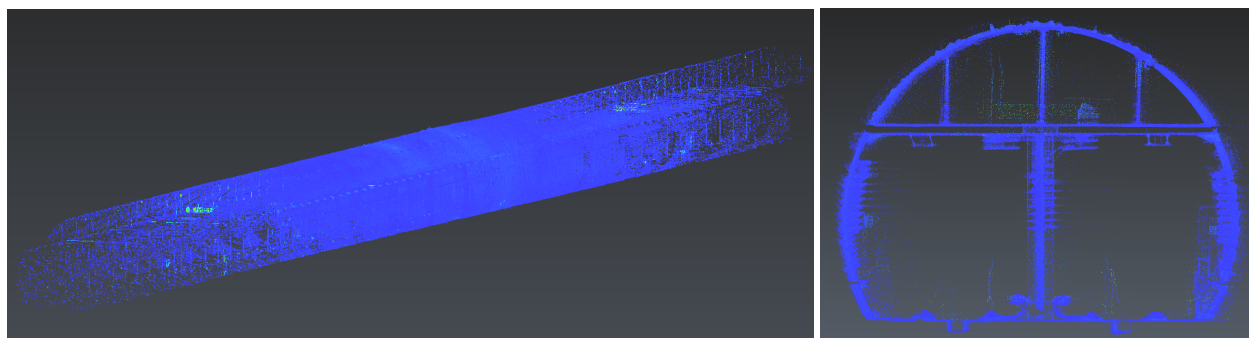


Рис. 6. Результаты лазерного сканирования тоннеля (облако точек)

где V_{ϕ} — скорость деформации, которая устанавливается в ходе геотехнического прогноза деформаций.

В случае геодезического контроля деформаций призабойной зоны тоннеля, сооружаемого методом NATM, и учитывая повышенные требования к безопасности работ на всем протяжении строительства, при обосновании СКП определения деформаций следует исходить именно из ожидаемой величины скорости деформаций. Такой контроль называют еще активным контролем.

С учетом технологии проходки тоннеля методом NATM можно выделить следующие укрупненные этапы выполнения НЛС:

- сканирование поверхности выработки (обнаженного породного контура);
- сканирование начального слоя набрызг-бетона толщиной 75 мм;
- сканирование структурного слоя набрызг-бетона толщиной 200–250 мм;
- сканирование финишного слоя набрызг-бетона толщиной 50 мм.

Такая схема сканирования позволит оценить объемы выемки грунта, минимальные толщины всех слоев набрызг-бетона и получить окончательный профиль тоннеля.

Активный контроль деформаций набрызг-бетона проводят в раннем возрасте увеличения прочности бетона — в течение 1 часа, через 3 часа и 6 часов после завершения распыления.

Если в случае с дискретными геодезическими измерениями результатом представления фактической геометрии тоннеля является профили (рис. 4), то результатом сканирования будет являться поверхность. Это позволит обнаруживать деформации на всей поверхности объекта.

Результаты

На рис. 6–9 представлены результаты обработки данных сканирования тоннеля цилиндрического сечения, которое мы выполнили в программе Leica Cyclone 3DR. На рис. 6 показано объединенное облако точек некоторого множества сканерных станций. Регистрация разных позиций сканирования в единую систему координат осуществлена по известным координатам опорных точек, которые закреплены черно-белыми мишенями. С каждой станции сканирования видно не менее трех опорных точек.

Как видно, данные сканирования содержат большое количество шумов, отсканированные препятствия (кабельные линии, болтовые соединения, техническая оснастка тоннелей и др.) подлежат исключению из облака точек. Поэтому на первом этапе обработки выполнили чистку и сегментацию в рамках некоторой ограниченной области (рис. 7). Таким образом, количество точек сократилось с 12 млн точек до 237 тыс. точек.

На следующем этапе по полученному набору облака точек выполнено построение 3D-сетки и



Рис. 7. Результаты чистки и сегментации облака точек (слева направо)

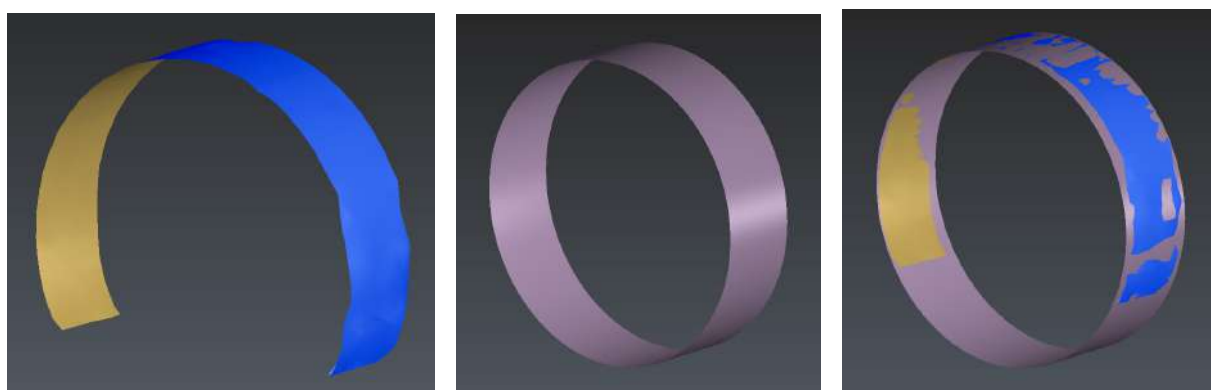


Рис. 8. Результаты моделирования наилучшего цилиндра (слева 3D-сетка, в центре — лучший цилиндр, справа — результаты их совмещения)

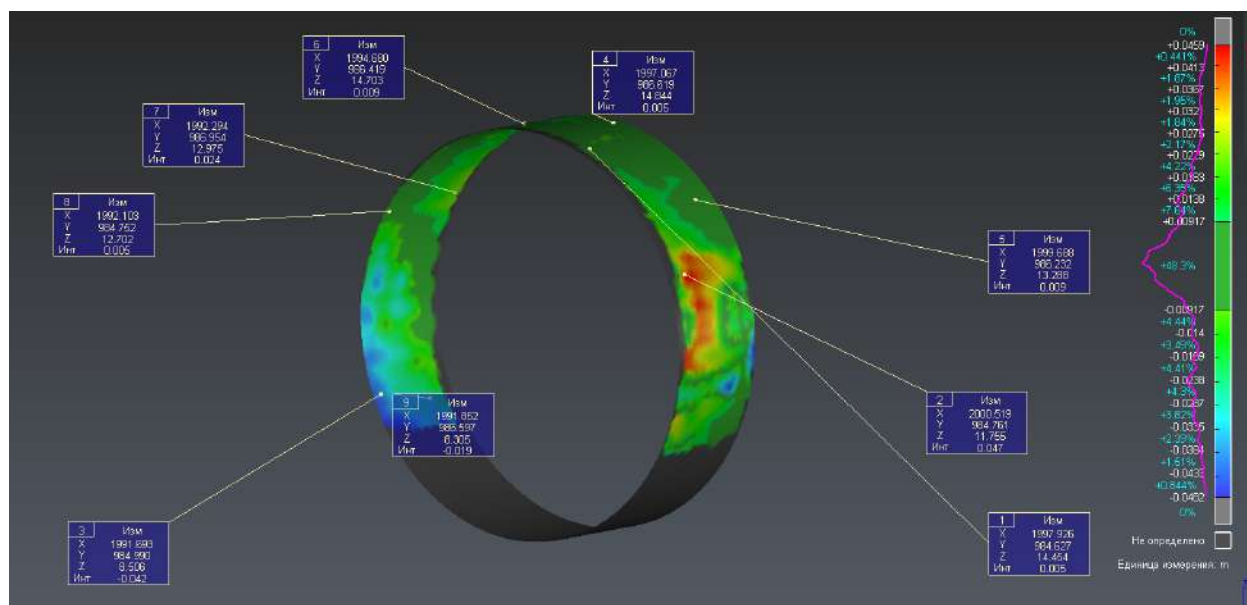


Рис. 9. Сравнение фактической поверхности и лучшего цилиндра

моделирование наилучшего цилиндра переменного диаметра (рис. 8). Эта задача решается итерационным способом. В рамках каждого приближения облако точек сравнивается с поверхностью наилучшего цилиндра, определяется статистический значимый диапазон отступа точек облака от поверхности цилиндра и точки, выходящие за этот диапазон, удаляются из облака. Диаметр лучшего цилиндра, полученного представленным способом, сравнили с теоретическим значением, расхождение составило первые мм.

Анализ результатов

На заключительном этапе выполнен анализ отклонений фактической поверхности от лучшего цилиндра (рис. 9).

В статьях [16, 18, 19] также представлены алгоритмы и результаты обработки облака точек лазерного сканирования тоннеля для получения геометрии его поперечного профиля. При этом на рис. 8 видно, что отклонения точек облака от поверхности цилиндра в некоторых частях составляет около ± 4 см, а отклонения большинства точек лежат в диапазоне ± 1 см. Значит, возможно выполнить следующий итерационный шаг, наилучший цилиндр строится уже по уточненному облаку точек и так далее, пока отступы точек облака от поверхности цилиндра не будут меньше предельной погрешности определения их положения, см. формулы (2) — (5).

Заключение

Таким образом, данные НЛС эффективны для полного анализа фактического пространственного положения области забоя и его изменения во времени. Традиционно исследования деформаций основаны на данных смещения, полученных с использованием обычных геодезических и геотехнических методов. Эти методы, несмотря на это, могут обнаруживать очень тонкие (миллиметровый уровень) смещения; они измеряют смеще-

ния ограниченного количества точек. Напротив, лазерное сканирование лучше всего подходит для измерений по областям, но обеспечивает меньшую точность. НЛС может улучшить понимание поведения горной массы, поскольку она позволяет отображать смещения по площади, а не в определенных точках. Однако применимость и эффективность метода в значительной степени зависит от плотности и качества данных сканирования, используемой техники обработки и индивидуальных характеристик, которые определяют физическое явление в каждом конкретном случае.

В целом современные системы наземного лазерного сканирования достаточно надежны для использования в подземной среде. Лазерное сканирование следует рассматривать не как альтернативу традиционным методам измерений, а как дополнение к хорошо зарекомендовавшим себя методам геодезической инженерии.

Направление будущих исследований в этой области — исследование автоматизации обработки данных НЛС с целью получения результатов сканирования и их анализа сразу в процессе работ.

Библиографический список

1. URL: https://www.academia.edu/9427931/B_Year_Innovation_Project_Illustration.
2. Karakus M. FEM analysis for the effects of the natm construction technique on settlement above shallow soft ground tunnels / M. Karakus, R. J. Fowell. — https://www.researchgate.net/publication/258113737_FEM_analysis_for_the_effects_of_the_NATM_construction_technique_on_settlement_above_shallow_soft_ground_tunnels.
3. Karakus M. An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM) / M. Karakus, R. J. Fowell // The 7th Regional Rock Mechanics Symposium, Sivas. — Vol.: Sivas, Turkey.
4. Chapman D. N. Introduction to tunnel construction / D. N. Chapman, N. Metje, A. Stärk. — DOI:10.1201/9781315273495.
5. URL: <https://cecl.global/project/tunnelbeamer/>.

6. URL: <http://dSPACE.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/33268/21-Kozerema.pdf?sequence=1>.
7. URL: <https://www.ita-aites.cz/files/tunel/2005/4/tunel-0504-4.pdf>.
8. Trigger Values for tunnel monitoring in SCL shallow tunnels. — URL: <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=58e2cacdc3ec7&location=browse>.
9. The Laser-Distometer: a newer, better way to measure tunnel deformations. — URL: <https://cgs.ca/pdf/GeoTechNews/2014/GIN%203201.pdf>.
10. Hilar M. Evaluation of innovative sprayed-concrete-lined tunneling / M. Hilar, A. Thomas, Y. S. Hsu, B. Jones // ICE Proceedings Geotechnical Engineering. — № 161(3). — Pp. 137–149. — DOI: 10.1680/geng.2008.161.3.137.
11. NATM / SEM From Design to Construction. — URL: <https://tunnelingshortcourse.com/2016-presentations/gall-natm-design-construction.pdf>.
12. Health and safety, and risk management in tunneling. — URL: <http://faculty.tafreshu.ac.ir/file/download/course/1583686541-introduction-to-tunnel-construction-part-3-of-3.pdf>.
13. Kanashin N. V. Application of laser scanning technology in geotechnical works on reconstruction of draw spans of the Palace Bridge in Saint Petersburg / N. V. Kanashin, A. A. Nikitchin, E. S. Svintsov // Procedia Engineering. — 2017. № 189. — Pp. 393–397. — DOI:10.1016/j.pro-eng.2017.05.062.
14. Bogomolova N. Laser scanning application possibilities in the engineering structures survey / N. Bogomolova, A. Nikitchin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — № 698(4). — DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044011.
15. Romanovich M. Using the laser scanning method in the reconstruction of metro stations / M. Romanovich, M. Kuzmenkova, V. Breskich, K. Kulakov // Transportation Research Procedia. — 2021. — № 54. Pp. 819–826. — DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.135.
16. Nuttens T. Ovalisation measurements of newly built concrete tunnels by means of terrestrial laser scanning / T. Nuttens, A. De Wulf, C. Stal et al. // Conference Paper. June 2011. — DOI: 10.5593/sgem2011/s07.112.
17. Nuttens T. High Resolution Terrestrial Laser Scanning for Tunnel Deformation Measurements / T. Nuttens, A. De Wulf, L. Bral // Conference: FIG Congress 2010 — Facing the Challenges-Building the Capacity. Sydney, Australia.
18. Gikas V. Three-Dimensional Laser Scanning for Geometry Documentation and Construction Management of Highway Tunnels during Excavation / V. Gikas // Sensors. — 2012. — № 12. — Pp. 11249–11270. — DOI:10.3390/s120811249.
19. Arastounia M. Automated As-Built Model Generation of Subway Tunnels from Mobile LiDAR Data / M. Arastounia // Sensors. — № 16(9). P. 1486. — DOI: 10.3390/s16091486.

Дата поступления: 20.05.2022

Решение о публикации: 01.08.2022

Контактная информация:

АФОНИН Дмитрий Андреевич — канд. техн. наук,
доц.; afonin83@yandex.ru

КАВКАЗСКИЙ Владимир Николаевич — канд. техн.
наук, доц.; kavkazskiy_vn@mail.ru

НИКИТЧИН Андрей Андреевич — канд. техн. наук,
доц.; anikitchin@gmail.com

Operational Geodetic Check of Bottom-Hole Zone Deformations at Innovative Tunneling Technologies

D. A. Afonin, V. N. Kavkazskiy, A. A. Nikitchin

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

For citation: Afonin D. A., Kavkazskiy V. N., Nikitchin A. A. Operational Geodetic Check of Bottom-Hole Zone Deformations at Innovative Tunneling Technologies // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 432–443. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-432-443

Summary

Purpose: To consider the issue on performance of operational control of deformations of tunnel bottomhole zone with the use of ground-based laser scanning technology when tunneling with New Austrian tunneling method which is the most progressive one and feasible in economics terms for underground building construction by mining. The essence of this method is in that as a support for tunnel bottom-hole zone, a self-supporting shell made of sprayed concrete without traditional fastening method usage is applied that allows to save time for tunneling significantly, especially of those tunnels which have complex geometry and non-standard dimensions. At the same, the conceptual basis for this method is the necessity to identify operatively bottom-hole zone soil mass deformations that's justified by the need to provide job realization safety. **Methods:** As a major method for to determine tunnel bottomhole zone geospatial position it is proposed to consider ground-based laser scanning technology. Scanning result processing was implemented in specialized software package Leica Cyclone 3DR. **Results:** Existing experience of geodetic check of deformations in tunneling by New Austrian method is considered. Processing results for data on ground laser scanning of a tunnel separate fragment are presented, a tunnel mathematical three-dimensional model is obtained and assessment of deviations of tunnel actual surface from obtained theoretical one is fulfilled. **Practical significance:** The obtained three-dimensional model can be further used for geodetic monitoring of deformations. Theoretical bases for estimation required accuracy for deformation characteristics definition are substantiated which are based on the transition from construction tolerances to average quadratic errors of deformation characteristics definition and then to average quadratic errors of coordinates for laser scanning points. The enlarged stages of scanning are defined with view of tunneling technology of New Austrian method.

Keywords: New Austrian tunneling method, geodesic deformation check, tunnel bottomhole zone, ground-based laser scanning, three-dimensional model.

References

1. Available at: https://www.academia.edu/9427931/B_Year_Innovation_Project_Illustration
2. Karakus M., Fowell R. J. FEM analysis for the effects of the natm construction technique on settlement above shallow soft ground tunnels. Available at: https://www.researchgate.net/publication/258113737_FEM_analysis_for_the_effects_of_the_NATM_construction_technique_on_settlement_above_shallow_soft_ground_tunnels.
3. Karakus M., Fowell R. J. An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM). The 7th Regional Rock Mechanics Symposium, Sivas. Vol.: Sivas, Turkey.
4. Chapman D. N., Metje N., Stärk A. Introduction to tunnel construction. DOI: 10.1201/9781315273495
5. Available at: <https://cecl.global/project/tunnelbeamer/>
6. Available at: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/33268/21-Kozerema.pdf?sequence=1>

7. Available at: <https://www.ita-aites.cz/files/tunel/2005/4/tunel-0504-4.pdf>
8. Trigger Values for tunnel monitoring in SCL shallow tunnels. Available at: <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=58e2cacdc3ec7&location=browse>.
9. The Laser-Distometer: a newer, better way to measure tunnel deformations. Available at: <https://cgs.ca/pdf/GeoTechNews/2014/GIN%203201.pdf>
10. Hilar M., Thomas A., Hsu Y. S., Jones B. Evaluation of innovative sprayed-concrete-lined tunneling. ICE Proceedings Geotechnical Engineering. I. 161(3), pp. 137–149. DOI: 10.1680/geng.2008.161.3.137.
11. NATM. SEM From Design to Construction. Available at: <https://tunnelingshortcourse.com/2016-presentations/gall-natm-design-construction.pdf>.
12. Health and safety, and risk management in tunneling. Available at: <http://faculty.tafreshu.ac.ir/file/download/course/1583686541-introduction-to-tunnel-construction-part-3-of-3.pdf>.
13. Kanashin N. V., Nikitchin A. A., Svintsov E. S. Application of laser scanning technology in geotechnical works on reconstruction of draw spans of the Palace Bridge in Saint Petersburg. Procedia Engineering. 2017, I. 189, pp. 393–397. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.062.
14. Bogomolova N., Nikitchin A. Laser scanning application possibilities in the engineering structures survey. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, I. 698(4). DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044011.
15. Romanovich M., Kuzmenkova M., Breskich V., Kulakov K. Using the laser scanning method in the reconstruction of metro stations. Transportation Research Procedia. 2021, I. 54, pp. 819–826. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.135.
16. Nuttens T., Wulf A. De, Stal C., et al. Ovalisation measurements of newly built concrete tunnels by means of terrestrial laser scanning. Conference Paper. June 2011. DOI: 10.5593/sgem2011/s07.112.
17. Nuttens T., Wulf A. De, Bral L. High Resolution Terrestrial Laser Scanning for Tunnel Deformation Measurements. Conference: FIG Congress 2010 — Facing the Challenges-Building the Capacity. Sydney, Australia.
18. Gikas V. Three-Dimensional Laser Scanning for Geometry Documentation and Construction Management of Highway Tunnels during Excavation Sensors. 2012, I. 12, pp. 11249–11270. DOI:10.3390/s120811249.
19. Arastounia M. Automated As-Built Model Generation of Subway Tunnels from Mobile LiDAR Data. Sensors. I. 16(9), p. 1486. DOI: 10.3390/s16091486.

Received: May 20, 2022

Accepted: August 01, 2022

Author's information:

Dmitry A. AFONIN — PhD in Engineering, Associate Professor; afonin83@yandex.ru

Vladimir N. KAVKAZSKY — PhD in Engineering, Associate Professor; kavkazskiy_vn@mail.ru

Andrey A. NIKITCHIN — PhD in Engineering, Associate Professor; anikitchin@gmail.com

УДК 691.41

Способы стабилизации и укрепления иольдиевых глин и слабых глинистых грунтов при создании земляного полотна в районах Крайнего Севера

М. Абу-Хасан, В. Я. Соловьева, А. С. Сахарова

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

Для цитирования: Абу-Хасан М., Соловьева В. Я., Сахарова А. С. Способы стабилизации и укрепления иольдиевых глин и слабых глинистых грунтов при создании земляного полотна в районах Крайнего Севера // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 444–454. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-444-454

Аннотация

Цель: Определение наиболее эффективных способов и компонентов для укрепления слабых иольдиевых глин, используемых при создании транспортных магистралей в регионах Севера. **Методы:** Определение основных физико-механических характеристик глинистого грунта проводилось в соответствии с требованиями: ГОСТ 12536—2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава»; ГОСТ 25584—2016 «Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации»; ГОСТ 22733—2016 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности»; ГОСТ 5180—2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик»; ГОСТ 25100—2020 «Грунты. Классификация». Показано, что эффективное укрепление слабого глинистого грунта достигается в результате его предварительной стабилизации при помощи гранулированного доменного шлака или природного известняка фракции $\approx 2,5$ мм. Рациональное количество гранулированного доменного шлака или известняка составляет 15 мас.% от массы грунта, и при этом глинистый грунт имеет наибольшее значение прочности (2,25–2,45) МПа. Разница в показателях прочности в пользу известняка составляет 9,0 %. Экспериментально установлено, что для повышения прочности укрепляемого глинистого грунта эффективно использовать гранулированный доменный шлак в сочетании с тонкомолотым доменным шлаком, рациональное количество которого составляет 10 мас.% от массы грунта, достигаемая прочность которого соответствует маркам М20–М25. Определено, что для комплексного улучшения показателей прочности, плотности, морозостойкости необходимо к глинистому грунту, укрепленному доменным металлургическим шлаком, дополнительно ввести реакционно-активные компоненты, в качестве которых эффективно использовать портландцемент в количестве не более 5 мас.% от массы грунта в сочетании с сухой комплексной химической добавкой «ПРА», рациональное количество которой составляет 2,0 мас.% от массы (ПЦ + ТДШ). **Практическая значимость:** Стабилизированный и комплексно укрепленный слабый глинистый грунт характеризуется следующими фактическими показателями: $M50 F35 K_{10} = 0,026$ м/сут, который может быть использован в качестве основания при строительстве транспортных магистралей местного значения в регионах Севера.

Ключевые слова: Глинистый грунт, стабилизация, укрепление, прочность, коэффициент фильтрации, гранулированный доменный шлак, тонкомолотый шлак, химическая добавка.

Введение

При проектировании и строительстве дорожных конструкций в районах Крайнего Севера необходимо создавать основание и верхнее дорожное покрытие, отличающиеся повышенной прочностью на сжатие и особенно повышенной прочностью на растяжение при изгибе, с целью повышения устойчивости всей дорожной конструкции, которая эксплуатируется в особых условиях.

В рассматриваемой климатической зоне распространены мерзлые грунты, которые содержат лед, имеют отрицательную температуру и находятся в мерзлом состоянии достаточно длительный период, но при этом необходимо учитывать, что в короткий летний период наступает положительная температура $\approx (0-10)^\circ\text{C}$ и происходит сезонное неравномерное оттаивание грунта на глубину от 0,2 до 2 м [1, 2].

При строительстве дорог повышенные требования к дорожному покрытию предъявляются по показателям трещиностойкости, твердости, долговечности (в том числе морозостойкости), соответственно, при подготовке основания дорожного полотна необходимо учитывать эти требования.

На территории зоны многолетней мерзлоты в большинстве регионов распространены глинистые грунты, которые относятся к слабым грунтам. Глина содержит более 30 % мелких частиц, которые связаны между собой, это очень пластичный материал. Для глинистых грунтов характерна пониженная водопроницаемость, поэтому в массиве глинистого грунта содержится повышенное количество воды, из-за присутствия которой грунт такой природы при отрицательных температурах вспучивается, он может сжиматься и разжиматься, вследствие чего снижается несущая способность основания [3, 4].

Глинистый грунт очень хорошо поглощает и удерживает воду, при замерзании эта вода превращается в лед, следовательно, грунт увеличивается в объеме.

Это наиболее распространенный вид деформации — пучение земляного полотна. Наибольшее пучение происходит при дополнительном поступлении воды, перемещающейся в мерзлый грунт из нижележащих талых слоев грунта [5–7].

Учитывая вышесказанное, в районах Крайнего Севера, где строительство земляного полотна ведется при наличии слабых глинистых грунтов, например на основе иольдиевых глин, их использование в качестве основания дорожного полотна возможно только при выполнении мероприятий, которые способны обеспечить устойчивость основания дороги, ускорить его осадку, а также увеличить прочность дорожной конструкции. Для земляного полотна на слабых грунтах должна быть исключена возможность выдавливания слабого грунта из-под насыпи, необходимо обеспечить устойчивость, стабильность основания, его осадка должна завершиться не менее чем на 80 % до возведения дорожного покрытия.

Для устройства дорог в северных регионах в целях исключения затрат на транспортировку материалов целесообразно использовать местные грунты, предварительно подвергнутые укреплению. Под укреплением понимают изменение первоначальных свойств грунта и преобразование их в прочный и морозоустойчивый слой дорожной одежды с необходимыми заданными физико-механическими свойствами [8–11].

Для этого требуется достаточно тщательная подготовка основания с целью повышения его прочности, надежности и повышения плотности, решению задачи такого рода посвящено данное научно-экспериментальное исследование.

Материалы и методы исследования

1. Одной из разновидностей глин, представленных в северных регионах России, являются иольдиевые глины, состоящие из сильноразрушенных частиц гидрослюд и кварца. Иольдиевые глины образовались на месте существую-

щих Балтийского и частично Белого морей, эти глины содержат до 90 % частиц менее 0,005 мм. Иольдиевые глины относятся к слабым грунтам и создают проблему при дорожном строительстве, снижая несущую способность основания дороги. Грунт, содержащий иольдиевую глину, имеет высокие значения природной влажности (часто превышающие предел текучести), слабую водопроницаемость и очень низкие прочностные характеристики.

В качестве материалов, способных стабилизировать грунт, т. е. понизить его влажность, увеличить плотность, что должно способствовать упрочнению связного глинистого грунта, могут служить как природные материалы, такие как известняки определенных фракций, так и техногенные материалы [12].

2. Известняковый и доломитовый щебень или песок — это разновидности горной породы, которые по химическому составу представлены карбонатами кальция и магния с примесями частиц извести, кварца, марганца и железа. Для известняковых и доломитовых материалов характерны следующие показатели:

- плотность в пределах: 2700–2900 кг/м³;
- прочность — соответствует маркам М600–М800, т. е. материал относится к среднепрочным;
- морозостойкость — соответствует марке F150.

Хорошие показатели прочности и морозостойкости известнякового материала являются основанием использовать его для стабилизации слабых глинистых грунтов.

3. Кроме природных материалов, для стабилизации слабых грунтов может быть использован отход металлургического производства — гранулированный доменный шлак.

Металлургический доменный шлак как отход производства в больших количествах образуется на металлургических комбинатах и занимает в виде отвалов большие площади. В металлурги-

ческой промышленности шлак — это многокомпонентный неметаллический расплав, покрывающий поверхность жидкого металла в ходе металлургического процесса плавки.

Использование этого отхода, кроме поставленной задачи, целесообразно как с экологической точки зрения, поскольку металлургический доменный шлак как техногенный отход является источником загрязнения прилегающих территорий, так и с экономической, так как шлак, имеющий в своем составе кальций-магниево-силикатные соединения, обладающие вяжущими свойствами, может при определенных условиях быть заменой дорогостоящих материалов, например портландцемента, используемых в настоящее время для укрепления грунтов.

Гранулированный доменный шлак состоит из тех же оксидов, что и портландцемент. Металлургические доменные шлаки содержат оксиды кальция (30–50 %), магния (1–18 %), кремния (28–38 %), алюминия (8–24 %). В зависимости от соотношения этих оксидов шлаки подразделяются на основные (преобладают оксиды Са и Mg), кислые (с преобладанием Al₂O₃ и SiO₂). Кроме основных оксидов доменные шлаки содержат оксиды железа, марганца.

Крупность шлакового отхода может быть различной, куски достигают значительных размеров, поэтому для дальнейшего использования такие куски подвергают дроблению до размеров щебня фракции (5–20) мм, (20–40) мм или песка фракции (0–2,5) мм. При тонком помоле доменный гранулированный шлак приобретает гидратационную активность и проявляет свойства вяжущего.

4. Для увеличения реакционной способности системы и, соответственно, увеличения плотности и прочности укрепляемого грунта могут быть использованы тонкомолотый доменный шлак, тонкомолотый известняк, традиционный портландцемент.

ТАБЛИЦА 1. Результаты определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава пробы глинистого грунта

№ п/п	Плотность частиц грунта $\rho_{г}$, г/см ³	Гигроскопическая влажность грунта, W_r , %	Содержание фракций грунта, %										
			Более 10	10–5	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,002	Менее 0,002
1	1,92	1,2	—	—	0,12	0,57	1,60	5,4	6,9	8,8	27,3	29,5	19,51

С целью увеличения реакционной активности системы, ее упрочнения, формирования новых гибких и прочных структурных связей за счет образования новых гидратных соединений, ведущих к увеличению устойчивости к трещинообразованию, целесообразно дополнительно использовать химическую активацию путем использования сухой комплексной химической добавки на основе поликарбоксилатных полимеров в сочетании с реакционно-активными солями на основе катиона калия. Используемая химическая добавка имеет техническое название «ПРА» [13–15].

Научные исследования проводились с учетом требований ГОСТ для каждого вида испытания.

Определение основных физико-механических характеристик глинистого грунта проводилось в соответствии с требованиями:

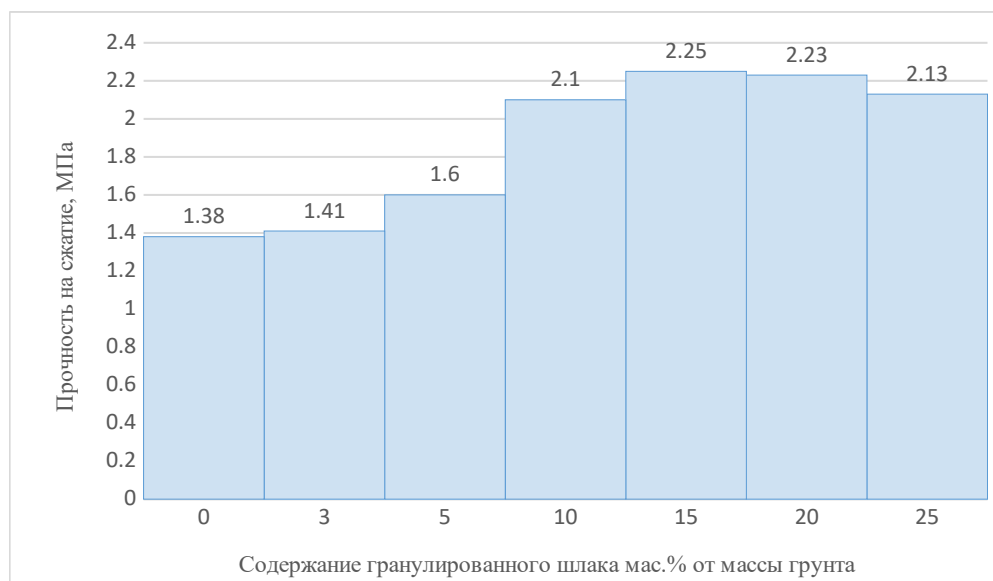
- ГОСТ 12536—2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава»;
- ГОСТ 25584—2016 «Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации»;
- ГОСТ 22733—2016 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности»;
- ГОСТ 5180—2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик»;
- ГОСТ 25100—2020 «Грунты. Классификация».

Результаты исследований

В данном исследовании использован грунт, который по данным физико-механических исследований имел следующие характеристики:

1. Зерновой состав представлен в табл. 1.
 2. Влажность грунта в естественном состоянии — 18,9 %.
 3. Насыпная плотность в естественном состоянии — 1660 кг/м³.
 4. Насыпная плотность в сухом состоянии — 1390 кг/м³.
 5. Содержание частиц менее 0,005 мм — 76,31 %.
 6. Содержание песчаных частиц (2–0,05 мм) — 23,27 %.
 7. Число пластичности, t_p — 16,9 %.
 8. Максимальная плотность грунта — 1,92 г/см³.
 9. Коэффициент фильтрации, K_f — 0,003 м/сут.
- В соответствии с ГОСТ 25100—2020 «Грунты. Классификация» и результатов физико-механических исследований используемый грунт соответствует категории «глина легкая песчаная», представленный грунт-неводопроницаемый.
- Эффективность используемых материалов для стабилизации и укрепления глинистого грунта оценивали по изменению показателя прочности образцов в возрасте 7 суток в водонасыщенном состоянии.
- Для исследования изготавливались образцы-цилиндры диаметром 7 см и высотой 7 см путем прессования под давлением 15 МПа. Оценка эффективности действия гранулированного и тонкомолотого доменных шлаков по стабилизации и укреплению глинистого грунта представлены на рисунке и в табл. 2.

Анализ данных, представленных в табл. 2, показывает, что гранулированный доменный



Прочность грунта, стабилизированного гранулированным доменным шлаком фракции ≈ 2,5 мм

ТАБЛИЦА 2. Прочностные характеристики укрепляемого глинистого грунта при использовании гранулированного доменного шлака и известняка

Содержание стабилизатора, мас.% от массы грунта											
Гранулированный					Прочность на сжатие, МПа/%	Известняк					Прочность на сжатие, МПа/%
0	10	15	20	25		0	10	15	20	25	
+	-	-	-	-	1,38/100	+	-	-	-	-	1,51/100
-	+	-	-	-	2,10/152	-	+	-	-	-	2,31/115
-	-	+	-	-	2,25/163	-	-	+	-	-	2,45/120
-	-	-	+	-	2,21/160	-	-	-	+	-	2,39/114
-	-	-	-	+	2,03/154	-	-	-	-	+	2,16/96

шлак и природный известняк обладают достаточно близким эффектом по стабилизации глинистого грунта. Наибольшее значение прочности (2,25 МПа) имеет глинистый грунт, при использовании гранулированного доменного шлака в количестве 15 мас.% от массы грунта и 2,45 МПа при использовании известняка также в количестве 15 мас.% от массы грунта. Разница в показателях прочности в пользу известняка составляет ≈ 9,0 %, но учитывая, что гранулированный доменный шлак является отходом металлургического производства и его утилизация имеет важное значение для защиты окружающей среды от загрязнения и захламления твердыми отходами, дальнейшие исследования по укреплению глини-

стого грунта необходимо проводить для грунта, предварительно стабилизированного гранулированным доменным шлаком фракции ≈ 2,5 мм.

Основной фазой гранулированного доменного шлака являются кальций-магниево-силикаты типа окерманита $2CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$, которые при увеличении площади поверхности, а также в результате механической активации обладают способностью повышать реакционную активность. В связи с вышесказанным представляло научный интерес исследовать эффективность действия тонкомолотого доменного шлака (ТДШ) относительно глинистого грунта, стабилизированного гранулированным доменным шлаком.

ТАБЛИЦА 3. Оценка эффективности совместного действия шлаков

№ п/п	Гранулированный доменный шлак			Тонкомолотый доменный шлак			Прочность на сжатие, МПа/%
	Количество шлака, мас.% от массы грунта						
	10	15	20	5	10	15	
1	+			+	–		2,35/100
2	+				+		2,38/152
3	+					+	2,54/150
4		+		+			2,62/146
5		+			+		2,76
6		+				+	2,58
7			+	+			2,51
8			+		+		2,56
9			+			+	2,32

Результаты проведенных исследований представлены в табл. 3.

При рассмотрении эффективности совместного действия гранулированного доменного шлака и тонкомолотого шлака (табл. 3) оказалось положительным и установлено, что добавление тонкомолотого компонента в виде шлака приводит к увеличению прочности грунта. Наибольшее значение прочности укрепляемого грунта происходит при совместном действии 15 % гранулированного доменного шлака и 10 % тонкомолотого шлака. Дальнейшее увеличение тонкомолотого шлака не способствует упрочнению грунта.

Установлено, что глинистый грунт, стабилизированный и укрепленный доменным шлаком, имеет максимальную прочность на сжатие (2,6–2,7) МПа, что соответствует марке М20–М25. Полученные результаты являются недостаточными для создания прочной, устойчивой к трещинообразованию и надежной транспортной магистрали, поэтому необходимо усилить подготовку основания. Для повышения эффективности укрепления грунта, повышения его плотности, прочности и морозостойкости целесообразно использовать компоненты, обладающие повышенной реакционной активностью, и компоненты, усиливающие реакционную активность твердеющей системы.

В качестве реакционного компонента исследовали портландцемент, который способен самостоятельно проявлять гидратационную активность в широком диапазоне положительных температур от +5 до +40 °С, сопровождающуюся выделением тепла, и который традиционно используется для укрепления грунтов. Обычно усиление реакционной активности компонентов укрепляемого основания или другой твердеющей системы осуществляется под действием комплексных химических добавок. При проведении настоящих исследований, направленных на создание высокоэффективного основания, использована сухая высокоэффективная комплексная химическая добавка на поликарбоксилатной основе, модифицированная веществами органической и неорганической природы по ГОСТ 24211. Сухая комплексная химическая добавка имеет техническое название «ПРА».

Результаты научно-экспериментальных исследований по оценке эффективности совместного действия гранулированного доменного шлака, портландцемента и комплексной химической добавки на степень уплотнения и повышения прочности глинистого грунта представлены в табл. 4.

Анализ данных, представленных в табл. 4, показывает, что степень уплотнения глинистого грунта значительно повышается в присутствии всех исследуемых компонентов: гранулирован-

ТАБЛИЦА 4. Оценка эффективности комплексного укрепления глинистого грунта

№ п/п	Укрепляемый грунт	Гранулированный доменный шлак (15 мас.% от массы)	Тонкомолотый доменный шлак (ТДШ) (10 мас.% от массы грунта)	Портландцемент (ПЦ), мас.% от массы грунта			Сухая реакционно-активная химическая добавка «ПРА» (2,0 мас.% от массы ПЦ + ТДШ)	Прочность на сжатие, МПа
				5,0	10,0	12,0		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Глина легкая песчанистая	+	–	–	–	–	–	2,25
		–	+	–	–	–	–	1,67
		+	+	–	–	–	–	2,89
		+	+	+	–	–	–	3,8
		+	+				–	4,2
		+	+				–	4,3
		+	+	+	–	–	+	4,9
		+	+	–	+	–	+	5,4
		+	+	–	–	+	+	5,5

ного доменного шлака фракции $\approx 2,5$ мм, тонкомолотого доменного шлака с величиной удельной поверхности $S_{уд} \geq 300$ м²/кг и комплексной химической добавки «ПРА». Совместное присутствие компонентов усиливает эффективность действия каждого компонента.

Экспериментально определено, что максимальное количество портландцемента составляет 10 мас.% от массы грунта, но при этом необходимо отметить, что 5,0 мас.% портландцемента от массы грунта более чем в 2 раза повышает прочность стабилизированного грунта, дальнейшее увеличение портландцемента незначительно (\approx до 10 %) повышает прочность укрепленного грунта, поэтому рационально и целесообразно использовать 5,0 мас.% портландцемента от массы грунта.

Состав № 7 (см. табл. 4) подвергли комплексным физико-механическим испытаниям, в результате которых получены следующие характеристики укрепленного глинистого грунта:

- плотность укрепленного грунта — 2,17 г/см³;
- прочность на сжатие — 5,3 МПа;
- прочность на растяжение при изгибе — 1,3 МПа;
- морозостойкость — $F = 35$;
- коэффициент фильтрации — $K_{10} = 0,026$ м/сут.

Грунт с данными характеристиками может быть использован при строительстве дорожной магистрали в суровых условиях Севера.

Результаты обсуждений

Для создания высокоэффективной транспортной магистрали местного или федерального значения каждый этап строительства имеет важное значение и оказывает влияние на надежность и долговечность всего сооружения.

На начальном этапе необходимо осуществить эффективное укрепление грунта, которое заключается в создании не только прочного материала, но важно, чтобы укрепление основания обеспечило бы эффективный отвод воды, что особенно важно в период повышенного весеннего таяния снега или ливневых дождей. Также важно, чтобы основание было морозостойчивым, особенно в условиях многолетней мерзлоты.

Проведенные научно-экспериментальные исследования показали, что в Северных регионах встречаются большие территории со слабыми глинистыми грунтами, которые при проведении комплексных мероприятий необходимо превратить в прочное надежное основание.

По результатам проведенных исследований установлено, что эффективно с технологической

и экологической точек зрения использовать гранулированный доменный шлак фракции $\approx 2,5$ мм в количестве 15 мас.% от массы грунта для его стабилизации, что способствует повышению прочности и повышению коэффициента фильтрации глинистого грунта.

Дальнейшее укрепление целесообразно производить при помощи тонкомолотого доменного шлака (ТДШ), рациональное количество которого составляет 10 мас.% от массы грунта.

Установлено, что реакционная активность и эффективность укрепляющего действия ТДШ значительно повышается в присутствии портландцемента в количестве 5 мас.% от массы грунта, которое является достаточным для достижения максимально возможного эффекта. Для повышения реакционной активности всей укрепляемой системы грунта целесообразно дополнительно вводить сухую комплексную химическую добавку на поликарбоксилатной основе «ПРА», количество которой составляет 2,0 мас.% от массы (ПЩ + ТДШ).

Комплексное укрепление слабого глинистого грунта обеспечивает создание основания со следующими фактическими показателями: М50F35 $K_{10} = 0,026$ м/сут. Такое основание может быть рекомендовано для создания транспортных магистралей местного значения в суровых северных регионах.

Заключение

Научно-экспериментальные исследования показали, что для создания транспортных магистралей на проблемных глинистых грунтах в суровых условиях северного региона требуется эффективная подготовка основания.

Целесообразно слабые глинистые грунты стабилизировать гранулированным доменным шлаком фракции $\approx 2,5$ мм с целью повышения прочности и коэффициента фильтрации грунта.

Реакционная активность стабилизированного глинистого грунта достигается при комплексном использовании тонкомолотого доменного шлака и портландцемента в сочетании с сухой комплексной химической добавкой «ПРА».

Комплексно укрепленные глинистые грунты достигают фактических показателей (М50F35 $K_{10} = 0,026$ м/сут) и могут быть рекомендованы для изготовления транспортных магистралей местного значения в суровых северных регионах.

Библиографический список

1. Абу-Хасан М. С. Влияние различных видов армирования на деформационные характеристики глинистого грунта в условиях сезонного замерзания и оттаивания / М. С. Абу-Хасан, В. В. Егоров // Серия конференций ИОР: Материаловедение и инженерия. — 2020. — Т. 753. — Вып. 4, 5. — DOI: 10.1088/1757-899X/753/4/042083.
2. Аввад Т. Численный анализ с использованием модели упругопластического грунта для одиночной сваи в глиняном слое для изучения влияния дополнительной нагрузки на распределение поверхностного трения / Т. Аввад, С. Аль Кодси, В. Улицкий, А. Шашкин, Л. Аввад // Конспект лекций по гражданскому строительству. — 2020. — № 49. — С. 499–506. — DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_52.
3. Соловьева В. Высокоэффективная ремонтная смесь для восстановления и защиты поврежденных бетонных конструкций / В. Соловьева, И. Степанова, Д. Соловьев, А. Касаткина // Конспект лекций по гражданскому строительству ссылка отключена. — 2020. — № 50. — С. 369–375. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_38.
4. Шершнева М. Геоэкозащитные экраны при строительстве и эксплуатации дорог в холодных регионах / М. Шершнева, А. Сахарова, И. Козлов // Конспект лекций по строительству ссылка отключена. — 2020. — № 50. — С. 347–356. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_36 27.
5. Егоров В. Применение эволюционного алгоритма оптимизации шпренгелевых систем транспортных зданий

и сооружений для северных районов / В. Егоров, А. Кравченко, М. Абу-Хасан // Серия конференций ИОП: Материаловедение и инженерия. — 2020. — С. 753(2). — DOI:10.1088/1757-899X/753/2/022020.

6. Богомолова Н. Особенности инженерных изысканий в районах распространения вечной мерзлоты на примере проекта «Северный широтным способом» / Н. Богомолова, Ю. Милюшкан, С. Шкурников и др. // Конспект лекций по гражданскому строительству. — 2020. — № 50. — С. 215–221. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_23 31.

7. Клемяционок П. Экстраполяция кривых сжатия на высокие давления для мягких глинистых грунтов / П. Клемяционок, С. Колмогорова, С. Колмогоров // Конспект лекций по гражданскому строительству. — 2020. — № 50. — С. 233–238. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_25 32.

8. Бабак Н. Структура атомов основной фазы промышленных отходов прогнозирует свойства строительных материалов в транспортном строительстве в холодных регионах / Н. Бабак // Конспект лекций по гражданскому строительству. — 2020. — Т. 50 — С. 451–457. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_47. 33.

9. Белаш Т. А. Сейсмостойкость зданий на оттаивающих многолетнемерзлых грунтах / Т. А. Белаш, Т. В. Иванова // Строительный журнал. — 2020. — № 93(1). — С. 50–59. — DOI: 10.18720/MCE.93.5 34.

10. Богданова Г. Методика оценки параметров реакции многоэтажных зданий с нелинейными динамическими виброгасителями при сейсмических воздействиях / Г. Богданова, А. Бенин // Конспект лекций по гражданскому строительству. — 2022. — № 180. — С. 553–564. — DOI:10.1007/978-3-030-83917-8_50.

11. Николаев С. В. Методика выбора эффективного погружения и контроля глубины заполнения строительных материалов с открытой текстурой / С. В. Николаев, А. В. Бенин, А. М. Попов // Journal of Physics: Conference Series this link is disabled. — 2021. — № 2131(2). — DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022055 36.

12. Huang W. Снижение гидратации глины путем добавления органического стабилизатора / W. Huang, Y. Zhang, Z. Luo Et al. // Глины и глинистые минералы. — 2021. — Т. 69. — С. 489–499 (2021). — DOI: 10.1007/s42860-021-00139-4 37.

13. Соловьева В. Повышение уровня свойств композиционных материалов для строительных геоконструкций с применением добавок нового поколения / В. Соловьева, И. Степанова, Д. Соловьев и др. // Конспект лекций по строительству неорганических добавок. — 2020. — № 50. — С. 387–393. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_40 38.

14. Соловьева В. Многофункциональные наномодифицированные бетоны нового поколения / В. Соловьева, И. Степанова, Д. Соловьев и др. // Конспект лекций по строительному строительству ссылка отключена. — 2020. — № 50. — С. 377–386. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_39. 39.

15. Соловьева В. Восстановление поврежденных геоснований на транспорте с использованием высокоэффективного ремонтного раствора / В. Соловьева, Д. Соловьев, И. Степанова, А. Касаткина // MATEC Web of Conferences. — 2018. — № 239. — DOI:10.1051/mateconf/201823901015.

Дата поступления: Май 20, 2022

Решение о публикации: June 05, 2022

Контактная информация:

АБУ-ХАСАН Махмуд Самиевич — д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»; abukhasan@pgups.ru

СОЛОВЬЕВА Валентина Яковлевна — д-р техн. наук, проф., заведующая кафедрой «Инженерная химия и естествознание»; 9046185117@mail.ru

САХАРОВА Антонина Сергеевна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Инженерная химия и естествознание»; asakharova@pgups.ru

Methods for Stabilizing and Strengthening Yoldian Clays and Weak Clay Soils When Creating a Subgrade in the Far North Regions

M. Abu-Khasan, V. Ya. Soloviova, A. S. Sakharova

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

For citation: *Abu-Khasan M., Soloviova V. Ya., Sakharova A. S. Methods for Stabilizing and Strengthening Yoldian Clays and Weak Clay Soils When Creating a Subgrade in the Far North Regions // Proceedings of Petersburg Transport University, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 444–454. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-444-454*

Summary

Purpose: Definition of the most effective methods and components for strengthening weak Yoldian clays used in the creation of transport routes in the North regions. **Methods:** The definition of the main physical-mechanical characteristics of clay soil was carried out in accordance with the requirements: of GOST (Russia State Standard) 12536—2014 “Soils. Methods for laboratory determination of granulometric (grain) and microaggregate composition”; GOST 25584—2016 “Methods for laboratory determination of the filtration coefficient”; GOST 22733—2016 “Soils. Method for laboratory determination of maximum density”; GOST 5180—2015 “Soils. Methods of laboratory determination of physical characteristics”; GOST 25100—2020 “Soils. Classification”. It is shown that the effective strengthening of weak clay soil is achieved as a result of its preliminary stabilization with the help of granulated blast-furnace slag or natural limestone of ≈ 2.5 mm fraction. The rational amount of granulated blast-furnace slag or limestone is 15 wt.% of the soil mass and at the same time, clay soil has the highest strength value — (2.25–2.45) MPa. The difference in strength indicators in favor of limestone constitutes 9.0%. It has been experimentally established that in order to increase reinforced clay soil strength it is effective to use granulated blast-furnace slag in combination with finely ground blast-furnace slag which rational amount of is 10 wt.% of soil mass which achieved strength of corresponds to M20–M25 grade. It has been defined that for comprehensive improvement of the indicators as strength, density, and frost resistance it is necessary to introduce additionally to clay soil, reinforced with blast-furnace metallurgical slag as reactive components which it's effective to use Portland cement in amount of not more than 5 wt.% of soil mass in combination with dry complex chemical additive “PRA” which rational amount of constitutes 2.0 wt.% by weight of (Portland cement + finely ground blast-furnace slag). **Practical significance:** Stabilized and comprehensively strengthened weak clayey soil is characterized by the following actual indicators: M50 F35 K10 — 0.026 m/day which can be used as a base at construction of transport routes of local importance in the regions of the North.

Keywords: Clay soil, stabilization, strengthening, strength, filtration coefficient, granulated blast-furnace slag, finely ground slag, chemical additive.

References

1. Abu-Khasan M. S., Egorov V. V. Vliyaniye razlichnykh vidov armirovaniya na deformatsionnye kharakteristiki glinistogo grunta v usloviyakh sezonnogo zamerzaniya i ottaivaniya [Effect of Different Types of Reinforcement on the Deformation Characteristics of Clay Soil under Seasonal Freezing and Thawing Conditions IOP Conference] *Seriya konferentsiy IOP: Materialovedenie i inzheneriya* [Conference Series: Materials Science and Engineering]. 2020, vol. 753, I. 4, 5. DOI: 10.1088/1757-899X/753/4/042083. (In Russian)

2. Avvad T., Al' Kods S., Ulitskiy V., Shashkin A., Avvad L. *Chislennyy analiz s ispol'zovaniem modeli uprugoplasticheskogo grunta dlya odinochnoy svai v glinyanom sloe dlya izucheniya vliyaniya dopolnitel'noy nagruzki na raspredelenie poverkhnostnogo treniya* [Numerical analysis using an elastic-plastic soil model for a single pile in a clay layer to study the effect of additional load on the distribution of surface friction]. 2020, I. 49, pp. 499–506. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_52. (In Russian)

3. Solov'eva V., Stepanova I., Solov'ev D., Kasatkina A. *Vysokoeffektivnaya remontnaya smes' dlya vosstanovleniya*

- i zashchity povrezhdennykh betonnykh konstruksiy* [Highly effective repair mortar for the restoration and protection of damaged concrete structures]. 2020, pp. 369–375. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_38. (In Russian)
4. Shershneva M., Sakharova A., Kozlov I. *Geoekozashchitnye ekrany pri stroitel'stve i ekspluatatsii dorog v kholodnykh regionakh* [Geo-environmental screens in the construction and operation of roads in cold regions]. 2020, pp. 347–356. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_36 27. (In Russian)
5. Egorov V., Kravchenko A., Abu-Khasan M. *Primenenie evolyutsionnogo algoritma optimizatsii shprengel'nykh sistem transportnykh zdaniy i sooruzheniy dlya severnykh rayonov* [Application of an evolutionary algorithm for optimizing sprenge systems of transport buildings and structures for northern regions]. *Seriya konferentsiy IOP: Materialovedenie i inzheneriya* [IEP Conference Series: Materials Science and Engineering]. 2020, pp. 753(2). DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022020. (In Russian)
6. Bogomolova N., Milyushkan Yu., Shkurnikov S., Bushuev N., Svintsov E., Anisimov V. *Osobennosti inzhenernykh izyskaniy v rayonakh rasprostraneniya vechnoy mertzloty na primere proekta «Severnyy shirotnym sposobom»* [Features of engineering surveys in permafrost areas on the example of the Northern Latitudinal Method project]. 2020, pp. 215–221. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_23 31. (In Russian)
7. Klemyatsionok P., Kolmogorova S., Kolmogorov S. *Ekstrapolyatsiya krivykh szhatiya na vysokie davleniya dlya myagkikh glinistykh gruntov* [Extrapolation of compression curves to high pressures for soft clay soils]. 2020, pp. 233–238. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_25 32. (In Russian)
8. Babak N. *Struktura atomov osnovnoy fazy promyshlennykh otkhodov prognoziruet svoystva stroitel'nykh materialov v transportnom stroitel'stve v kholodnykh regionakh* [The structure of atoms of the main phase of industrial waste predicts the properties of building materials in transport construction in cold regions]. 2020, pp. 451–457. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_47.33. (In Russian)
9. Belash T. A., Ivanova T. V. *Seysmostoykost' zdaniy na ottaivayushchikh mnogoletnemerzlykh gruntakh* [Seismic resistance of buildings on thawing permafrost soils]. *Stroitel'nyy zhurnal* [Construction Journal]. 2020, I. 93 (1), pp. 50–59. DOI: 10.18720/MCE.93.5 34. (In Russian)
10. Bogdanova G., Benin A. *Metodika otsenki parametrov reaktsii mnogoetazhnykh zdaniy s nelineynymi dinamicheskimi vibrogasitelyami pri seysmicheskikh vozdeystviyakh* [A technique for assessing the response parameters of multi-storey buildings with non-linear dynamic vibration dampers under seismic effects]. 2022, pp. 553–564. DOI:10.1007/978-3-030-83917-8_50. (In Russian)
11. Nikolaev S. V., Benin A. V., Popov A. M. *Metodika vybora effektivnogo pogruzeniya i kontrolya glubiny zapolneniya stroitel'nykh materialov s otkrytoy teksturoy* [A technique for selecting effective immersion and controlling the depth of infill in open texture building materials Journal of Physics]. 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022055 36. (In Russian)
12. Huang, W., Zhang, Y., Luo, Z., Wei, X., Fu, H. *Snizhenie gidratatsii gliny putem dobavleniya organicheskogo stabilizatora. Gliny i glinistye mineral* [Reducing Clay Hydration by Adding an Organic Stabilizer. Clays and Clay Minerals]. 2021, vol. 69, pp. 489–499. DOI: 10.1007/s42860-021-00139-4 37. (In Russian)
13. Solov'eva V., Stepanova I., Solov'ev D., Ershikov N. *Povyshenie urovnya svoystv kompozitsionnykh materialov dlya stroitel'nykh geokonstruksiy s primeneniem dobavok novogo* [Increasing the level of properties of composite materials for building geostructures using new generation additives Lecture notes on the construction of inorganic additives]. 2020, pp. 387–393. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_40 38. (In Russian)
14. Solov'eva V., Stepanova I., Solov'ev D., Kravchenko T. *Mnogofunktsional'nye nanomodifitsirovannyye betony novogo pokoleniya* [Multifunctional nanomodified concretes of a new generation Abstract of lectures on building construction link disabled]. 2020, pp. 377–386. (In Russian)
15. Solov'eva V., Solov'ev D., Stepanova I., Kasatkina A. *Vosstanovlenie povrezhdennykh geosnovaniy na transporte s ispol'zovaniem vysokoeffektivnogo remontnogo ras-tvora MATEC Web of Conferences* [Restoration of damaged geobases in transport using a highly effective repair solution MATEC Web of Conferences]. 2018. DOI: 10.1051/matec-conf/201823901015. (In Russian)

Received: May 20, 2022

Accepted: June 05, 2022

Author's information:

Mahmud S. ABU-KHASAN — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Department of Construction Structures, Buildings and Constructions; abukhasan@pgups.ru
 Valentina Ya. SOLOVIOVA — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head. Department of Engineering Chemistry and Natural Science; 9046185117@mail.ru
 Antonina S. SAKHAROVA — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Engineering Chemistry and Natural Science; asakharova@pgups.ru

УДК 656.223

Анализ мест концентрации чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации за последние годы и вопросы транспортного обеспечения

Н. Г. Кобозева

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

Для цитирования: Кобозева Н. Г. Анализ мест концентрации чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации за последние годы и вопросы транспортного обеспечения // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 455–463. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-455-463

Аннотация

Цель: Выявление мест концентрации ЧС позволит разработать эффективную методику обеспечения железнодорожным подвижным составом перевозок колесной и гусеничной техники для ликвидации последствий ЧС. Анализ статистических данных о чрезвычайных ситуациях в России за период с 2010 по 2020 г., постановка вопроса для дальнейшего построения модели процесса организации доставки техники для ликвидации ЧС; изучение чрезвычайных ситуаций (ЧС) по характеру и виду источников возникновения, места концентрации и сбор статистических данных о ЧС в России за период с 2010 по 2020 г. **Методы:** Сравнение и анализ показателей, характеризующих ЧС; выводы по статистическим исследованиям, выявление закономерностей и рисков возникновения ЧС. **Результаты:** Получение прогнозных данных о регионах с местами возникновения ЧС с высокой частотой вероятности; выделение в отдельный сегмент вопросов, связанных с организацией железнодорожных перевозок техники к местам ЧС. **Практическая значимость:** Возможность дальнейшей разработки эффективных направлений деятельности в области транспортного обеспечения последствий ЧС в местах их вероятной концентрации.

Ключевые слова: Чрезвычайные ситуации, потребности в технических средствах и рабочей силе, материальный ущерб, природные и техногенные катастрофы.

Развитие цивилизации непосредственно связано с развитием научно-технического прогресса. Наряду с положительными сторонами НТП неизменно присутствует и отрицательное влияние на природу и человека, в частности. Техногенные катастрофы, аварии на производстве и в добывающей отрасли, природные катаклизмы, и это

еще не весь перечень. В результате последствия от воздействия на окружающую среду оборачиваются большими материальными потерями, нередко человеческими жертвами и зачастую становятся уже необратимыми.

Несмотря на большую работу по предупреждению ЧС, огромное значение имеет эффектив-

ная организация мероприятий по их ликвидации. В частности, своевременная доставка необходимой техники и человеческих ресурсов к местам возникновения ЧС дает возможность снизить потери, уменьшить вред, наносимый стихией или техногенными факторами. Для этого необходимо создать модель слаженно работающего механизма, который обеспечил бы в максимально короткие сроки доставку необходимого технического контингента к местам ЧС с минимальными затратами и максимально низкими рисками, чтобы сохранить человеческие жизни и природные ресурсы. Одну из главных ролей в доставке необходимой техники и человеческих ресурсов к местам возникновения ЧС выполняет железная дорога. И риск не доставить технику и необходимый контингент человеческих ресурсов должен быть сведен к минимуму.

Для создания эффективного механизма по транспортному обеспечению мероприятий по ликвидации ЧС, в том числе математической модели транспортного обеспечения, необходимо проанализировать причины и территории их максимальной концентрации, изучить прогнозы и риски их возникновения.

Причин возникновения ЧС множество. Анализ ЧС в Российской Федерации за последние годы дает возможности выработки прогнозных решений по ликвидации ЧС с вопросами транспортного обеспечения и расчета возможных рисков при организации процесса.

Безусловно, во всем мире задумываются о том, чтобы предотвращать чрезвычайные ситуации, снизить риск от их негативных последствий. Существуют специальные государственные институты и программы, которые направлены на разработку и внедрение специальных законодательных актов, стандартов, директив, методик по предотвращению чрезвычайных ситуаций в народном хозяйстве и минимизации их вредоносного воздействия на природу. Создаются специ-

альные программы подготовки кадров для служб безопасности, руководителей опасных производств, экспертов в области расчета рисков и страхования.

Для предотвращения и ликвидации чрезвычайных ситуаций необходимо понимать причины (комплекс причин) их возникновения, особенности протекания и возможные последствия. В связи с этим важно понимание основ терминологии и классификации в этой области [1–5].

В соответствии со статьей 1 Федерального закона «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» чрезвычайной ситуацией является «обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушения условий жизнедеятельности людей» [6].

С целью предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, спасения людей, материально-культурных ценностей и помощи населению, пострадавшему в результате чрезвычайных ситуаций и террористических актов, обеспечения пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах, учреждено Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий.

Кроме Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий в эту деятельность вовлечены следующие организации: Роспотребнадзор, Минпромторг, Росрезерв, Рослесхоз, Росгидромет, Росводресурсы, Россвязь, ВМЦК «Защита» (развитие телемедицинской системы Минздрава России, в том числе

ТАБЛИЦА 1. Количество чрезвычайных ситуаций по характеру их возникновения за период с 2010 по 2020 г. [7–10]

Чрезвычайные ситуации по характеру возникновения	Количество ЧС										
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Техногенные ЧС*	178	185	228	166	186	179	178	176	190	202	167
Крупные террористические акты	21	5	5	7	1	0	0	1	0	0	0
Природные ЧС	118	65	148	114	44	45	54	42	44	49	104
Биолого-социальные ЧС	43	42	56	45	31	33	67	38	32	15	60
Итого:	360	294	437	332	262	257	299	257	266	266	331

* Без учета пожаров, в соответствии с приказом МЧС России от 24 февраля 2009 г. № 92 (учет пожаров и их последствий осуществляется в соответствии с Порядком учета пожаров и их последствий, утвержденным приказом МЧС России от 24 ноября 2008 г. № 714 (зарегистрирован в Минюсте России 12 декабря 2008 г., регистрационный № 12842, информации о ЧС не отражается)).

ТАБЛИЦА 2. Количество ЧС и причиненный материальный ущерб

Чрезвычайные ситуации по характеру возникновения	Количество ЧС в 2019 г., ед.	Количество ЧС в 2020 г., ед.	Материальный ущерб в 2019 г., млн руб.	Материальный ущерб в 2020 г., млн руб.
Техногенные ЧС	202	167	4752	151 117
Природные ЧС	49	104	15 020	12 389
Биолого-социальные ЧС	15	60	737	272
Итого:	266	331	20 509	163 778

в службе медицины катастроф Минздрава России), Минтранс России, Пожарные подразделения ведомственной охраны железнодорожного транспорта, Минтруд России, Ростехнадзор, Росгвардия, Госкорпорация «Росатом», Госкорпорация «Роскосмос», Росприроднадзор [7].

Для анализа ЧС на территории Российской Федерации приведена сравнительная характеристика количества чрезвычайных ситуаций по характеру и виду источников возникновения, произошедших за период с 2010 по 2020 г. (табл. 1).

Графики количества ЧС в процентном отношении по федеральным округам за 2020 г. (рис. 1) выглядят следующим образом [10].

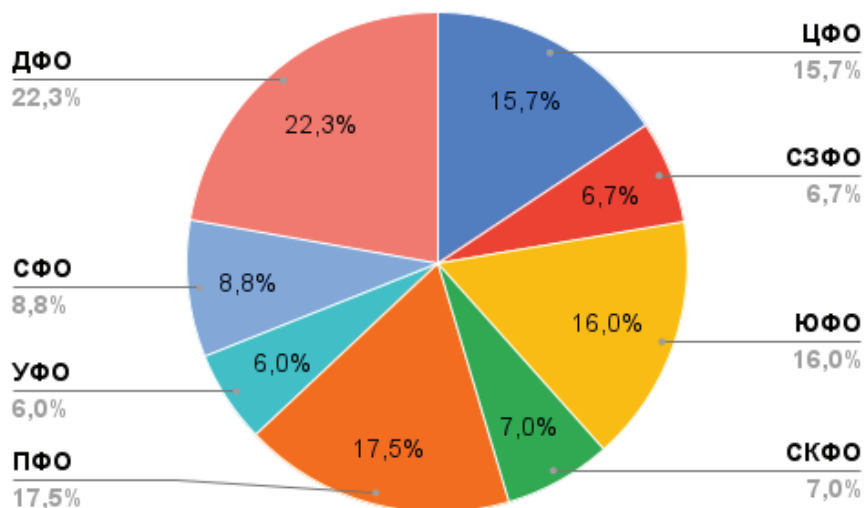


Рис. 1. Распределение ЧС по федеральным округам в 2020 г.

Результатом ЧС является в том числе и материальный ущерб. Так, например, в 2020 г., по сравнению с 2019 г., чрезвычайные ситуации привели к следующему материальному ущербу (табл. 2) [10].

ТАБЛИЦА 3. Потребности в человеческих ресурсах и технических средствах для ликвидации последствий наиболее значимых ЧС по регионам в 2019 и 2020 гг.

Регионы с ЧС	Потребности				
	в рабочей силе	в технических средствах			
		плав-средства	воздушные суда	другие технические средства	всего
<i>Паводки</i>					
Общие показатели по регионам: Приморского, Хабаровского краев, Еврейской автономной области, Амурской, Иркутской и Новгородской областей	716 тыс. чел. в 2019 г.	13,1 тыс. в 2019 г.	свыше 259 ед. в 2019 г.	более 141,6 тыс. ед.	более 155 тыс. ед. в 2019 г.
	772 тыс. чел. в 2020 г.	13,7 тыс. в 2020 г.	свыше 289 ед. в 2020 г.	более 153 тыс. ед. в 2020 г.	167 тыс. ед. в 2020 г.
<i>Природные пожары</i>					
Общие показатели по регионам: Забайкальского, Красноярского, Хабаровского краев, республик Бурятия, Саха (Якутия), Иркутской и Амурской областей, Карелии, Новгородской обл.	2474 чел. (в том числе от МЧС России — 302 чел.) в 2019 г.	—	—	645 ед. (в том числе от МЧС России — 64 ед.) в 2019 г.	645 ед. (в том числе от МЧС России — 64 ед.) в 2019 г.
	7593 чел. в 2020 г.	—	13 ед. в 2020 г.	2744 ед. в 2020 г.	2757 ед. в 2020 г.
<i>Единичные</i>					
Взрыв бытового газа в Ростовской области в 2019 г.	667 чел. (в том числе от МЧС России — 280 чел.)	—	—	152 ед. (в том числе от МЧС России — 69 ед., из них 1 ед. вертолет Ми-8)	152 ед. (в том числе от МЧС России — 69 ед., из них 1 ед. вертолет Ми-8)
Разрушение дамбы в Красноярском крае в 2019 г.	289 чел. (в том числе от МЧС России — 240 чел.)	—	—	49 ед. (в том числе от МЧС России — 27 ед.)	49 ед. (в том числе от МЧС России — 27 ед.)
Разлив дизельного топлива в Красноярском крае в 2020 г.	743 чел. (в том числе от МЧС России — 144 чел.)	—	—	300 ед. (в том числе от МЧС России — 17 ед.)	300 ед. (в том числе от МЧС России — 17 ед.)
Разлив авиационного топлива на Таймыре в 2020 г.	345 чел.	—	—	145 ед.	145 ед.
Циклон на территории Приморского края в 2020 г.	2124 чел. (в том числе от МЧС России — 460 чел.)	—	—	817 ед. (в том числе от МЧС России — 82 ед.)	817 ед. (в том числе от МЧС России — 82 ед.)

Государством проводится огромная работа по предотвращению ЧС. Для этого соответствующие ведомства МЧС проводят необходимые расчеты и делают прогнозы на предстоящие периоды. Так, прогнозы по вероятности ЧС, связанных с пожароопасными ситуациями и метеорологическими условиями, которые были сделаны на 2021 г., выглядят следующим образом [10].

Максимальная вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с пожарами в Российской Федерации (более 0,7 % и выше) в

регионах, приближенных к таким крупным городам, как Нижний Новгород, Волгоград, Екатеринбург, Челябинск, Тура, Красноярск, Якутск, Чита, Благовещенск. Конечно, максимальную площадь пожары охватывают в зоне Сибири и Дальнего Востока, где огромная концентрация лесов.

Самая большая вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций (более 0,6 % и выше), связанных с метеорологическими условиями, прогнозировалась на 2021 г. в тех же регионах, где и повышенная пожароопасность, а также к

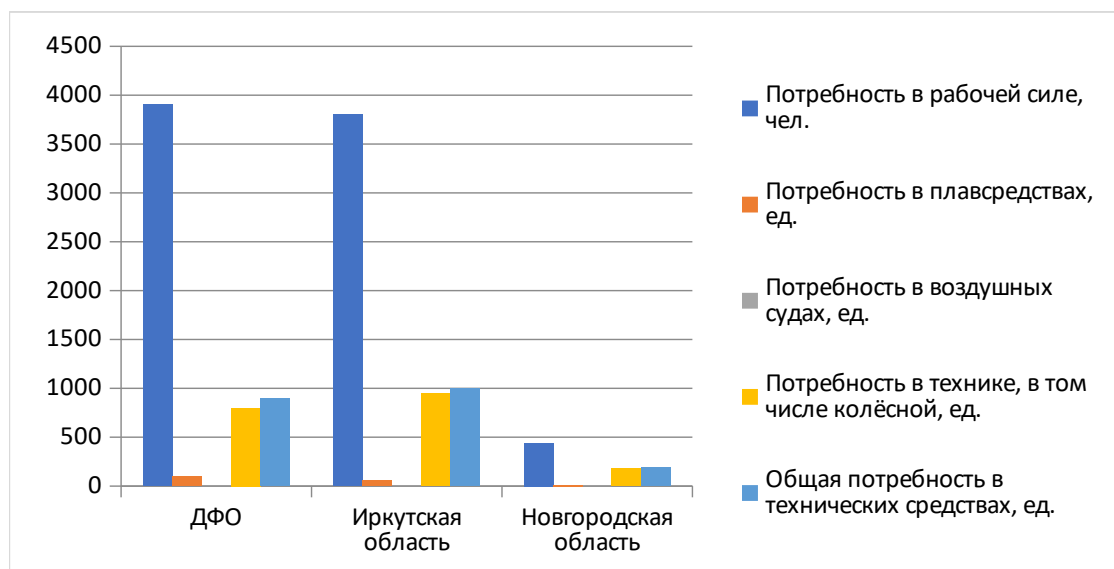


Рис. 2. Потребности в человеческих ресурсах и технических средствах в 2019 г. во время паводков в РФ

ним добавились регионы Северного Кавказа, Краснодарский край, Пермская область, Башкирия, южные области Сибири и Дальнего Востока и Камчатский край.

Анализ можно продолжить. Однако представленные выше данные уже дают возможность понять места максимальной концентрации вероятностного возникновения ЧС. Более того, прогнозы, сделанные МЧС РФ, подтверждаются и по данным 2020 г., и по данным уже текущего года. С учетом этого возможно выделить регионы и области, куда необходимо в максимально короткие сроки доставлять все необходимое, включая колесную и гусеничную технику, для доставки которой к местам ЧС привлекается железнодорожный подвижной состав.

На основе данных из государственных докладов «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» в 2019 и 2020 гг. была сформирована таблица потребности в человеческих ресурсах и технике для наиболее масштабных ЧС, которые были задействованы для ликвидации их последствий (табл. 3) [8, 10].

Чтобы представить наглядно потребности в человеческих ресурсах и технических средствах, построим диаграмму потребностей на примере ликвидации последствий паводков в 2019 г. (рис. 2).

Ниже представлен график общей потребности в технических ресурсах для ликвидации ЧС и их последствий в 2019 г. по территориальному признаку (рис. 3).

Для сравнения на диаграмме (рис. 4) представлена общая потребность в технических средствах, которые были использованы для ликвидации ЧС в 2019 и 2020 гг. в тыс. ед. техники.

Анализ потребности в различной технике для ликвидации ЧС, в том числе наиболее востребованной колесной и гусеничной техники, подводит к вопросам эффективной организации процесса ее доставки к местам ЧС. Так как наиболее масштабные стихийные бедствия и техногенные катастрофы не всегда возможно ликвидировать с помощью технических средств, находящихся в непосредственной близости от мест ЧС, возникает необходимость в кратчайшие сроки доставить эту технику из более удаленных регионов. Такие перевозки осуществляются по государственным заказам согласно специальному регламенту, в том

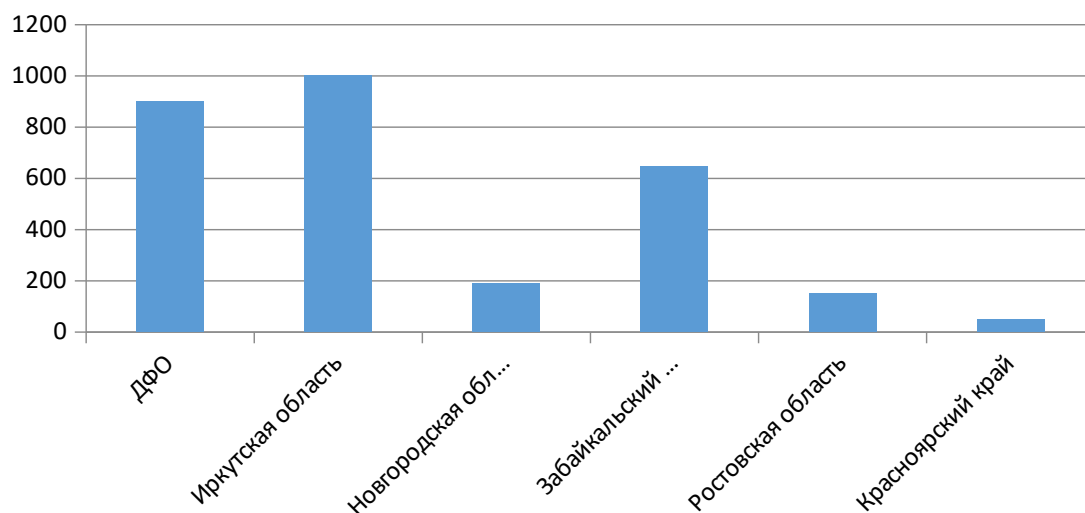


Рис. 3. Общая потребность в технических средствах для ликвидации ЧС в 2019 г.

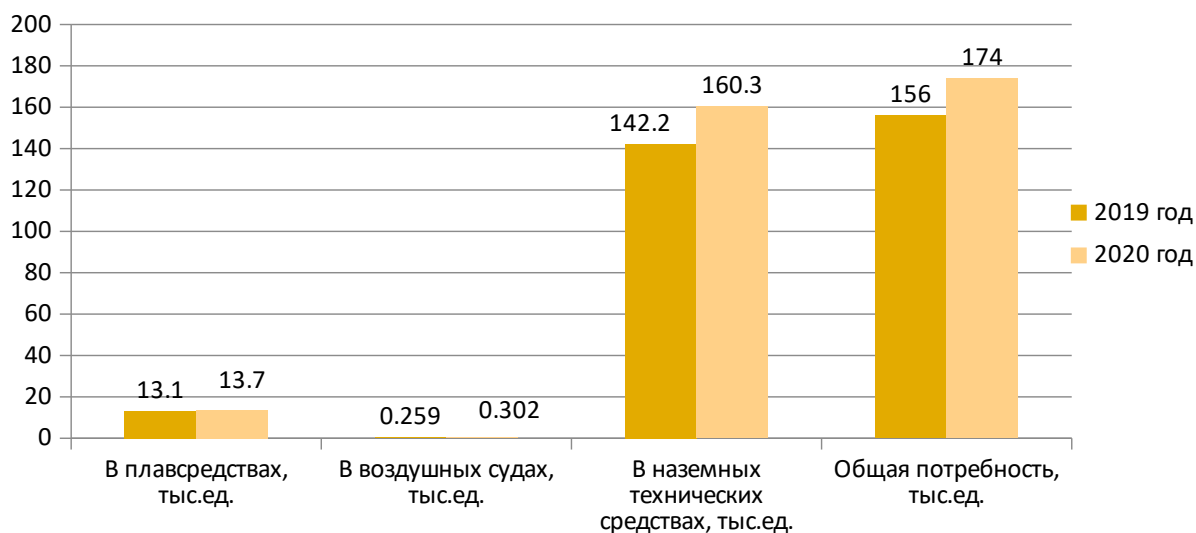


Рис. 4. Общая потребность в технических средствах для ликвидации ЧС в 2019 и 2020 гг.

числе когда речь идет о железнодорожных перевозках. Именно железная дорога в некоторых случаях является единственным доступным для этого видом транспорта. Организация доставки колесной и гусеничной техники из удаленных регионов железнодорожным транспортом к местам ЧС — очень сложный процесс, требующий соблюдения большого количества критериев. Железная дорога должна не только обеспечить такие перевозки подвижным составом, организовать сам процесс перевозки, но и выполнить все это в кратчай-

шие сроки. В такой сложной системе важны все аспекты. Однако вопрос взаимоотношений ОАО «РЖД» и компаний-операторов (владельцев подвижного состава) выходит на первый план. Необходимо от исключительно директивной системы взаимоотношений перейти к взаимовыгодной и эффективной для всех сторон: ОАО «РЖД», компаний-операторов и государства в целом. Именно поэтому вопросы транспортного обеспечения ЧС имеют огромное значение, особенно в условиях децентрализации в транспортной отрасли [11, 12].

В прошедшем 2021 г., к сожалению, ситуация с ЧС в Российской Федерации не улучшилась. Области возникновения ЧС по большей части сохранились по сравнению с прошлыми годами, но появляются и новые очаги. Наводнения в Краснодарском крае летом 2021 г. нанесли огромный вред экосистеме черноморского побережья, привели к масштабным разрушениям и человеческим жертвам. Пожары в Красноярском крае, Карелии, Якутии каждый год наносят непоправимый вред природе и народному хозяйству, приводят к потере жилья и гибели людей. На смену пожарам на Дальний Восток приходят паводки.

Подводя итоги вышеизложенного, можно с уверенностью констатировать, что с постоянным развитием научно-технического прогресса увеличивается количество негативных факторов, являющихся результатом процессов жизнедеятельности человека и отрицательно влияющих на природу. Потепление климата, техногенные аварии и катастрофы, инфекционные заболевания, проблемы экологии — все эти факторы приводят к возникновению чрезвычайных ситуаций и являются постоянными спутниками современного общества. В результате наносится материальный урон и экономический вред обществу, непоправимый ущерб природе. Масштабы катастроф достигают столь значительных размеров, что становятся угрозой национальной безопасности страны. Для того чтобы улучшить сложившуюся ситуацию, необходимо своевременно применять полученные знания для предупреждения ЧС и максимально быстрого и эффективного реагирования для ликвидации их последствий.

Техногенные катастрофы, аварии на производстве, стихийные бедствия — это все чрезвычайные ситуации, реакция на которые у государства должна быть максимально быстрой и эффективной. От этого зависят жизни людей и степень негативного влияния на природу. Именно поэтому столь важно уделять особенное внимание

процессам транспортного обеспечения мероприятий по предупреждению и ликвидации последствий ЧС.

Библиографический список

1. Бычков С. С. Безопасность в чрезвычайных ситуациях / С. С. Бычков, Е. А. Преликова // Актуальные проблемы экологии и охраны труда: сборник статей VII Международной научно-практической конференции / Юго-Западный государственный университет; редакционная коллегия: Л. В. Шульга (отв. редактор), В. М. Попов, А. Н. Барков, В. В. Юшин и др.: Юго-Западный государственный университет. — 2015. — С. 241–245.
2. Ашмарин В. В. Чрезвычайные ситуации, их характеристика и классификация / В. В. Ашмарин, А. А. Блохинцев, Е. Ю. Гаранина // Процессы техносферы: региональный аспект: сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции, Чебоксары, 23–24 марта 2019 года. — Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, 2019. — С. 18–31.
3. Гринин А. С. Безопасность жизнедеятельности / А. С. Гринин, В. Н. Новиков. — М.: ФАИР-ПРЕСС, 2002. — С. 28.
4. Титова Т. С. Интерактивная карта логистических объектов железных дорог / Т. С. Титова, К. А. Заболоцкая // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2020. — № 2. — С. 3–6.
5. Титова Т. С. Оценка эффективности проведения работ по ликвидации чрезвычайных ситуаций / Т. С. Титова, Н. Н. Пирогова // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке: сборник трудов XII Санкт-Петербургского конгресса. — 2018. — С. 238–239.
6. Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». — С. 13.
7. МЧС России. Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. — URL: <http://www.mchs.gov.ru/>.
8. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций при-

родного и техногенного характера в 2019 г.: государственный доклад. — М.: МЧС России; ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2020. — 259 с.

9. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2018 г.: государственный доклад. — М.: МЧС России; ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2019. — 344 с.

10. О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2020 г.: государственный доклад. — М.: МЧС России; ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2021. — 264 с.

11. Конограй О. А. Грузовые перевозки в условиях кризиса, вызванного пандемией Covid-19 / О. А. Конограй // Инновации. Наука. Образование. — 2021. — № 45. — С. 734–740.

12. Коровяковский Е. К. Перевозка грузов на особых условиях: учебное пособие / Е. К. Коровяковский, В. А. Болотин, Н. Г. Янковская и др. — СПб., 2014. — Т. Ч. 1.

Дата поступления: 24.04.2022

Решение о публикации: 06.06.2022

Контактная информация:

КОБОЗЕВА Нона Гивиевна — старший преподаватель;
nona-kobozeva@yandex.ru

Analysis of Emergence Concentration Spots in Russian Federation Last Years and Transport Provision Issues

N. G. Kobozeva

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

For citation: Kobozeva N. G. Analysis of Emergence Concentration Spots in Russian Federation Last Years and Transport Provision Issues // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 455–463. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-455-463

Summary

Purpose: Detecting of spots of concentration of emergencies will allow to develop an effective methodology for provision of railway rolling stocks with transportation of wheeled and caterpillar technique for liquidation of emergence consequences. Statistical data analysis on emergencies in Russia from 2010 to 2020 period; issue statement for model further design on technique delivery process organization for emergence liquidation; emergence study by character and kind of occurrence origins; concentration spots and statistical data collection of emergencies in Russia from 2010 to 2020 period. **Methods:** Comparison and analysis of indicators characterizing emergencies; conclusions on statistical research; identification of emergence legitimacies and occurrence risks. **Results:** Prognosis data obtaining on regions with spots with high frequency probability emergencies; outlining in separate segment of questions connected with railway transportation of technique to emergence spots. **Practical significance:** Possibility for further development of effective directions of activity in the sphere of transport provision of emergence consequences in the spots of emergence probable concentration.

Keywords: Emergences, requirements in technical means and working force, material damage, natural and technogenic catastrophes.

References

1. Bychkov S. S. Bezopasnost' v chrezvychaynykh situatsiyakh [Safety in emergency situations]. *Aktual'nye problemy ekologii i okhrany truda : sbornik statey VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual problems of ecology and labor protection: collection of articles of the VII International scientific and practical conference]. Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet Publ., 2015, pp. 241–245. (In Russian)
2. Ashmarin V. V. Chrezvychaynye situatsii, ikh kharakteristika i klassifikatsiya [Emergencies, their characteristics and classification]. *Protsessy tekhnosfery: regional'nyy aspekt : Sbornik materialov II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Cheboksary, 23–24 marta 2019 goda* [Processes of the technosphere: regional aspect: Collection of materials of the II All-Russian scientific and practical conference, Cheboksary, March 23–24, 2019]. Cheboksary: Chuvashskiy gosudarstvennyy universitet imeni I.N. Ul'yanova Publ., 2019, pp. 18–31. (In Russian)
3. Grinin A. S., Novikov V. N. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety]. Moscow: FAIR-PRESS Publ., 2002, p. 28. (In Russian)
4. Titova T. S., Zabolotskaya K. A. Interaktivnaya karta logisticheskikh ob"ektov zheleznykh dorog [Interactive map of logistics facilities of railways]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection]. 2020, I. 2, pp. 3–6. (In Russian)
5. Titova T. S., Pirogova N. N. Otsenka effektivnosti provedeniya rabot po likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy [Evaluation of the effectiveness of work on the elimination of emergency situations]. *Professional'noe obrazovanie, nauka i innovatsii v XXI veke. sbornik trudov XII Sankt-Peterburgskogo kongressa* [Vocational education, science and innovation in the XXI century. collection of works of the XII St. Petersburg Congress]. 2018, pp. 238–239. (In Russian)
6. *Federal'nyy zakon ot 21 dekabrya 1994 g. N 68-FZ "O zashchite naseleniya i territoriy ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogenogo kharaktera"* [Federal Law of December 21, 1994 N 68-FZ "On the protection of the population and territories from natural and man-made emergencies"]. P. 13. (In Russian)
7. *MChS Rossii. Ministerstvo Rossiyskoy Federatsii po delam grazhdanskoj oborony, chrezvychaynym situatsiyam i likvidatsii posledstviy stikhiynykh bedstviy* [EMERCOM of Russia. Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief]. Available at: <http://www.mchs.gov.ru/>. (In Russian)
8. *O sostoyanii zashchity naseleniya i territoriy Rossiyskoy Federatsii ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogenogo kharaktera v 2019 g. : gosudarstvennyy doklad* [On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2019: state report]. Moscow: MChS Rossii; FGBU VNII GOChS (FTs) Publ., 2020. 259 p. (In Russian)
9. *O sostoyanii zashchity naseleniya i territoriy Rossiyskoy Federatsii ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogenogo kharaktera v 2018 g. : gosudarstvennyy doklad* [On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2018: state report.]. Moscow: MChS Rossii; FGBU VNII GOChS (FTs) Publ., 2019. 344 p. (In Russian)
10. *O sostoyanii zashchity naseleniya i territoriy Rossiyskoy Federatsii ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogenogo kharaktera v 2020 g. : gosudarstvennyy doklad* [On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2020: state report]. Moscow: MChS Rossii; FGBU VNII GOChS (FTs) Publ., 2021. 264 p. (In Russian)
11. Konogray O. A. Gruzovye perevozki v usloviyakh krizisa, vyzvannogo pandemiy covid-19 [Freight transportation during the crisis caused by the covid-19 pandemic]. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie* [Innovations. The science. Education]. 2021, I. 45, pp. 734–740. (In Russian)
12. Korovyakovskiy E. K., Bolotin V. A., Yankovskaya N. G., Slobodchikov N. A. *Perevozka gruzov na osobykh usloviyakh* [Transportation of goods on special conditions]. St. Petersburg, 2014. (In Russian)

Received: April 24, 2022

Accepted: June 06, 2022

Author's information:

Nona G. KOBOZEVA — Senior Lecturer;
nona-kobozeva@yandex.ru

УДК 556,16+556,535.2,3,5 (282.256.74)

Неблагоприятные и опасные гидрологические явления р. Яны в районе поселка Усть-Куйга

М. В. Третьяков, А. А. Пискун, О. В. Муждаба

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

Для цитирования: Третьяков М. В., Пискун А. А., Муждаба О. В. Неблагоприятные и опасные гидрологические явления р. Яны в районе поселка Усть-Куйга // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 464–478. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-464-478

Аннотация

Цель: Обобщение характеристик гидрологического режима р. Яны и оценка неблагоприятных и опасных гидрологических явлений в районе поселка Усть-Куйга. Поселок является важной транспортной перевалочной базой между тремя якутскими улусами: Усть-Янским, Верхоянским и Эвено-Бытантайским и перспективен в плане развития основных отраслей хозяйства Республики Саха, включая разработку месторождений золота. **Методы:** Сбор, систематизация, обработка и статистический анализ опубликованных материалов гидрологических наблюдений на посту Усть-Куйга и на ближайших постах, расположенных на р. Яне и имеющих продолжительные ряды данных наблюдений. **Результаты:** Получены характеристики экстремальных уровней и расходов воды в различные фазы гидрологического режима, данные о ледовых явлениях и сведения о крупнейших наводнениях, вызывающих затопление территории поселка. Установлено, что число лет с малой продолжительностью открытого русла (от 93 до 98 суток), наименее благоприятной для доставки грузов речным транспортом, составляет 20 % за 1938–1989 гг. Случаи полного прекращения стока воды р. Яны на сутки и более составляет 40 % (21 год) периода наблюдений (52 год). Промерзание русла зимой и отсутствие стока воды в течение 30 суток и более отмечалось в 28 % случаев. Наибольшая продолжительность (109 суток) периода без стока воды зафиксирована в 1975 г. Крупнейшее наводнение в Усть-Куйге произошло в июне 1996 г., когда был затоплен весь поселок. По высоте затопления оно превзошло крупное наводнение 1968 г. на 1,3–1,4 м. **Практическая значимость:** Результаты работы могут найти применение при выполнении инженерно-гидрологических изысканий, проектировании, строительстве и эксплуатации хозяйственных объектов в районе поселка Усть-Куйга. Полученная гидрологическая информация востребована речным и автомобильным транспортом, обеспечивающим деятельность предприятий в поселке.

Ключевые слова: Яна, Усть-Куйга, гидрологический режим, уровень воды, расход воды, ледовое явление, наводнение, затопление поселка, опасное явление.

Введение

В соответствии с государственной политикой Российской Федерации Арктическая зона рассматривается как стратегическая ресурсная база, рациональное использование которой направлено на ускорение экономического роста страны [1]. В настоящее время в пределах Арктики реализуется более 160 мероприятий и инвестиционных проектов, при этом более 90 % финансирования приходится на развитие транспортной инфраструктуры, энергетики, добывающей и перерабатывающей промышленности, а также судостроения [2].

В условиях активного освоения Арктической зоны РФ обеспечение техносферной безопасности, включающей в том числе и постоянную готовность к противодействию неблагоприятным и опасным гидрологическим явлениям, а также меры по предупреждению возникновения чрезвычайных ситуаций приобретает особую актуальность. Высокие и низкие уровни воды, ледовые заторы, половодья, паводки и другие виды опасных гидрологических явлений являются серьезным препятствием для развития промышленности, транспорта и ведения хозяйственной деятельности в уникальном арктическом регионе. В связи с этим необходима организация целенаправленного мониторинга — непрерывного процесса поступления и анализа информации о состоянии каждого объекта техносферы, системы принятия решений и их реализации, направленных на обеспечение требуемого уровня техносферной безопасности. Одним из таких объектов, безусловно, является горнодобывающий и энергетический промышленно-хозяйственный комплекс, ныне развивающийся на муниципальных территориях поселка Усть-Куйга на р. Яне.

Река Яна — одна из больших рек Восточной Сибири, образуется слиянием рек Дулгалах и Сартанг, берущих начало на северном склоне Верхоянского хребта. Река протекает по территории Якутии в направлении с юга на север и впадает

в Янский залив моря Лаптевых (рис. 1). Длина реки составляет 1490 км, площадь водосбора — 238 000 км² [3]. Поселок Усть-Куйга расположен в месте впадения правобережного притока — р. Куйга, впадающего в Яну на расстоянии 349 км от устья (морского края дельты) [3]. Площадь водосбора в створе гидрологического поста Усть-Куйга, находящего в 2 км ниже (349 км от устья), равна 219 000 км² [4], что составляет 92 % от общей площади водосбора реки. Поселок Усть-Куйга находится в зоне вечной мерзлоты. Климат — субарктический [5].

Поселок Усть-Куйга, основанный в 1951 г., в настоящее время превратился в важную перевалочную базу между тремя улусами: Усть-Янским, Верхоянским и Эвено-Бытантайским. Предприятия поселка работают на обеспечении основных, базовых для Якутии отраслей народного хозяйства. Это в первую очередь переработка грузов, поступающих с реки Лены и доставляемых по программе северного завоза в Усть-Куйгу в период летней навигации речным транспортом (продукты питания, топливо, ГСМ и другие важные грузы), а в период зимника — доставка грузов из Усть-Куйги автомобильным транспортом в другие населенные пункты района.

Среди действующих транспортных предприятий в поселке Усть-Куйга функционируют ООО «Янское речное пароходство», аэропорт, автотранспортные предприятия: ГУП АД «Куйгинское», ООО «Куйга Автодор», ООО «Усть-Куйгинское». Имеется нефтебаза, дизельная электростанция и различные учреждения местного улусного значения (школа, детский сад, больница, дом культуры и т. п.).

Поселок перспективен в плане развития основных отраслей хозяйства Республики Саха — рядом находятся богатые месторождения золота и других полезных ископаемых, есть возможность открытия рыбопромысловых и рыбоперерабатывающих предприятий [5]. Учитывая

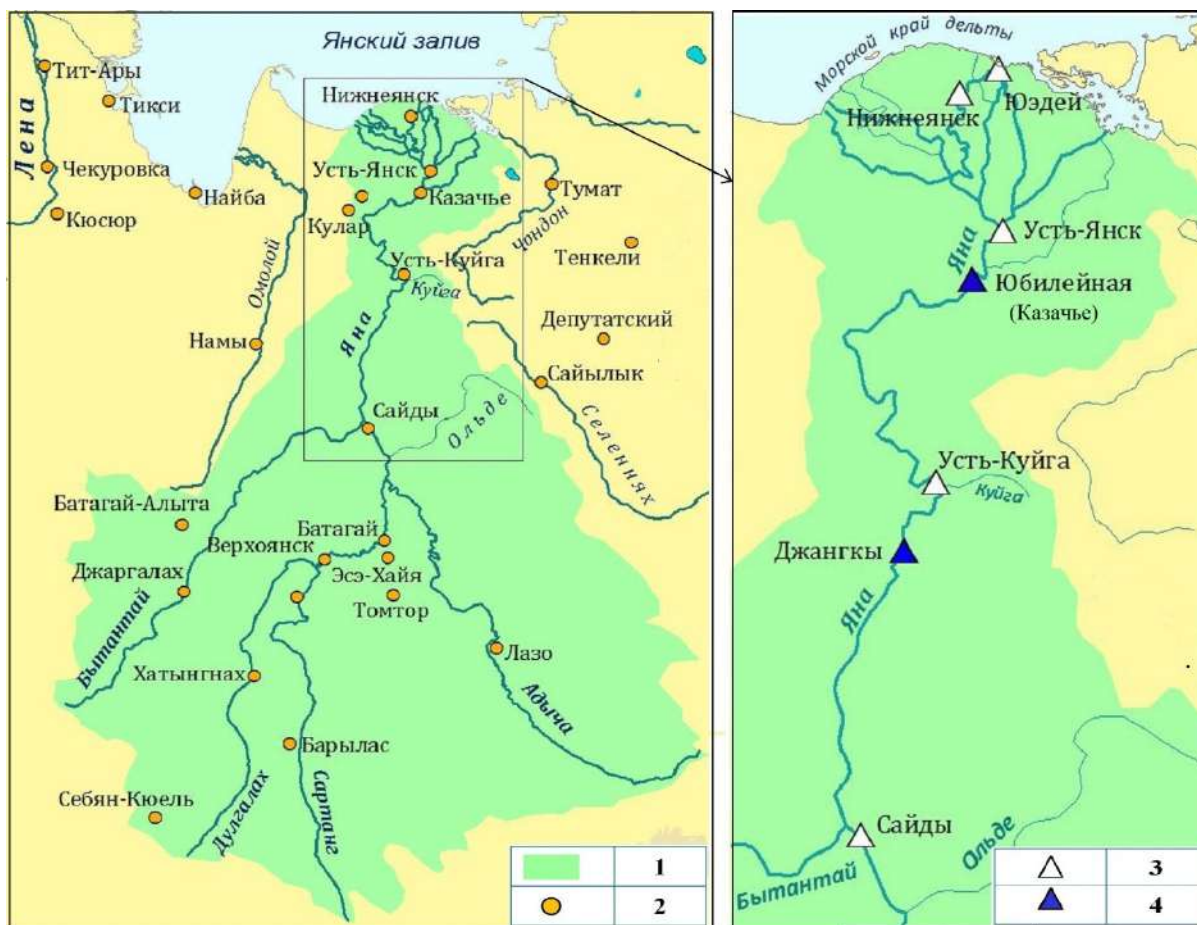


Рис. 1. Схема бассейна р. Яны:

1 — водосбор реки; 2 — населенные пункты; 3 — уровенные гидрологические посты;
4 — стоквые гидрологические посты

возрастающие потребности района в электроэнергии «Росатом» планирует начать в Усть-Куйге строительство АЭС малой мощности в 2024 г. Для обеспечения развивающейся добывающей промышленности предполагается дальнейшее совершенствование транспортной инфраструктуры.

Проектирование, строительство и эксплуатация объектов хозяйственного назначения в поселке Усть-Куйга требуют надежного инженерно-гидрологического обоснования. Недоучет экстремальных проявлений гидрологического режима на стадии проектирования хозяйственных объектов, расположенных в зоне возможного затопления, может привести к техногенным

происшествиям и возникновению чрезвычайной ситуации.

В статье остановимся на характеристике неблагоприятных и опасных гидрологических явлений р. Яны в районе поселка Усть-Куйга, могущих оказать негативное влияние на хозяйственную деятельность [6]. Среди них рассмотрим явления, для характеристики которых имеется необходимая гидрологическая информация [3, 4, 7–13]. Применительно к поставленной задаче к таким явлениям относятся следующие:

- раннее ледообразование;
- заторы;
- перемерзание русла, вследствие которого прекращается сток воды;

ТАБЛИЦА 1. Гидрологические посты и годы, за которые использованы данные наблюдений для расчета характеристик гидрологического режима

Гидрологический пост	Расстояние от устья, км	Период работы	Периоды наблюдений		
			Уровень воды	Ледовые явления	Расход воды
Сайды	535	1993–н. в.	1994–2019	1994–2019	—
Джангкы	381	1937–1989	1938–1989	1937–1989	1938–1989
Усть-Куйга, сезонный	347	2002–н. в.	2002–2019	2002–2019	—
Юбилейная	157	1943–н. в.	1946–2019	1946–1940, 1943–2019	1972–2007
Казачье	146	1927–1947		1927–1947	—
Усть-Янск	124	1946–1988	—	1951–1956, 1958–1960, 1962–1966	—
Нижнеянск	22	1969–н. в.	—	1970–1995, 1999–2000, 2003–2006, 2008–2019	—
Юэдей	8	1952–1994	—	1954–1957, 1968–1993	—

Примечание: Прочерк означает, что данные наблюдений не использовались либо отсутствуют; н. в. — по настоящее время.

– половодья и паводки с исключительно высокими подъемами уровня, вызывающими наводнения.

Изученность гидрологического режима

Гидрологические наблюдения на посту Усть-Куйга начаты с 1 мая 2002 г. Пост речной, расположен на территории речного порта в 1,3 км ниже устья р. Куйга. Пост сезонный, действует с мая по сентябрь. Наблюдения ведутся над уровнем воды и ледовыми явлениями. Отметка нуля поста 0,00 м условно. Критический уровень, превышение над которым приводит к материальному ущербу, составляет 1020 см над нулем поста [4].

Учитывая сравнительно непродолжительный период наблюдений на данном посту, в необходимых случаях к анализу привлекались материалы наблюдений на соседних постах Джангкы, Сайды, Юбилейная, Усть-Янск, Нижнеянск, Юэдей. В табл. 1 приведена информация об изученности элементов гидрологического режима, использованных при анализе.

Анализ материалов и полученные результаты

Одним из важнейших факторов, влияющих на доставку грузов с реки Лены в порт Усть-Куйга

водным транспортом, является продолжительность периода навигации. Участок р. Яны от Усть-Куйги до выхода в море ориентирован в меридиональном направлении, вследствие чего процесс вскрытия реки происходит с юга на север, а процесс замерзания осенью — с севера на юг. То есть морской край дельты р. Яны очищается ото льда позже, а замерзает раньше, чем расположенный выше по течению участок реки. Так, средняя дата полного очищения акватории ото льда в Юэде, расположенном наиболее близко к морскому краю дельты (8 км), приходится на 15 июня, в Усть-Куйге — 31 мая. Средняя дата наступления первых осенних ледовых явлений в Юэдее приурочена к 25 сентября, в Усть-Куйге — к 1 октября. Из этого следует, что продолжительность навигационного периода в целом на участке от устья реки до Усть-Куйги определяется продолжительностью безледного периода на морском крае дельты. Режим вскрытия и замерзания в этом районе можно оценить по данным наблюдений на посту Юэдей.

На рис. 2 показаны значения продолжительности периода открытого русла (далее — ОР) за годы наблюдений в Юэдее.

Как следует из рис. 2, самый короткий период ОР в Юэдее составил 93 суток (1987 г.). Несколько

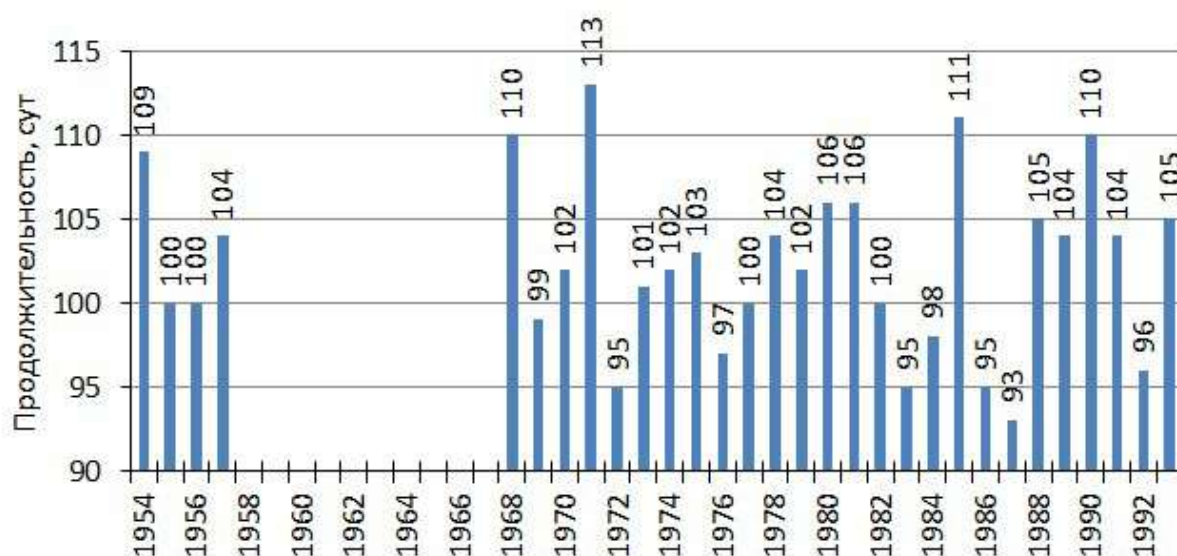


Рис. 2. Продолжительность периода открытого русла в Юэдее

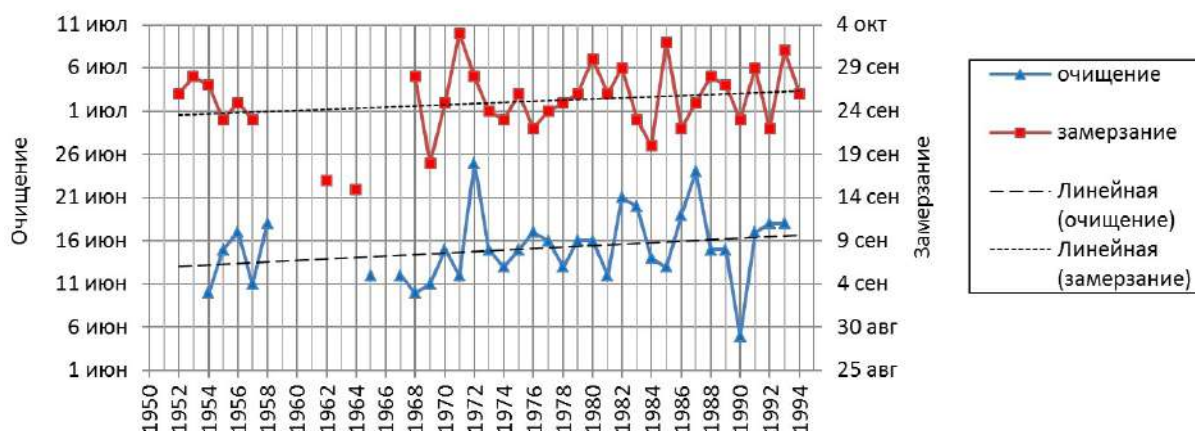


Рис. 3. Даты полного очищения ото льда и первая дата осенних ледовых образований в Юэдее

большая продолжительность периода ОР (от 95 до 98 суток) отмечена в 1972, 1976, 1983, 1987, 1992 гг. Число лет с продолжительностью ОР от 93 до 98 сут занимает 20 % от всего ряда наблюдений на посту Юэдей (30 лет).

Наиболее поздняя дата полного очищения ото льда в Юэдее, которая определяет возможность начала навигации на р. Яне, отмечалась 25 июня 1972 г. (рис. 3). Самая ранняя дата начала осенних ледовых образований, которая характеризует окончание навигационного периода на Яне, отмечена в Юэдее 15 сентября 1964 г. При этом про-

должительность ОР в 1972 г. составила 95 дней (на 7 дней короче средней продолжительности за многолетие). За 1964 г. получить сведения о продолжительности ОР в Юэдее невозможно из-за отсутствия наблюдений за ледовой обстановкой в осенний период этого года.

Подчеркнем, что характеристики продолжительности ОР, определяемой датами полного очищения русла ото льда и начала осенних ледовых явлений, подробно приведены по наблюдениям в Юэдее потому, что названные ледовые явления, происходящие именно в этом районе, лимити-

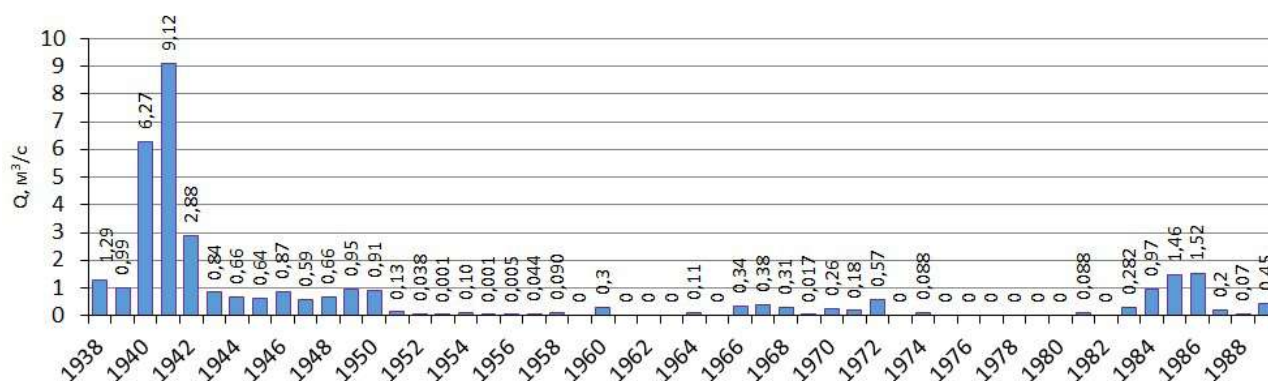


Рис. 4. Многолетний ход наблюдаемых минимальных 30-суточных зимних расходов воды в Джангкы за 1938–1989 гг.

руют параметры начала и окончания навигации по доставке грузов водным транспортом с реки Лены в пос. Усть-Куйга.

Что касается непосредственно Усть-Куйги, то самым коротким периодом ОР (114 сут) оказался 2002 г. Самая поздняя дата полного очищения русла реки ото льда отмечена 9 июня 2003 г., наиболее ранняя дата начала осенних ледовых явлений — 26 сентября 2002 г.

К опасным явлениям относятся навалы льда [6], образующиеся на берегу в процессе вскрытия реки. За 19-летний период наблюдений в Усть-Куйге такое явление отмечено 5–6 июня 2011 г.

Опасным гидрологическим явлением, характерным для р. Яны, является перемерзание русла, вследствие которого прекращается сток воды. Поскольку в Усть-Куйге наблюдения в зимний период не проводились, воспользуемся данными наблюдений на соседнем посту Джангкы, расположенном в 34 км выше по течению.

Анализ данных по зимним минимальным суточным расходам воды в Джангкы за 1938–1989 гг. показал, что полное прекращение стока воды р. Яны на сутки и более отмечалось в 21 годах, что составляет 40 % от 52 лет наблюдений. В остальные годы сток воды хотя и не прекращался, но значения минимального среднесуточного расхода оставались крайне низкими.

Подобная ситуация отмечается не только для минимальных среднесуточных расходов, но и для минимальных среднемесячных зимних расходов, полученных осреднением за непрерывный 30-суточный период в соответствии с рекомендациями [14]. Отсутствие стока воды в течение 30 суток и более отмечалось в 28 % случаев за годы наблюдений (рис. 4). При этом в 1973, 1975, 1978 гг. сток воды прекращался на 107, 109 и 102 суток соответственно. Отсутствие стока обычно приходится на период январь — май.

Для сравнения отметим, что в летне-осенний период самый низкий из наблюдаемых среднесуточных расходов воды на посту Джангкы составил 145 м³/с (1971 г.). Самая низкая величина минимального 30-суточного расхода воды (518 м³/с) приходится на 1956 г. Среднее значение данной характеристики равно 558, наибольшее — 1250 м³/с (1959 г.).

Остановимся на сведениях о крупнейших наводнениях в районе Усть-Куйги, полученных на основе данных наблюдений на гидрологическом посту и соседних постах на р. Яне, а также информации из ресурсов интернета [15].

Согласно сведениям Гидрологического ежегодника за 2010 г. [4], критическим уровнем ($H_{кр}$) на посту Усть-Куйга считается значение 1020 см над нулем поста. Анализ данных наблюдений за

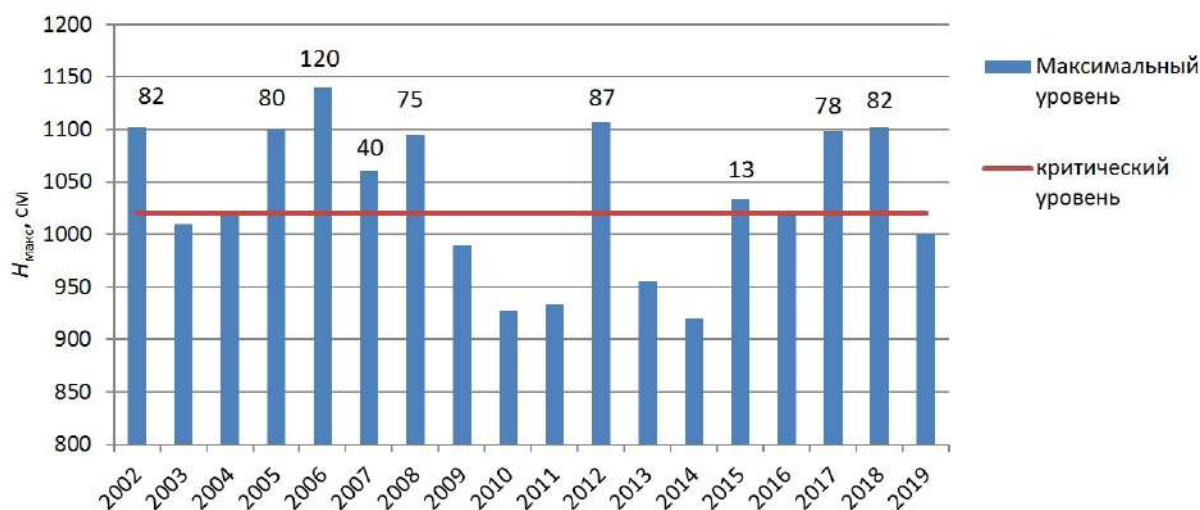


Рис. 5. Максимальные наблюдаемые годовые уровни на посту Усть-Куйга и их превышения (подписи над столбцами) над критическим уровнем, равным 1020 см

уровнем воды в Усть-Куйге показал, что случаи превышения максимального годового уровня воды над критическим отмечены 9 раз за 18 лет. Величина этих превышений составляла от 13 до 120 см (рис. 5).

Особенность режима максимальных уровней на р. Яне заключается в том, что на продолжительном спаде половодья часто наблюдаются существенные пилообразные колебания уровня (рис. 6). Они могут превышать уровни, происхождение которых связано со снеготаянием. В некоторых случаях это может быть связано с несовпадением по времени паводочных волн на основной реке и ее крупных притоках.

В соответствии с отмеченными особенностями режима уровней, даты прохождения пика уровня в Усть-Куйге варьируют от 19 мая (2012 г.) по 30 июля (2015 г.). Даты максимальных годовых уровней, превышающих критические значения ($H_{кр}$), приходятся на период с 4 июня (2007 г.) по 30 июля (2015 г.).

В 2002–2019 гг. за время действия гидрологического поста в Усть-Куйге максимум уровня (1140 см) наблюдался 5 июля 2006 г. Он оказался на 120 см выше критического уровня. В Гидрологическом ежегоднике [4] за 2010 г. отмечено, что

при прохождении волны половодья были затоплены нефтебаза и другие объекты, расположенные в пониженных местах.

По среднесуточным уровням определена продолжительность стояния уровня выше критических значений. Она составила от 1 до 5 суток (табл. 2).

Учитывая сравнительно непродолжительный период наблюдений за уровнем воды в Усть-Куйге, для выявления дополнительных сведений о крупнейших наводнениях в районе были привлечены данные по другим уровенным постам на р. Яне, а также ресурсы интернета [15].

В интернет-источнике [15] выложен любительский видеofilm, в котором представлены видеозаписи, по-видимому, одного из крупнейших наводнений в Усть-Куйге, отснятые с 16 по 22 июня 1996 г. Из комментария автора видеofilmа следует, что уровень воды достиг пика ночью 21 июня 1996 г. Был затоплен весь поселок — на ул. Ленина вода стояла вровень с подоконниками первого этажа домов и полностью накрыла автомобиль «Москвич» на этой же улице. Прервалось электроснабжение, перестала работать пекарня и т. п.

Автор видеofilmа приводит одну важную для нас деталь — по его оценке, наводнение

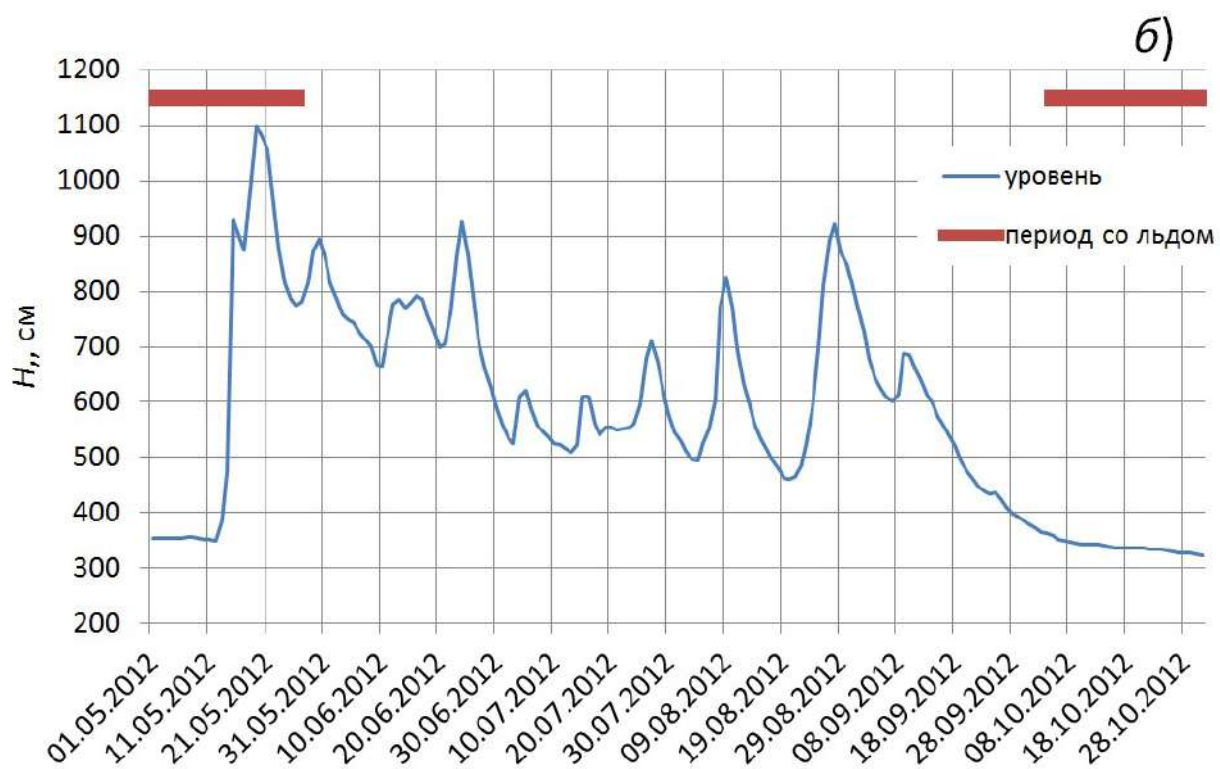
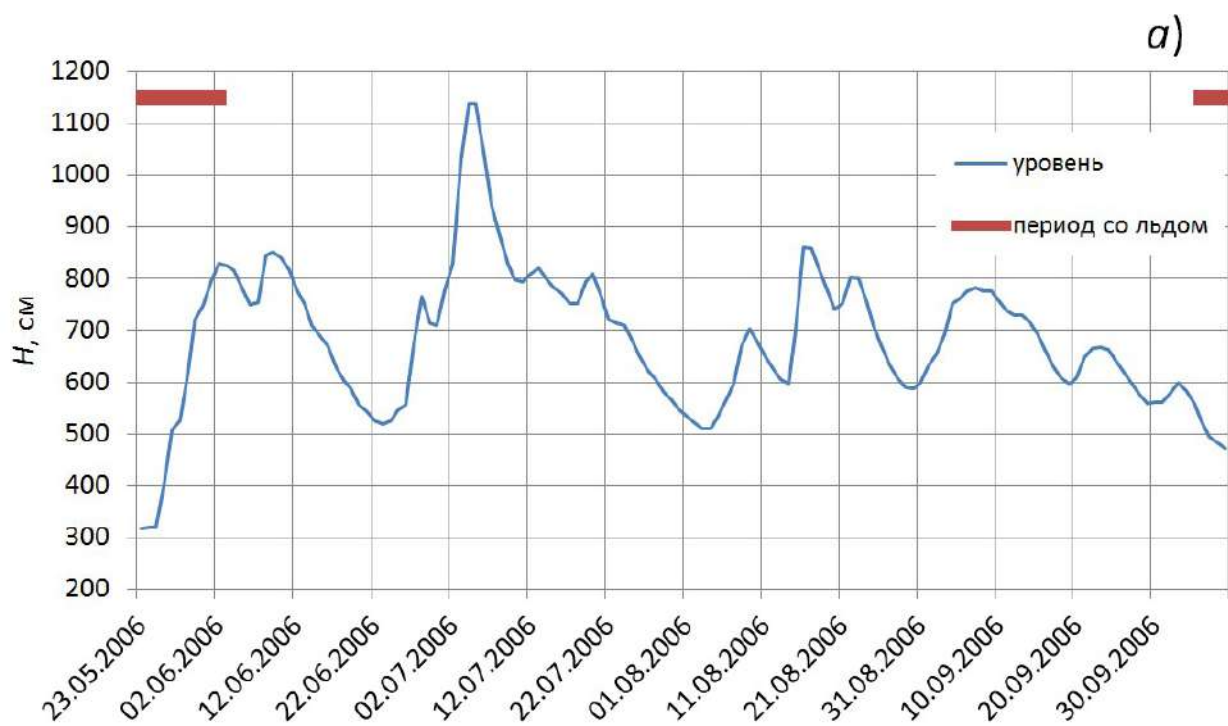


Рис. 6. Примеры колебаний среднесуточных уровней воды на посту Усть-Куйга в 2006 (a) и 2012 (б) гг.

ТАБЛИЦА 2. Характеристики максимальных годовых уровней ($H_{\text{макс}}$) по наблюдениям в Усть-Куйге за 2002–2019 гг.

Дата $H_{\text{макс}}$	Превышение $H_{\text{макс}}$ над $H_{\text{кр}}$	Периоды с превышением $H_{\text{макс}}$ над $H_{\text{кр}}$	Продолжительность, сут
8 июня 2002 г.	82	5–9 мая	5
28 июля 2005 г.	80	27–30 июля	4
	(60)	(2–6 августа)	(5)
5 июля 2006 г.	120	3–6 июля	4
4 июня 2007 г.	40	3–4 июня	2
19 июня 2008 г.	75	18–20 августа	3
30 июля 2015 г.	13	30 июля	1
28 июня 2017 г.	(16)	(18 июня)	(1)
	78	28 июня	1
2 июня 2018 г.	82	30 мая — 2 июня	4

Примечание: В скобках указаны среднесуточные уровни для случаев, когда, кроме максимального годового пика, наблюдалось еще одно — меньшее по величине — превышение уровня над критическим значением ($H_{\text{кр}}$).

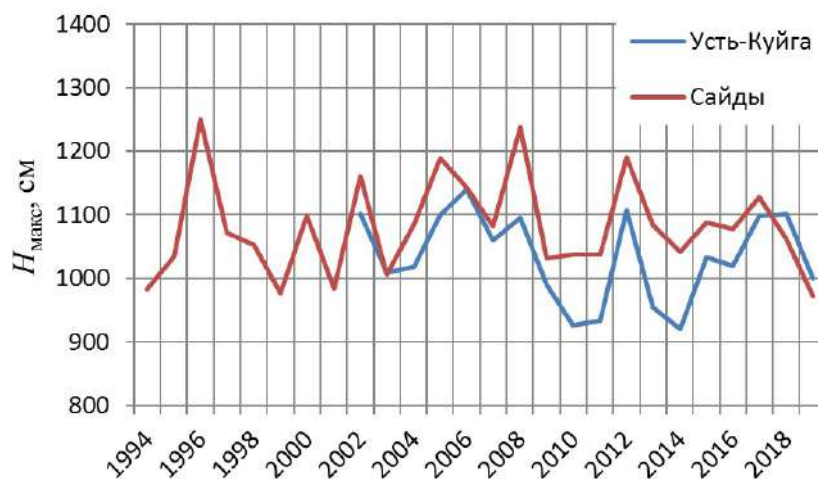


Рис. 7. Максимальные годовые уровни на постах Усть-Куйга и Сайды

1996 г. по высоте затопления на 1,3–1,4 м произошло крупное наводнение 1968 г. К сожалению, уровеньный пост в Усть-Куйге начал работу только с 2002 г., поэтому данные регулярных наблюдений в период отмеченных крупных наводнений непосредственно по Усть-Куйге отсутствуют.

Воспользуемся данными смежных постов. В 1996 г. наблюдения за уровнем выполнялись на соседних постах — Сайды (188 км выше по течению р. Яны) и Юбилейная (190 км ниже по течению относительно Усть-Куйги).

На рис. 7 представлен совмещенный ход максимальных годовых уровней на постах Усть-Куйга и Сайды. Как видно из рисунка, максимальные уровни на указанных постах хорошо согласуются. Коэффициент корреляции составляет 0,71. График на рис. 7 показывает, что в 1996 г. на посту Сайды наблюдался наибольший максимальный уровень, что подтверждает наличие катастрофического уровня в Усть-Куйге.

Связь максимальных годовых уровней Усть-Куйги с Юбилейной оказалась низкой, коэффициент корреляции составил всего 0,27.

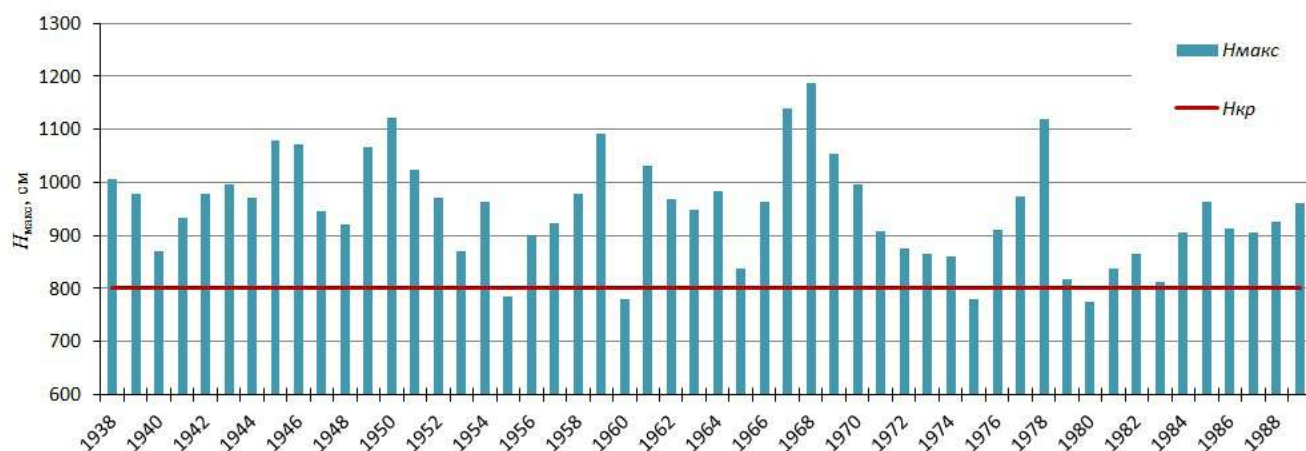


Рис. 8. Максимальные годовые уровни воды в Джангкы. При уровне 800 см начинается затопление пос. Усть-Куйга, он принят в качестве критического ($H_{кр}$)

В период наводнения в Усть-Куйге в 1968 г. наблюдения за уровнем велись на посту Джангкы, расположенном в 34 км от Усть-Куйги выше по течению р. Яны. Согласно сведениям [7], «при уровне Джангкы 800 см начинается затопление пос. Куйга». Это важное свидетельство позволяет использовать весь ряд наблюдений за уровнем в Джангкы (1938–1989 гг.) для дополнительного анализа характеристик наводнений в Усть-Куйге.

На диаграмме рис. 8 подтверждается наличие в 1968 г. наивысшего из максимальных уровней в Джангкы за весь период наблюдений на данном посту (1188 см над нулем поста). На пике половодья 23 мая 1968 г. превышение уровня в Джангкы над критическим (800 см), вызывающим начало затопления Усть-Куйги, составило 388 см. По среднесуточным данным [9] следует, что продолжительность стояния уровня над критическим достигла 10 дней — с 21 по 30 мая. При этом уровень, превышающий критическое значение на 300 см, держался 6 дней.

Как видно из рис. 8, превышение максимальных уровней в Джангкы над значением 800 см, критичным для Усть-Куйги, отмечалось почти ежегодно, за исключением четырех лет.

Анализ максимальных годовых данных по уровням Джангкы за весь период наблюдений (1938–1989 гг.) показал, что превышение уровня над критическим на 300 см и более отмечалось, кроме 1968 г., в 1950 г. (321 см), 1967 г. (340 см), 1978 г. (320 см).

Превышения над $H_{кр}$ в диапазоне 200–299 см зафиксированы в 7 годах, в диапазоне 100–199 см — в 25 годах. В отдельные годы в Джангкы наблюдалось более одного случая превышения уровня над критическим. Так, в диапазоне превышений 100–199 см к максимальным годовым превышениям добавилось по одному случаю в 1969, 1978, 1988, 1989 гг., по 2 случая в 1951 и 1961 гг., 3 случая с интервалом около месяца — в 1985 г.

Продолжительность стояния уровня Джангкы над критическим значением 800 см определялась по среднесуточным данным Гидрологических ежегодников [2, 4, 5]. Наибольшая продолжительность стояния уровня выше $H_{кр}$ наблюдалась в 1959 г. (28 суток); превышение уровня над $H_{кр}$ составило 283 см. Продолжительность стояния уровня выше $H_{кр}$ от 10 до 25 суток отмечена в 16 годах.

Случаи стояния уровня выше критической отметки 800 см в Джангкы по всему ряду наблю-

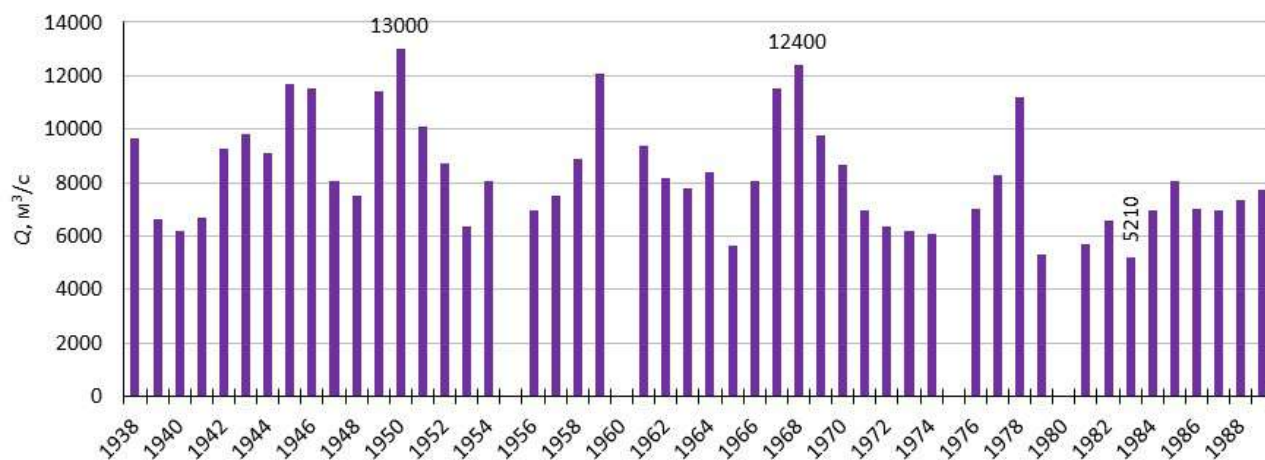


Рис. 9. Максимальные расходы воды на посту Джангкы при уровнях выше 800 см, с которых начинается затопление пос. Усть-Куйга

дений отмечались в период с 23 мая по 26 августа. Большинство случаев (21) наблюдалось в июне, несколько меньше — в июле (17).

Поскольку в Усть-Куйге не проводились наблюдения за расходами воды, для оценки максимальных расходов в период наводнений воспользуемся данными по соседнему посту Джангкы за период 1938–1989 гг.

На рис. 9 показаны значения максимальных расходов воды, приуроченных к пику максимального уровня при наводнениях. Даты проявления пиков максимальных годовых расходов и уровней, превышающих $H_{кр}$, совпадают за исключением трех лет.

По многолетней кривой зависимости расхода (Q) от уровня воды (H) для Джангкы установлено, что уровню 800 см над нулем данного поста соответствует расход воды $4970 \text{ м}^3/\text{с}$. То есть по достижении этого расхода начинается затопление пос. Усть-Куйга.

На диаграмме рис. 9 значения максимальных расходов Джангкы лежат в пределах 5210 (1983 г.) — $13000 \text{ м}^3/\text{с}$ (1950 г.). При этом в момент наводнения в пос. Усть-Куйге в 1968 г. расход воды на пике половодья составил $12400 \text{ м}^3/\text{с}$.

В описании поста Усть-Куйга в гидрологических ежегодниках [4] не представлена информа-

ция о заторах в районе поста в период весеннего ледохода. Отмечено только, что в зимний период выше поста образуются наледи.

В описании поста Джангкы [9] отмечено, что в 1,5 км выше и в 200 м ниже поста расположены острова, в 1,3 км выше — перекат. Зимой река на перекате промерзает, наблюдаются наледи. Учитывая такие факторы, как значительная извилистость реки, промерзание русла, наличие островов и переката вблизи поста, а также характерные для р. Яны в целом явления заторообразования [7], логично предположить, что ледяные заторы выше и ниже поста имели место.

Это подтверждается данными каталога заторных и зажорных участков рек СССР [16], где опубликованы обобщенные сведения об указанных явлениях для участка 370–388 км от устья р. Яны за период 1938–1970 гг.: за 33 года наблюдений на посту Джангкы число лет с заторами в период весеннего ледохода составило 19 (58 % от всего ряда лет). На нижележащем участке р. Яны (14–158 км) по наблюдениям в с. Казачьем число лет с заторами за 24 года наблюдений составило 100 %. В каталоге отмечено, что особенно мощные заторы бывают при одновременном вскрытии рек Яны и Адычи.

Образование ледяных заторов как характерное явление в период весеннего ледохода отмечено

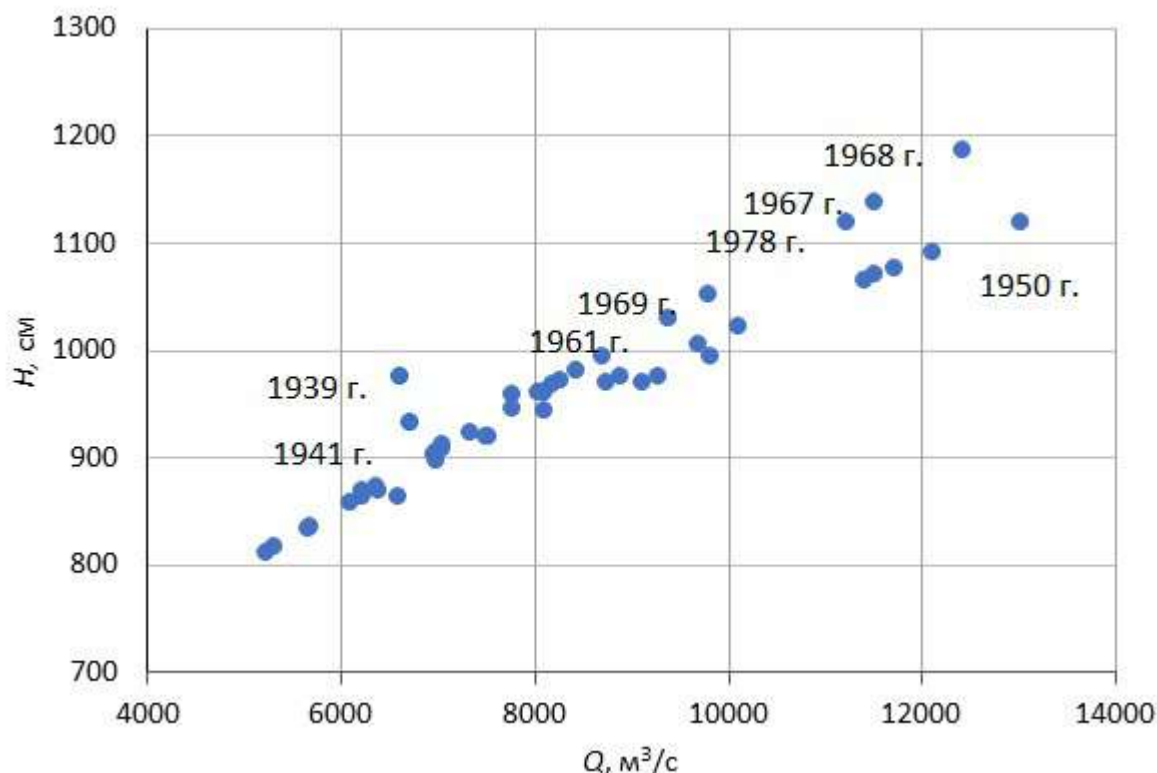


Рис. 10. Связь максимальных годовых уровней и расходов воды по наблюдениям на посту Джангкы за 1938–1989 гг.

для поста Сайды [4]. Такое же явление наблюдается в районе поста Юбилейная, а именно: в 3–4 км ниже река имеет значительный изгиб, где ежегодно образуются мощные заторы льда [4].

Поскольку заторы приурочены к весеннему ледоходу, отметим даты начала ледохода и очищения акватории ото льда, охватывающие период возможного образования заторов. По наблюдениям в Усть-Куйге (2002–2019 гг.) самая ранняя дата начала весеннего ледохода приходится на 14 мая 2013 г., наиболее поздняя — на 4 июня 2003 г. Самое раннее очищение реки ото льда отмечено 24 мая в 2010 и 2013 гг., наиболее позднее — 9 июня 2003 г.

В Джангкы за период 1938–1989 гг. самое раннее начало ледохода зафиксировано 16 мая 1984 г., наиболее позднее — 8 июня 1987 г. Самое

раннее полное очищение ото льда наблюдалось 24 мая 1943 и 1968 гг., наиболее позднее — 13 июня 1987 г.

На рис. 10 представлен график связи максимальных годовых уровней и расходов воды по наблюдениям на посту Джангкы за 1938–1989 гг. Подчеркнем, что уровни и расходы на данном графике относятся к случаям превышения уровня над $H_{кр}$, равным 800 см, при котором начинается затопление поселка Усть-Куйга.

График позволяет визуально выделить годы, в которые при одном и том же расходе воды максимальные уровни были выше, что может свидетельствовать об их заторном происхождении, если принять, что данные наблюдений за расходом и уровнем достоверны. Наиболее четко выделяются 1939 и 1941 гг.

Заключение

Представленные в данной работе результаты не исчерпывают всех возможных характеристик опасных и неблагоприятных гидрологических явлений на р. Яне в районе пос. Усть-Куйга. Они охватывают лишь те явления, о которых имеется доступная в настоящее время информация. Тем не менее, результаты анализа этой информации могут быть использованы при решении первоочередных задач по организации гидрологического мониторинга в районе пос. Усть-Куйга для круглогодичного обеспечения государственных, хозяйственных и коммерческих организаций надежной информацией, являющейся основой при проведении мероприятий для обеспечения техносферной безопасности.

Библиографический список

1. Указ Президента РФ «Об Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года» от 5 марта 2020 г. № 164. — URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45255>.
2. Иванченко Д. С. Развитие промышленности и технологий в Арктике / Д. С. Иванченко, Е. С. Каргамышева // Молодой ученый. — 2016. — № 28(132). — С. 333–336. — URL: <https://moluch.ru/archive/132/36751>.
3. Ресурсы поверхностных вод СССР // Гидрологическая изученность. — Л.: Гидрометеоздат, 1966. — Т. 17. Лено-Индигирский район. — Вып. 7. Яна, Индигирка. — 328 с.
4. Государственный водный кадастр. Раздел 1. Поверхностные воды. Серия 2. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши (ЕДС). Ч. 1 и 2. Т. 1. Вып. 16. Бассейн Лены (среднее и нижнее течение), Хатанги, Анабара, Оленека, Яны, Индигирки. 1978–2019.
5. Усть-Куйга. — URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Усть-Куйга>.
6. РД 52.04.563—2013. Руководящий документ. Инструкция по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательными подразделениями. — СПб., 2013. — 49 с.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР. — Л.: Гидрометеоздат. 1972. — Т. 17. Лено-Индигирский район. — 652 с.
8. Гидрологический ежегодник. — 1939–1944. — Т. 7, 8. Бассейны морей Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского от р. Енисей до р. Колымы.
9. Гидрологический ежегодник. — 1945–1977. — Т. 8. Бассейны морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского. Вып. 0–7. Бассейн морей Лаптевых и Восточно-Сибирского до р. Колымы.
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики. С начала систематических наблюдений и до 1962 г. — Л.: Гидрометеоздат, 1967. — Т. 17. Лено-Индигирский район. — 448 с.
11. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики за 1963–1970 гг. — Л.: Гидрометеоздат, 1975. — Т. 17. Лено-Индигирский район. — 507 с.
12. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики за 1971–1975 гг. — Л.: Гидрометеоздат, 1979. — Т. 17. Лено-Индигирский район. — 508 с.
13. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши (МДС). — Л.: Гидрометеоздат, 1987. — Т. 1. Вып. 16. Бассейны Лены (среднее и нижнее течение), Хатанги, Анабара, Оленека, Яны, Индигирки — 596 с.
14. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. — Нижний Новгород: Вектор-ТиС, 2007. — 134 с.
15. Демян Е. Усть-Куйга 1996 г. «Потоп». — URL: https://my.mail.ru/mail/demyan_ukr/video/232/296.html.
16. Каталог заторных и зажорных участков рек СССР / Под ред. А. А. Соколова. — Л.: Гидрометеоздат, 1976. — Т. II. Азиатская часть СССР. — 151 с.

Дата поступления: 15.06.2022

Решение о публикации: 11.07.2022

Контактная информация:

ТРЕТЬЯКОВ Михаил Вячеславович — канд. геогр. наук; tmv@aari.ru

ПИСКУН Александр Александрович — канд. техн. наук; piskun@aari.ru

МУЖДАБА Ольга Валериевна — научн. сотрудник; aqua_olga@aari.ru

Unfavorable and Dangerous Hydrological Phenomena of the Yana River Near Ust-Kuyga Township

M. V. Tretyakov, A. A. Piskun, O. V. Muzhdaba

Arctic and Antarctic Research Institute, 38 Bering St., St. Petersburg, 199397, Russian Federation

For citation: Tretyakov M. V., Piskun A. A., Muzhdaba O. V. Unfavorable and Dangerous Hydrological Phenomena of the Yana River Near Ust-Kuyga Township // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 464–478. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-464-478

Summary

Purpose: Generalization of characteristics of the Yana River hydrological regimen and assessment of unfavorable and dangerous hydrological phenomena in the area of Ust-Kuyga township. The township is an important transport transshipment base between the three Yakut districts: Ust-Yanskiy, Verkhoyanskiy and Eveno-Bytantaiskiy, and is promising in terms of the development of the Sakha Republic main economic sectors, including development of gold deposits. **Methods:** Collection, systematization, processing and statistical analysis of published materials of hydrological observations at the Ust-Kuyga stand and at the nearest stands, located on the Yana River and having a long series of observation data. **Results:** Characteristics of water extreme levels and expenditures during different phases of hydrological regimen, data on ice phenomena and knowledge on the largest spate causing township flooding were obtained. It has been established that the number of years with open riverbed short duration (from 93 to 98 days), which's the least favorable for cargo delivery by river transport, constitutes 20% for the years of 1938–1989. The cases of the Yana River flow complete cessation during a day or more constitute 40% (21 years) for the observation period (52 years). The riverbed freezing in winter and absence of water flow during 30 days or more was marked in 28% of cases. The longest period (109 days) without water flow was recorded in 1975. The largest spate in Ust-Kuyga happened in June 1996 when the whole township was flooded. By flooding height, it exceeded huge spate of 1968 by 1.3–1.4 m. **Practical significance:** The work results can find a use in engineering-hydrological research implementation, planning, construction and exploitation of economic facilities in the area of Ust-Kuyga township. The obtained hydrological information is in demand by river and road transports which provide for enterprises activities in the township.

Keywords: Yana, Ust-Kuyga, hydrological regimen, water level, water expenditure, ice phenomenon, spate, township flooding, dangerous phenomenon.

References

1. *Ukaz Prezidenta RF «Ob Osnovakh gosudarstvennoy politiki Rossiyskoy Federatsii v Arktike na period do 2035 goda» ot 5 marta 2020 g. № 164* [Decree of the President of the Russian Federation “On the Fundamentals of the State Policy of the Russian Federation in the Arctic for the period up to 2035” dated March 5, 2020 No. 164]. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45255>. (In Russian)
2. Ivanchenko D. S., Kartamysheva E. S. Razvitie promyshlennosti i tekhnologiy v Arktike [Development of industry and technology in the Arctic]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2016, I. 28 (132), pp. 333–336. Available at: <https://moluch.ru/archive/132/36751>. (In Russian)
3. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Gidrologicheskaya izuchennost'. Leno-Indigirskiy rayon* [Resources of surface waters of the USSR. hydrological knowledge. Leno-Indigirsky district]. Gidrometeoizdat Publ., 1966, vol. 17. 328 p. (In Russian)
4. *Gosudarstvennyy vodnyy kadastr. Razdel 1. Poverkhnostnye vody. Seriya 2. Ezhegodnye dannye o*

rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi (EDS). Basseyn Leny (srednee i nizhnee techenie), Khatangi, Anabara, Oleneka, Yany, Indigirki [Resources of surface waters of the USSR. hydrological knowledge. Volume 17. Leno-Indigirsky district. Issue 7. Yana, Indigirka]. 1978–2019. (In Russian)

5. *Ust'-Kuyga* [Ust-Kuyga]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D1%81%D1%82%D1%8C-%D0%9A%D1%83%D0%B9%D0%B3%D0%B0>. (In Russian)

6. *RD 52.04.563–2013 Rukovodyashchiy dokument. Instruktsiya po podgotovke i peredache shtormovykh soobshcheniy nablyudatel'nyimi podrazdeleniyami* [RD 52.04.563–2013 Guiding document. Instructions for the preparation and transmission of storm messages by observation units]. St. Petersburg, 2013. 49 p. (In Russian)

7. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Leno-Indigirskiy rayon* [Resources of surface waters of the USSR. Volume 17. Leno-Indigirsky district]. Gidrometeoizdat Publ., 1972, vol. 17, 652 p. (In Russian)

8. *Gidrologicheskiy ezhegodnik. Basseyny morey Karskogo, Laptevykh i Vostochno-Sibirskogo ot r. Eniseya do r. Kolymy. 1939–1944* [Hydrological Yearbook. Vol. 7.8. The basins of the Kara, Laptev and East Siberian seas from the river. Yenisei to the river. Kolyma. 1939–1944]. (In Russian)

9. *Gidrologicheskiy ezhegodnik. Tom 8. Basseyny morey Laptevykh, Vostochno-Sibirskogo i Chukotskogo. Vyp. 0–7. Basseyn morey Laptevykh i Vostochno-Sibirskogo do r. Kolymy. 1945–1977* [Hydrological Yearbook. Vol. 8. Basins of the Laptev, East Siberian and Chukchi Seas. Issue. 0–7. The basin of the Laptev and East Siberian seas up to the river. Kolyma. 1945–1977]. (In Russian)

10. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki. S nachala sistemicheskikh nablyudeniy i do 1962 g. Leno-Indigirskiy rayon* [Surface water resources of the USSR. Basic hydrological characteristics. From the beginning of systematic observations to 1962. Leno-Indigirsky district]. Gidrometeoizdat Publ., 1967, vol. 17, 448 p. (In Russian)

11. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki za 1963–1970 gg. Leno-Indigirskiy rayon* [Surface water resources of the USSR. Main hydro-

logical characteristics for 1963–1970. Leno-Indigirsky district.]. Gidrometeoizdat Publ., 1975, vol. 17, 507 p. (In Russian)

12. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki za 1971–1975 gg. Leno-Indigirskiy rayon* [Surface water resources of the USSR. Main hydrological characteristics for 1971–1975. Leno-Indigirsky district]. Gidrometeoizdat Publ., 1979, vol. 17, 508 p. (In Russian)

13. *Gosudarstvennyy vodnyy kadastr. Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi (MDS) [State water cadastre. Long-term data on the regime and resources of terrestrial surface waters (MLS)]. Basseyny Leny (srednee i nizhnee techenie), Khatangi, Anabara, Oleneka, Yany, Indigirki* [Lena basins (middle and lower reaches), Khatanga, Anabar, Olenek, Yana, Indigirka]. Gidrometeoizdat Publ., 1987, vol. 1, I. 16, 596 p. (In Russian)

14. *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik pri nalichii dannykh gidrometricheskikh nablyudeniy* [Guidelines for determining the calculated hydrological characteristics in the presence of data from hydrometric observations]. Nizhniy Novgorod: «Vektor-TiS» Publ., 2007. 134 p. (In Russian)

15. Demyan E. *Ust'-Kuyga 1996 g. «Potop»* [Ust-Kuyga 1996 “Flood”]. Available at: https://my.mail.ru/mail/demyan_ukr/video/232/296.html. (In Russian)

16. *Katalog zatornykh i zazhornykh uchastkov rek SSSR* [Catalog of jam and jam areas of rivers of the USSR. Volume II. Asian part of the USSR]. Gidrometeoizdat Publ., 1976, vol. 2, 151 p. (In Russian)

Received: June 15, 2022

Accepted: July 11, 2022

Author's information:

Mikhail V. TRETIAKOV — PhD in Geography;
tmv@aari.ru

Alexander A. PISKUN — PhD in Engineering;
piskun@aari.ru

Olga V. MUZHDABA — Research Associate;
aqua_olga@aari.ru

УДК 621.941

Исследование напряженного состояния твердосплавного инструмента при токарной обработке железнодорожных колес

А. А. Воробьев¹, А. А. Крутько², Д. А. Седых²

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

²Омский государственный технический университет, Российская Федерация, 644050, Омск, Проспект Мира, 11

Для цитирования: Воробьев А. А., Крутько А. А., Седых Д. А. Исследование напряженного состояния твердосплавного инструмента при токарной обработке железнодорожных колес // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 479–488. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-479-488

Аннотация

Цель: Исследование напряженного состояния твердосплавного режущего инструмента при токарной обработке железнодорожных колес. **Методы:** Методами математического моделирования и Мичела, а также на основе термомеханического подхода оценено влияние температур и сил на износ и пластическую деформацию твердого сплава. **Результаты:** Оценено напряженно-деформированное состояние режущих пластин, а также проведен анализ формы износа, который выявил, что по задней поверхности происходит увеличение фаски износа преимущественно в окрестности вершины резца. Показано, что температура формоустойчивости и касательное напряжение являются факторами, влияющими на условия обработки и на интенсивность изнашивания режущей пластины. **Практическая значимость:** Определены зависимости, позволяющие назначить рациональные режимы обработки железнодорожных колесных пар при ремонте.

Ключевые слова: Профиль колеса, режущий клин, температура формоустойчивости, касательные напряжения, деформация.

Эксплуатация железнодорожного транспорта сопровождается износом и повреждением профиля поверхности катания железнодорожных колес при контакте «колесо — рельс». В ремонтных депо производится восстановление профиля преимущественно токарной обработкой с использованием режущего инструмента, оборудованного специальными вставками с закрепленными в них твердосплавными призматическими пластинами

($r = 4$ мм, $\varphi = 86^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\lambda = 6^\circ$, $\alpha = 6^\circ$). В качестве основных марок инструментальных материалов используются Т5К10 и Т14К8. Обработка проводится при режимах резания в следующих пределах: $s = 1,2\text{--}2,12$ мм/об, $t = 4\text{--}12$ мм, $v = 50\text{--}65$ м/мин [1–7]. В данных условиях инструмент обладает низкой стойкостью и надежностью, что приводит, согласно статистическим данным [8], к значительным простоям оборудования. Снижению

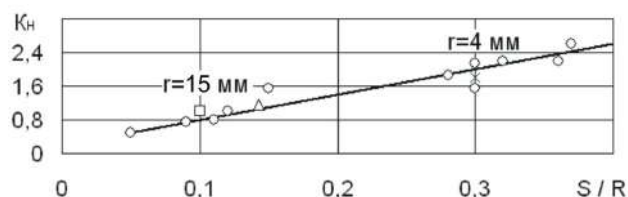


Рис. 1. Зависимость неравномерности износа призматической и чашечной пластин от отношения S/R при точении профиля колеса (285НВ)
 $s = 1,2\text{--}2,5$ мм/об

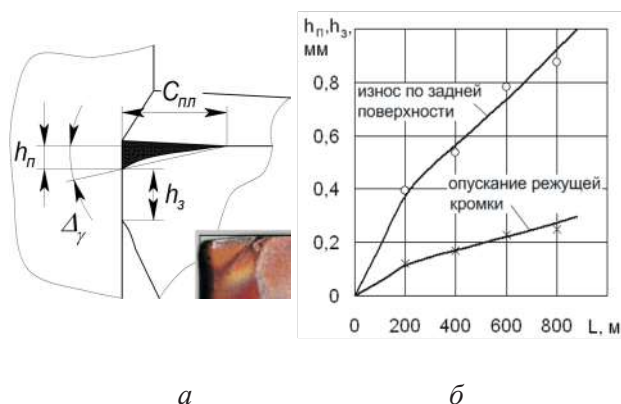


Рис. 2. Форма износа:
 a — и изменение характеристик изнашивания; b — при точении профиля колеса (285НВ) призматической пластиной
(Т14К8, $\varphi = 75^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $r = 4$ мм,
 $t = 8$ мм, $s = 1,2$ мм/об, $V = 38$ м/мин)

стойкости режущего инструмента также способствует увеличение и прочностных характеристик колесной стали (НВ до 3200–3600 МПа).

Обеспечение надежности, стойкости и экономии режущего инструмент возможно за счет выявления и учета факторов, влияющих на процессы, протекающие при резании. В представленной работе произведен анализ факторов, влияющих на процесс изнашивания и деформации режущего инструмента, на основе термомеханического подхода и метода Мичела с учетом условий обработки.

Для оценки напряженно-деформированного состояния режущих пластин в данной работе был проведен анализ формы износа, который выявил,

что на задней поверхности износ проявляется более интенсивно в области вершины резца. Анализ показал, что неравномерность изменения ширины фаски износа на задней поверхности

$\left(K_n = \frac{h_B}{h_T}\right)$ особенно выражена при повышенных

подачах (рис. 1). В то же время применение резцов с большим радиусом закругления вершины ($r = 15$ мм), например чашечных, обеспечивало снижение неравномерности износа задней поверхности режущей пластины вплоть до момента наступления катастрофического износа.

Наряду с неравномерным износом задней поверхности режущей пластины также наблюдается ее интенсивный износ [9], выражающийся в пластической деформации и опускании режущей кромки (рис. 2, a). Как показали наблюдения за процессом восстановительной обработки, данная величина пропорциональна значению ширины фаски износа (h_3) (рис. 2, b). Следовательно, значение h_3 возможно использовать в качестве одного из критериев износа.

В связи с тем, что процессы изнашивания и ползучести (пластической деформации) зависят от температуры и напряжения, необходимо обосновать методы их вычисления.

В широко опубликованной литературе [10] для учета влияния условий резания на изнашивание режущего инструмента достаточно часто используется температура резания. Однако, как следует из анализа экспериментальных зависимостей (рис. 3), данная температура не может быть использована в качестве температурного фактора, влияющего на изнашивание, так как при изменении интенсивности изнашивания режущего лезвия изменение температуры находится в пределах погрешности эксперимента.

Таким образом, как следует из рис. 3, температурным фактором, учитывающим зависимость интенсивности изнашивания режущего лезвия от

условий обработки, принята температура формоустойчивости (рис. 4). Данная температура позволяет обобщить влияние температур, определяемых на передней и задней поверхностях режущего лезвия.

Температура формоустойчивости отражает комплексное влияние максимальных температур на передней ($\theta_{п, \max}$) и задней ($\theta_{з, \max}$) поверхностях режущего лезвия, значения которых определяются с использованием термомеханического подхода [11, 12]. Кроме того, используется условие равенства этих температур, т. е. при $\theta_0 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\theta_\phi = \sqrt{\frac{(\theta_{п, \max} - \theta_0)^2 + (\theta_{з, \max} - \theta_0)^2}{2}} / 1,41 + \theta_0. \quad (1)$$

Анализ применяемых в ремонтных депо режимов восстановительной обработки выявил, что температура формоустойчивости находится в диапазоне от 950 до 1000 $^\circ\text{C}$. Однако ведущие фирмы-производители, например SandvikCoromant [1, 4], рекомендуют режимы обработки, соответствующие температуре формоустойчивости, равной 850 $^\circ\text{C}$. Следовательно, оптимизация применяемых при восстановлении профиля колеса режимов резания является одним из направлений снижения температуры формоустойчивости.

Формы износа режущего инструмента и экспериментальных характеристик (см. рис. 2)

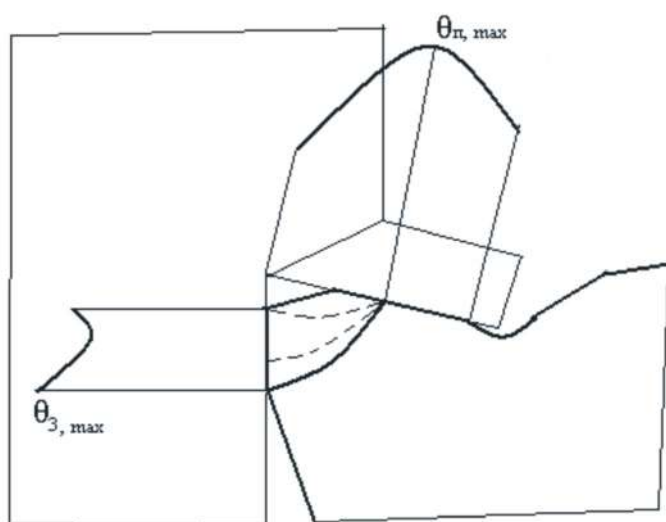


Рис. 4. Определение максимальных температур на поверхностях режущего инструмента при точении профиля колеса (285НВ) призматической пластиной (Т14К8, $\phi = 75^\circ$, $r = 4 \text{ мм}$)

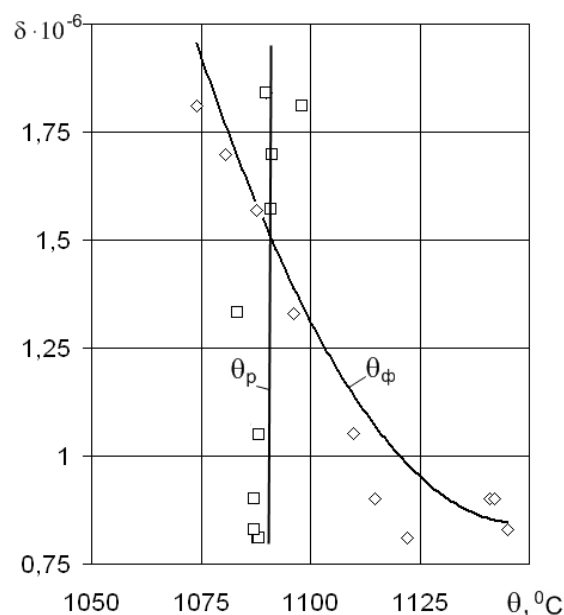
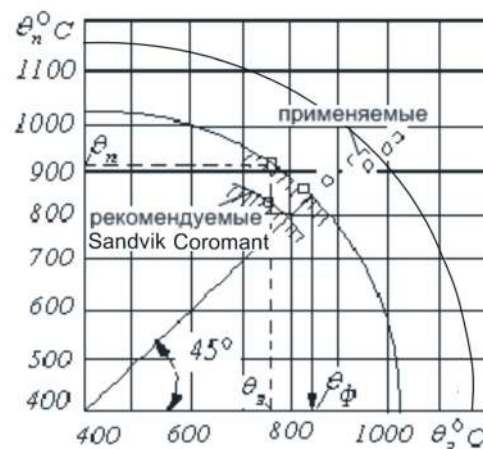


Рис. 3. Влияние температуры на интенсивность изнашивания при точении профиля колеса (285НВ) призматической пластиной (Т14К8, $\phi = 75^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $r = 4 \text{ мм}$, $t = 8 \text{ мм}$, $V = 45 \text{ м/мин}$, $s = 0,8-1,2 \text{ мм/об}$)



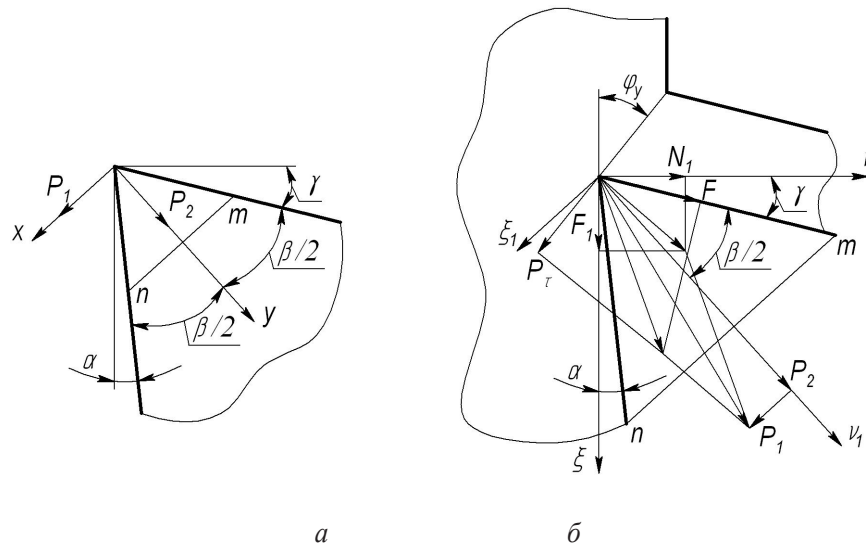


Рис. 5. Схема сил, действующих на клин режущего инструмента

позволяют сделать вывод о том, что, несмотря на высокие значения температур при применяемых на практике режимах резания, преобладающим является влияние фактора, учитывающего напряженное состояние режущего лезвия [13].

В процессе обработки режущее лезвие испытывает нормальные и касательные напряжения. Однако действие нормальных напряжений на процессы деформации и изнашивания инструмента невелико, так как допустимые нормальные напряжения у применяемых марок твердосплавного инструментального материала существенно выше касательных напряжений.

В данной работе для оценки влияния напряжений использован метод Мичела, учитывающий действие сосредоточенных сил на режущий клин [14]. При этом касательные напряжения определяются через тангенциальную силу P_1 , а нормальные через радиальную P_2 (рис. 5).

Определение радиальных (сжимающих) напряжений необходимо для оценки прочности лезвия вблизи режущей кромки, где данные напряжения могут при определенных условиях превышать предел прочности инструментального материала на сжатие и наряду с касательными напряжениями влиять на износ и деформацию режущего

лезвия. Однако в большинстве случаев данным напряжением при расчетах можно пренебречь.

Найдем проекции сосредоточенных силы на оси координат, проецируя равнодействующую сил, расположенных на передней и задней поверхностях клина режущего инструмента.

Для этого сначала определим компоненты сил на передней поверхности режущего клина (P_τ и F) в системе координат v, ξ :

$$P_\tau = \frac{\bar{\tau}}{S_b} \frac{1}{\sin \varphi_y} S_b St, \quad F = \frac{\bar{q}_F}{S_b} \frac{2C_1}{a} S_b St. \quad (2)$$

Далее вычислим равнодействующую силы на передней поверхности в новой системе координат v_1, ξ_1 :

$$\begin{aligned} R_{\xi_1} &= R_\xi \cos(\gamma + \beta/2) - R_v \sin(\gamma + \beta/2) = \\ &= P_\tau \frac{\cos(\beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)} - F \frac{\sin(\varphi_y - \gamma - \beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)}, \\ R_{v_1} &= R_\xi \sin(\gamma + \beta/2) + R_v \cos(\gamma + \beta/2) = \\ &= P_\tau \frac{\sin(\beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)} + F \frac{\cos(\varphi_y - \gamma - \beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Компоненты сил для задней поверхности определяются аналогично передней (см. рис. 5):

$$F_1 = \frac{q_3}{S_b} \frac{h_3}{a} S_b s t,$$

$$N_1 = \left(\frac{1}{1 + \epsilon_z} \frac{h_3}{a} S_b s + q_N f_y \sin \gamma_f \right) t. \quad (4)$$

Принимая во внимание полученные зависимости, тангенциальная проекция силы резания имеет следующий вид:

$$P_1 = P_\tau \frac{\cos(\beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)} - F \frac{\sin(\varphi_y - \gamma - \beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)} + F_1 \cos(\gamma + \beta/2) - N_1 \sin(\gamma + \beta/2). \quad (5)$$

Принимая во внимание решение Мичела [5], уравнение для определения касательных напряжений в режущем клине (сечение $m - n$) примет следующий вид:

$$\tau_i = -\frac{P_1 \operatorname{tg}^2 \beta/2 \cos^4 \beta/2}{bc \left(\frac{\beta}{2} - \frac{\sin \beta}{2} \right)} = -\left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \frac{P_1}{bc} K_1(\beta) = -\tau_0 K_1(\beta), \quad (6)$$

где $\tau_0 = 0,57 \frac{P_1}{bc}$, $K_1(\beta) = \frac{\sin^2 \beta}{(\beta - \sin \beta)(\pi/2 - 1)}$.

Для описания пластической деформации режущего лезвия принято, что скорость данной деформации (ползучести) при одинаковой температуре формоустойчивости зависит от отношения касательных напряжений в режущем клине и предела прочности твердого сплава, определенного при испытании на изгиб, а влияние температуры на прочностные свойства инструментального материала учитывается соответствующим коэффициентом (K_2).

Таким образом, с учетом того, что $\tau_T = \sigma_T / \sqrt{3}$,

а также $\frac{\pi/2 - 1}{\sqrt{3}} \approx \frac{1}{3}$, формула для определения

безразмерной характеристики σ_m , учитывающей

влияние касательных напряжений в режущем клине на деформацию (скорость ползучести), примет следующий вид:

$$\sigma_m = \frac{P_1}{3bc\sigma_n^* K_2} K_1(\beta). \quad (7)$$

Проведем анализ напряженного состояния режущего инструмента при обработке профиля железнодорожных колес с учетом условий обработки. Оценим влияние угла заострения режущего клина резца на поправочный коэффициент $K_1(\beta)$ (рис. 6).

Как показал анализ рис. 6 и зависимости (6), увеличение угла β вызывает снижение степени влияния касательных напряжений τ_m .

При износе резца по задней поверхности наблюдается снижение силы P_1 (рис. 7, а) и касательных напряжений τ_m (рис. 7, б) и, следовательно, уменьшается скорость ползучести. Это хорошо согласуется с практическими наблюдениями, так как пластическая деформация режущего лезвия происходит интенсивнее на остром резце в первые минуты резания.

Следовательно, снижение напряжений при неизменной толщине срезаемого слоя можно обеспечить за счет увеличения размера фаски, расположенной на задней поверхности режущей пластины. Как следует из анализа и практических наблюдений, значения данной фаски, пре-

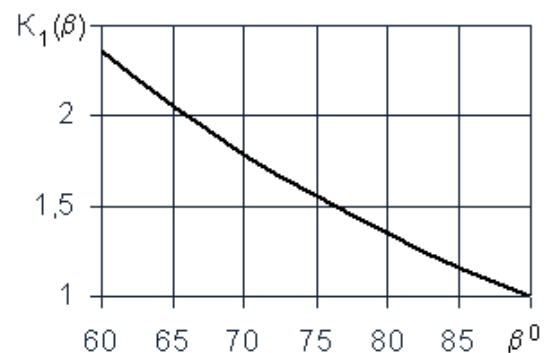


Рис. 6. Зависимость коэффициента $K_1(\beta)$ от угла заострения режущего клина резца

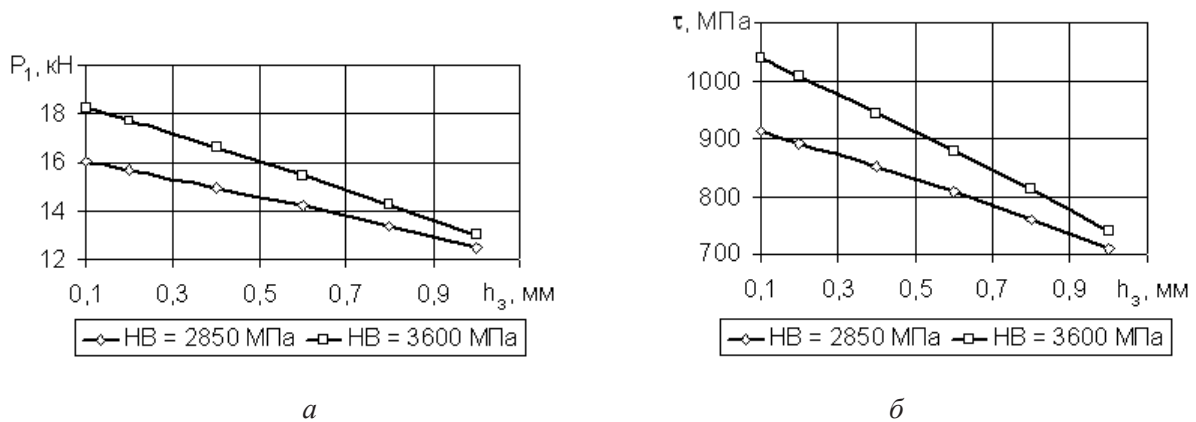


Рис. 7. Зависимости силы P_1 :
 а — и напряжения τ_m ; б — от величины фаски износа задней поверхности
 при точении профиля колеса (285НВ) призматической пластиной
 (Т14К8, $\varphi = 75^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $r = 4$ мм, $t = 8$ мм, $V = 45$ м/мин, $s = 1,2$ мм/об)

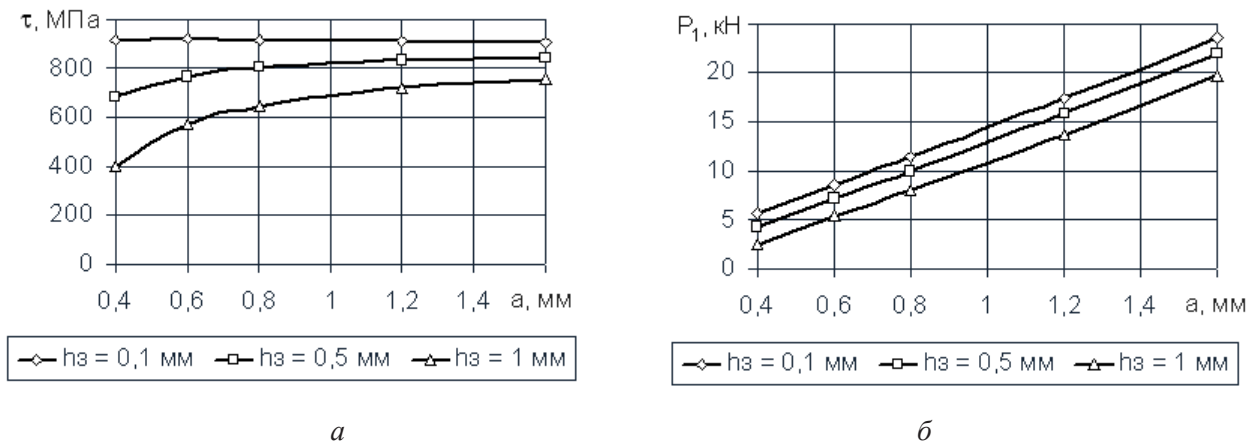


Рис. 8. Зависимости силы P_1 :
 а — и напряжения τ_m б — от толщины срезаемого слоя при точении профиля колеса (285НВ)
 призматической пластиной (Т14К8, $\varphi = 75^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $r = 4$ мм, $t = 8$ мм, $V = 45$ м/мин)

вышающие 0,3–0,4 мм, приводят к увеличению температуры задней поверхности, однако применение предварительного притупления с указанными параметрами позволит снизить интенсивность изнашивания и касательные напряжения на 50 МПа, а также увеличить прочность режущего клина в окрестности режущей кромки.

Кроме того, выявлено, что кроме фаски износа на силу P_1 (рис.8, а) и касательные напряжения (рис. 8, б) оказывает значительное влияние толщина срезаемого слоя.

Для оценки условий пластической деформации при обработке профиля железнодорожных

колес резанием проанализируем безразмерный комплекс (7) и влияние на него толщины срезаемого слоя и ширины фаски износа (рис. 9).

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 9, позволяет сделать вывод о том, что процесс деформации (ползучести) режущего инструмента при обработке профиля железнодорожного колеса точением значительно сокращается при уменьшении толщины срезаемого слоя до величины 0,6–0,8 мм.

Таким образом, как следует из вышесказанного, в качестве основных факторов, влияющих на процесс изнашивания режущего лезвия при

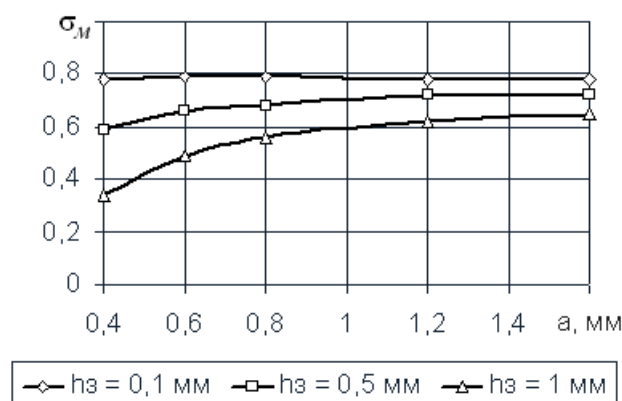


Рис. 9. Зависимость безразмерного комплекса σ_m от толщины срезаемого слоя и величины фаски износа задней поверхности при точении профиля колеса (285НВ) призматической пластиной (Т14К8, $\varphi = 75^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $r = 4$ мм, $t = 8$ мм, $V = 45$ м/мин)

токарной обработке профиля железнодорожных колес, выступают температура формоустойчивости и безразмерный комплекс, описывающий процесс деформации (ползучести) режущего инструмента. Данная взаимосвязь может быть выражена графически в виде вогнутых кривых (рис. 10) и описывающей их зависимости (8):

$$L = \int_0^{\tau} v d\tau = \int_{h_0}^{h^*} \frac{dh}{\delta_L(\theta, \sigma)}. \quad (8)$$

Заключение

1. Установлено, что неравномерность изменения ширины фаски износа на задней поверхности особенно выражена при повышенных подачах и небольших радиусах при вершине $r = 4$ мм. Снизить неравномерность износа при сохранении используемой подачи возможно за счет применения пластин с большим радиусом закругления вершины ($r = 15$ мм).

2. Значение фаски h_3 возможно использовать в качестве одного из главных критериев износа, так как величина фаски износа задней поверхности резца при обработке профиля железнодорожного

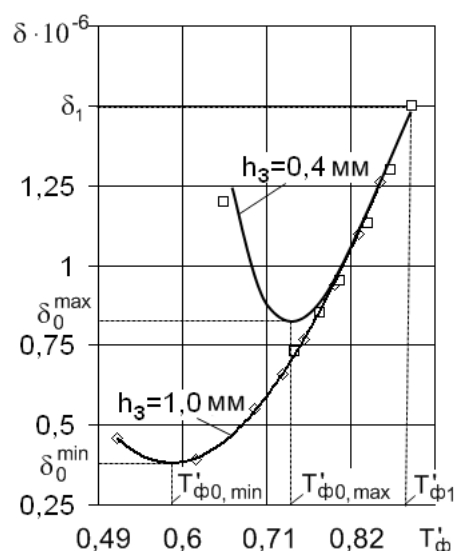


Рис. 10. Обработка колесной стали призматическим резцом марки Т14К8, $\varphi = 75^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $r = 4$ мм, $r = 4$ мм, $t = 8$ мм, $s = 1,2$ мм/об, $V = 38$ м/мин

колеса пропорциональна величине опускания режущей кромки.

3. Выявлено, что при обработке железнодорожных колес температурным фактором, связанным с изнашиванием режущего лезвия, выступает температура формоустойчивости.

4. Для учета пластической деформации режущего лезвия получена зависимость для определения безразмерного комплекса, учитывающего влияние касательных напряжений в режущем клине на скорость ползучести.

5. Описана взаимосвязь между температурой формоустойчивости и безразмерным комплексом, учитывающим касательные напряжения в режущем клине

Библиографический список

1. Воробьев А. А. Ресурс и ремонтпригодность колесных пар подвижного состава железных дорог: монография / А. А. Воробьев и др.; под ред. проф. И. А. Иванова. — М.: ИНФРА-М, 2011. — 264 с.
2. Крутько А. А. Повышение эффективности восстановительной токарной обработки железнодорожных колесных пар: монография / А. А. Крутько, В. С. Кушнер, А. А. Воробьев. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. — 176 с.

3. Кушнер В. С. Влияние структуры и механических характеристик колесных сталей на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар: монография / В. С. Кушнер и др.; под ред. И. А. Иванова и В. С. Кушнера; Минобрнауки России, ОмГТУ. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. — 224 с.
4. Воробьев А. А. Совершенствование технологии восстановления колесных пар: монография / А. А. Воробьев // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. — 2011. — 186 с.
5. Воробьев А. А. Finite element method for transport applications: монография / А. А. Воробьев и др. // Silesian university of technology Gliwice. — 2011. — 208 с.
6. Воробьев А. А. Совершенствование технологии ремонта колес железнодорожного подвижного состава: монография / А. А. Воробьев, А. М. Перепеченов, М. С. Буянов // Военная академия материально-технического обеспечения им. Генерала армии А. В. Хрулева. Военный институт (Железнодорожных войск и военных сообщений), СПб.: Петергоф, 2020. — 104 с.
7. Повышение работоспособности колесных пар подвижного состава: монография / О. С. Валинский, А. А. Воробьев, С. И. Губенко и др.; под ред. И. А. Иванова. — Казань: Бук, 2022. — 324 с.
8. Воробьев А. А. Оценка напряженно-деформированного состояния и прочности режущего инструмента при обточке железнодорожных колес / А. А. Воробьев, Д. А. Потахов, А. А. Крутько, В. И. Фисенко // Омский научный вестник. — 2015. — № 140. — С. 62–66.
9. Воробьев А. А. Анализ условий работы твердосплавного инструмента в тяжелых условиях обработки колесных сталей / А. А. Воробьев, В. С. Кушнер, А. А. Крутько и др. // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. — 2015. — № 3(31). — С. 24–29.
10. Макаров А. Д. Влияние средней температуры контакта при резании на основные характеристики качества поверхностного слоя / А. Д. Макаров и др. // Теплофизика технологических процессов. — Куйбышев: Кн. изд-во, 1970. — С. 270–275.
11. Крутько А. А. Расчет температуры при резании закаленных сталей на основе термомеханического подхода / А. А. Крутько, А. М. Бадамшин // Техника и технологии машиностроения: материалы VIII Международной научно-технической конференции, Омск, 22–25 мая 2019 г. — Омск: Омский государственный технический университет, 2019. — С. 212–217.
12. Кушнер В. С. Совершенствование расчета температуры при резании на основе термомеханического подхода / В. С. Кушнер, М. Г. Сторчак, А. А. Воробьев и др. // Омский научный вестник. — 2009. — № 1(77). — С. 10–14.
13. Кушнер В. С. Влияние температуры и напряжений на интенсивности формоизменения режущего лезвия при обработке никелевых сплавов / В. С. Кушнер, А. Н. Жавнеров, В. А. Горшенин // Омский научный вестник. — 2007. — № 3(60). — С. 26–28.
14. Тимошенко С. П. Теория упругости: Пер. с англ. / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер; под ред. Г. С. Шапиро. — 2-е изд. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. — 560 с.

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

СЕДЫХ Дарья Александровна — канд. техн. наук, доц.; lebedevada@list.ru

Investigation of Tense State of Carbide Instrument at Turning Treatment of Railway Wheels

A. A. Vorobyev¹, A. A. Krutko², D. A. Sedykh²

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

²Omsk state technical University, 11, pr. Mira, Omsk, 644050, Russian Federation

For citation: Vorobyev A. A., Krutko A. A., Sedykh D. A. Investigation of Tense State of Carbide Instrument at Turning Treatment of Railway Wheels // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 479–488. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-479-488

Summary

Purpose: Investigation of the tense state of carbide cutting instrument at turning treatment of railway wheels.

Methods: Influence of temperatures and forces on wear and plastic deformation of hard alloy is estimated using mathematical modeling and Mitchell methods as well as on thermomechanical approach basis. **Results:** The stress-strain state of cutting plates was evaluated and the analysis of wear shape was carried out which revealed that increase in wear chamfer occurs along back surface mainly in the vicinity of cutter tip. It is shown that shape stability temperature and tangential tensity are the factors affecting treatment conditions and wear rate of cutting plate. **Practical significance:** Dependences have been determined that allow assigning rational modes of treatment of railway wheel pairs during repairment.

Keywords: Wheel profile, cutting wedge, shape stability temperature, tangential tensities, deformation.

References

1. Vorob'ev A. A. *Resurs i remontoprigradnost' kolesnykh par podvizhnogo sostava zheleznykh dorog* [Resource and maintainability of wheel sets of railway rolling stock]. Moscow: INFRA-M Publ., 2011. 264 p. (In Russian)
2. Krut'ko A. A., Kushner V. S., Vorob'ev A. A. *Povyshenie effektivnosti vosstanovitel'noy tokarnoy obrabotki zheleznodorozhnykh kolesnykh par* [Improving the efficiency of restorative turning of railway wheelsets]. Omsk : OmGTU Publ., 2013. 176 p. (In Russian)
3. Kushner V. S. *Vliyaniye struktury i mekhanicheskikh kharakteristik kolesnykh staley na iznashivaniye i rezhimy vosstanovleniya profilya kolesnykh par* [Influence of the structure and mechanical characteristics of wheel steels on wear and modes of restoration of the wheel pair profile]. Omsk: OmGTU Publ., 2015. 224 p. (In Russian)
4. Vorob'ev A. A. *Sovershenstvovaniye tekhnologii vosstanovleniya kolesnykh par* [Improving wheelset recovery technology]. 2011. 186 p. (In Russian)
5. Vorob'ev A. A. *Finite element method for transport applications* / Silesian university of technology gliwice, 2011. 208 p.
6. Vorob'ev A. A., Perepechenov A. M., Buyanov M. S., Fiskevich A. S., Fedorchenko A. A. *Sovershenstvovaniye tekhnologii remonta koles zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: monografiya. Voennaya akademiya material'no-tekhnicheskogo obespecheniya im. Generala armii A. V. Khruleva. Voennyi institut (Zheleznodorozhnykh voysk i voennykh soobshcheniy)* [Improving the technology of repair of wheels of railway rolling stock: monograph. Military Academy of Logistics. Army General A. V. Khruleva. Military Institute (Railway Troops and Military Communications)]. St. Petersburg: Petergof Publ., 2020. 104 p. (In Russian)
7. Valinskiy O. S., Vorob'ev A. A., Gubenko S. I. *Povyshenie rabotosposobnosti kolesnykh par podvizhnogo sostava* [Improving the performance of wheel sets of rolling stock]. Kazan': Buk Publ., 2022. 324 p. (In Russian)

8. Vorob'ev A. A. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i prochnosti rezhushchego instrumenta pri obtochke zhelezodorozhnykh koles [Evaluation of the stress-strain state and strength of the cutting tool when turning railway wheels]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2015, I. 140, pp. 62–66. (In Russian)

9. Vorob'ev A. A., Kushner V. S., Krut'ko A. A., Krut'ko A. A. Analiz usloviy raboty tverdosplavnogo instrumenta v tyazhelykh usloviyakh obrabotki kolesnykh staley [Analysis of the working conditions of a hard-alloy tool under severe conditions for processing wheel steels]. *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznykh dorog* [Bulletin of the Institute for Problems of Natural Monopolies: Railway Engineering]. 2015, I. 3(31), pp. 24–29. (In Russian)

10. Makarov A. D. Vliyanie sredney temperatury kontakta pri rezanii na osnovnye kharakteristiki kachestva poverkhnostnogo sloya [Influence of the average contact temperature during cutting on the main characteristics of the quality of the surface layer]. *Teplofizika tekhnologicheskikh protsessov* [Thermophysics of technological processes]. Kuybyshev: Kn. izd-vo Publ., 1970, pp. 270–275. (In Russian)

11. Krut'ko A. A. Raschet temperatury pri rezanii zakalennykh staley na osnove termomekhanicheskogo podkhoda [Calculation of temperature during cutting of hardened steels based on the thermomechanical approach]. *Tekhnika i tekhnologii mashinostroeniya: Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Omsk, 22–25 maya 2019 goda* [Engineering and technology of mechanical engineering: Proceedings of the VIII International

Scientific and Technical Conference, Omsk, 22–25 May 2019]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet Publ., 2019, pp. 212–217. (In Russian)

12. Kushner V. S., Storchak M. G., Vorob'ev A. A. Sovershenstvovanie rascheta temperatury pri rezanii na osnove termomekhanicheskogo podkhoda [Improving the calculation of temperature during cutting based on the thermomechanical approach]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2009, I. 1(77), pp. 10–14. (In Russian)

13. Kushner, V. S. Vliyanie temperatury i napryazheniy na intensivnosti formoizmeneniya rezhushchego lezviya pri obrabotke nikelovykh splavov [Influence of temperature and stresses on the intensity of cutting blade shaping in the processing of nickel alloys]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2007, I. 3(60), pp. 26–28. (In Russian)

14. Timoshenko S. P., Gud'er Dzh. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko – matematicheskoy literatury Publ., 1979. 560 p. (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

Daria A. SEDYKH — PhD in Engineering, Associate Professor; lebedevada@list.ru

УДК 338.28, 656.2

Императивы управления рисками в авиационной деятельности

Г. И. Паламарчук¹, П. Ю. Либерман²

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

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», 196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38

Для цитирования: Паламарчук Г. И., Либерман П. Ю. Императивы управления рисками в авиационной деятельности // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 489–497. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-489-497

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос, определения и оценки эффективности управления рисками в авиационной деятельности. **Методы:** применяются методы системного анализа управления безопасностью в авиационной деятельности. **Результаты:** Проведено целостное исследование по проблемам осуществления оценки риска в деятельности авиапредприятий. Предложена методика оценки управления рисками в авиационной деятельности. **Практическая значимость:** Предложена методика оценки и определения эффективности управления рисками в авиационной деятельности. Понимание крупнейших проблем в мире и авиационной отрасли, а также управление рисками в организации в будущем позволит компаниям «получить конкурентное преимущество» [1].

Ключевые слова: Система безопасности, управление рисками, комплаенс, аддитивные технологии, комплексные показатели безопасности.

Введение

Концепция управления рисками одинаково важна во всех секторах авиации и должна последовательно реализовываться авиакомпаниями, поставщиками аэронавигационного обслуживания, сертифицированными эксплуатантами аэродромов, эксплуатационными и учебными организациями. Стратегии включают определение риска, оценку риска, предотвращение или снижение риска и принятие определенных рисков.

Управление рисками основано на различных средствах идентификации рисков. Согласно

документу ICAO Doc 9859, этот компонент SMS (система управления безопасностью) может включать как проактивные, так и реактивные методы, и приемы управления рисками [2]. Отчет о происшествиях в области безопасности полетов и их расследование, отнесенные к категории реактивных, являются хорошо известными и необходимыми средствами для выявления ключевых областей риска и принятия корректирующих мер по снижению риска. Кроме того, растущая интеграция, автоматизация и усложнение летных операций требует проактивного

управления рисками, смягчения их последствий с использованием методов прогнозирования и мониторинга. Оценка рисков должна проводиться риск-менеджером для любых изменений, которые могут повлиять на безопасность услуг, предоставляемых оператором или поставщиком услуг [3].

Регуляторы и организации, занимающиеся расследованиями в области безопасности, различным образом реагируют на возникающие ситуации, и осуществление задач прогнозирования является достаточно сложной проблемой. Накопленный сегодня объем данных позволяет не только взглянуть по-новому на возникающие аварии и инциденты, но и увидеть, что происходит в обычных повседневных операциях. Это позволяет выявлять опасности и определять основные тенденции риска, а также охарактеризовать потенциальные или новые риски. При этом в большинстве случаев используются два основных подхода:

- 1) получить данные, подтверждающие существование риска и показывающие, что к нему стоит серьезно подготовиться;

- 2) заручиться поддержкой лиц, принимающих решения, чтобы оперативно справиться с риском, не дожидаясь возникновения аварийной ситуации.

В настоящее время в авиационной деятельности имеется соответствующий инструментарий для анализа событий, как значимых, так и обычных, для выявления опасностей и определения областей потенциального снижения риска. Однако нынешняя система безопасности фокусируется большей частью на негативных результатах, а не на событиях. Если событие не имеет явно выраженного отрицательного результата, его редко исследуют.

Если осуществляются действия по негативным результатам, связанным с аварией или другой серьезной обнаруженной проблемой, то они относятся к реактивному, управлению рисками

и включают в себя задачи расследования аварии и документирования с целью выявления ошибок и недопущения подобных событий в будущем. Упреждающее управление рисками (проактивное) в авиационной деятельности направлено на выявление риска до того, как произойдет авария. Способность выявлять неблагоприятные события основана на методах предупреждения негативных последствий, в основе которых лежат задачи прогнозирования развития рассматриваемых процессов. Данный метод управления является более перспективным и основан на измерениях, наблюдении за текущим уровнем безопасности и направлен на обеспечение требуемого (запланированного) уровня безопасности для транспортного предприятия.

Чтобы быть прогнозирующими, предприятия должны уметь использовать операционные данные и современные цифровые средства обработки данных, чтобы показать потенциальный риск и определить преимущества снижения этого риска путем рассмотрения вероятности или серьезности опасностей, выявленных в данных [4, 5].

Нестабильность геополитических и экономических условий [6], вызванных ограничительными мерами и действиями лидеров стран, настроенных на конфронтацию, неблагоприятно влияет на авиационную отрасль и приводит к ухудшению деловых связей.

Если деловые связи будут прерваны, это создаст эффект домино во всей отрасли, что создаст множество проблем для авиационной промышленности в целом и без государственного регулирования не обойтись.

Комплаенс — это риск в авиационной промышленности, т. е. соответствие внутренним и внешним требованиям или нормам. Буквально означает действие в соответствии с требованием или указанием, нарушение которых приведет за собой к риску финансовых потерь для организации [7, 8].

Внедрение новых программ и технологий связывает значительный капитал. Затраты на разработку новых инициатив, таких как аддитивное производство, должны окупаться за счет объемов производства, но инвестиции могут изначально сделать компании более финансово уязвимыми, что создаст риск для всей цепочки поставок авиационной техники. Применение аддитивных технологий в авиационной промышленности помогает создавать высокоэкономичный авиатранспорт. В связи с притоком новых технологий и процессов и неустанным вниманием к снижению издержек компаниям авиационной промышленности в будущем потребуется талантливая, вовлеченная и все более специализированная рабочая сила. Назревает нехватка рабочей силы, и отрасль изо всех сил пытается привлечь новые виды талантов, таких как специалисты по анализу и обработке данных, которые могут помочь в продвижении новых инноваций и совершенствовании бизнес-процессов в организациях [9].

Авиационная промышленность должна соответствовать большому перечню требований к проектированию, техническому обслуживанию, подготовке пилотов и соблюдению правил техники безопасности, это так называемый комплаенс. Эти правила имеют решающее значение в обеспечении безопасности и соответствии продукции самым высоким международным стандартам.

В современных условиях авиакомпания, которые не применяют в своей деятельности инновационные технологии, будут становиться неконкурентоспособными. Необходимо регулярно модернизировать технологии управления рисками, а также внедрять новые и передовые технологии в своей деятельности, чтобы оставаться конкурентоспособными на рынке [10, 11].

Управление рисками заключается в обеспечении систематического и официального выявления, оценки и управления рисками, связанными с опасностями для организации, в пределах прием-

лемых уровней безопасности финансового риска для организации.

Выявленные угрозы должны оцениваться с точки зрения их опасности для деятельности предприятия и ранжироваться в порядке их потенциального риска экспертным путем. Если риск считается допустимым, т. е. с низким уровнем угрозы, деятельность авиапредприятия продолжается без какого-либо вмешательства. Если это неприемлемо, то включается процесс идентификации риска и применяются мероприятия по снижению риска до приемлемого уровня угрозы или устранения риска, если это экономически целесообразно [12, 13].

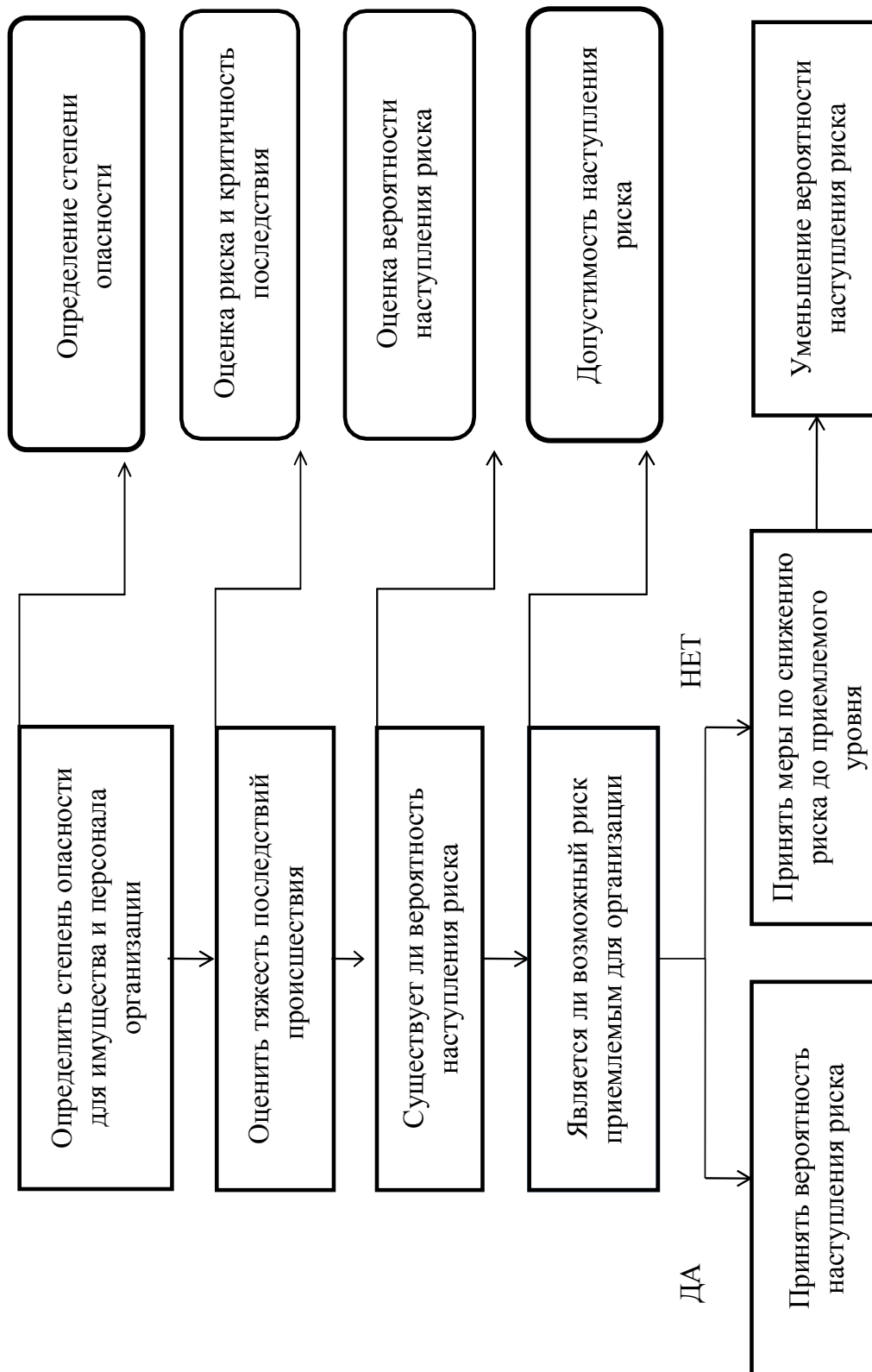
Приведенная блок-схема описывает процесс управления рисками (рисунок).

Риск-менеджер выбирает метод оценки степени риска в зависимости от состава информационных сведений, выявленных в процессе деятельности предприятия. Отобранная информация обрабатывается, и принимается решение о необходимости действий. Риск-менеджер оценивает деятельность предприятия экспертным путем. Результаты проекта мероприятий передаются руководителю организации для принятия соответствующего решения о необходимости воздействия на степень угрозы.

Риск-менеджер должен определить цели в области обеспечения безопасности полетов, авиационной безопасности и качества, устанавливающие значение показателя уровня авиационной безопасности [2, 14].

Первым этапом вычисления комплексного показателя по авиационной безопасности является определение фактического показателя по каждому из показателей процессов, связанных с безопасностью.

Для вычисления комплексного показателя по авиационной безопасности необходимо из 100 % вычесть среднее арифметическое число всех полученных фактических показателей.



Блок-схема процесса управления рисками

Формула вычисления комплексного показателя по авиационной безопасности:

$$\text{КПБ} = 100 \% - (\sum \% \text{РРБП}/12), \quad (1)$$

где КПБ — комплексный показатель по авиационной безопасности;

$\sum \% \text{РРБП}$ — сумма процентов реализовавшихся рисков (событий);

12 — количество показателей процесса.

После вычисления комплексного показателя по авиационной безопасности необходимо рассчитать финансовые показатели, т. е. результат управления рисками, который характеризует превышение результатов управления рисками над затратами в процессе управления:

$$P_{\text{уп}} = \sum_{i=1}^N M_{0i} - \sum_{i=1}^N M_i, \quad (2)$$

где $P_{\text{уп}}$ — результат управления рисками (прогнозируемое снижение степени воздействия на ход реализации идентифицированных рисков как конечный итог их обработки);

M_{0i} — вероятные потери от проявления i -го идентифицированного риска (без обработки);

M_i — вероятные потери от проявления i -го идентифицированного риска (после обработки);

N — количество идентифицированных рисков.

$$Z_{\text{уп}} = \left(\sum_{i=1}^N I_{fi} + \sum_{i=1}^N H_{fi} \right) + \left(\sum_{j=1}^K I_{fj} + \sum_{j=1}^K H_{fj} \right), \quad (3)$$

где $Z_{\text{уп}}$ — затраты в процессе управления рисками;

I_{fi} — фактические потери от проявления i -го идентифицированного риска;

H_{fi} — фактические расходы на обработку идентифицированного риска;

I_{fj} — фактические потери от проявления j -го неидентифицированного риска;

H_{fj} — фактические расходы на обработку j -го неидентифицированного риска;

K — количество неидентифицированных рисков.

Деятельность по управлению рисками требует анализа «затрат — выгод» безопасности планируемого и осуществляемого курса действий, включая выбор стратегии «ничего не делать». Полная ликвидация риска в авиационной отрасли является недостижимой и непрактичной целью, так как не все возможные меры по снижению риска являются экономически целесообразными. Принимается, что будет существовать некоторый остаточный риск, т. е. допустимый для деятельности транспортного предприятия, так как полная ликвидация угрозы приведет к прекращению авиационной деятельности и заземлению всех воздушных судов, что является нецелесообразным в современных рыночных условиях.

Для прогнозирования ситуации необходимо уметь использовать объективные операционные данные и современные цифровые средства их обработки, чтобы определить потенциальный риск и преимущества его снижения путем рассмотрения вероятности и серьезности выявленных опасностей, а также необходимо определить эффективность принятых при оценке угрозы.

Результаты

Регуляторы и организации, занимающиеся расследованиями в области управления рисками, должны требовать от авиакомпаний-операторов комплаенс, следовать определенным правилам и требованиям регулирующих органов. Регуляторы выдвигают требования к безопасности полетов, учету персональных данных, экологической политике, социальной ответственности, финансовой отчетности и т. д.

Процесс управления рисками в авиационной деятельности охватывает основные области, такие как: управление рисками угроз, внутренних контроль, внутренний аудит, соответствие регуляторным требованиям. Данный подход является основой для внедрения принципов

оперативного управления системой безопасности на воздушном транспорте на основе цифровых технологий для более быстрой обработки данных и своевременного выявления угроз. Управление рисками в организации позволит компаниям получить конкурентное преимущество в будущем и сделать перевозку более безопасной.

Практическая значимость результатов состоит в том, что данная методика оценки управления рисками может брать за основу при разработке программ инновационного развития авиапредприятий.

Выводы

В заключение хотелось бы отметить, что управление рисками в авиационной деятельности будет давать положительный результат и поможет снижать риск до приемлемого уровня. В настоящее время управление рисками для транспортных предприятий имеет важное значение в определении комплекса авиационной безопасности и экономики авиапредприятий в целом, так как «транспортные перевозки» [3, 15] связаны с определенным риском.

1. Управление рисками в авиационной деятельности — это стратегическая задача, которая должна быть решена в ближайшем будущем и приведена в соответствие с международными стандартами.

2. Привлечение в этой области специалистов, ученых, исследователей, практиков должно быть одной из важных задач. Необходимо эффективно оценивать результат управления рисками и определять экономическую эффективность принятых мероприятий.

Следует отметить, что данное исследование имеет ряд ограничений.

Во-первых, данные об авиационных предприятиях не всегда находятся в открытом доступе,

такая ситуация может создать некоторые искажения в исследуемых зависимостях.

Во-вторых, отсутствие в транспортных компаниях риск-менеджера не позволяет полноценно функционировать и управлять рисками в авиационной деятельности, что в конечном итоге может существенно повлиять на практическую значимость данного исследования.

Направления дальнейших исследований

В ближайшем будущем углубление цифровизации экономики и охват всех секторов экономики, в том числе и в авиационной деятельности, позволит быстрее оценивать результат управления рисками и определять экономическую эффективность. Это будет стимулировать дальнейшие исследования в этой области и определит направления в научной работе.

Библиографический список

1. Международный (зарубежный) стандарт. Управление рисками безопасности полетов (SRM — Safety Risk Management). U. S. Department of Transportation Federal Aviation Administration (FAA). AC120-92A. — 2015. — С. 23.
2. Справочник по управлению безопасностью (SMM). ICAO Doc 9859, Order Number: 9859 ISBN 978-92-9249-214-4. ICAO. — 2016. — С. 5–8.
3. Смуров М. Ю. Безопасность полетов воздушных судов гражданской авиации с учетом рисков возникновения негативных событий / М. Ю. Смуров, Е. А. Куклев, В. Г. Евдокимов и др. // Транспорт Российской Федерации. — 2012. — № 1(38). — С. 48–52. ISSN: 1994-831X eISSN: 2658-3674. — URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17846694> (дата обращения: 23.06.2022).
4. Качалов Р. М. IV Научно-практическая конференция «Управление рисками в экономике: проблем и решения» / Р. М. Качалов, С. Г. Опарин // Экономическая наука современной России. — 2019. — № 1(84). — С. 129–132. — DOI: 10.33293/1609-1442-2019-1(84)-139-145.

5. Клейнер Г. Б. Социально-экономические экосистемы в свете системной парадигмы / Г. Б. Клейнер // Системный анализ в экономике — 2018: сборник трудов. — М.: Прометей, 2018. — С. 6–11.
6. Жулева О. И. Обоснование стратегического значения Северного морского пути методом анализа логистических и геополитических аспектов его перспективного функционирования / О. И. Жулева, В. Н. Кузьменкова // Вестник Алтайской академии экономики и права. — 2020. — № 5–2. — С. 295–299.
7. Быков А. А. О построении систем управления рисками на предприятиях / А. А. Быков // Проблемы анализа риска. — 2019. — № 16–3. — С. 6–8. — DOI: 10.32686/1812-5220-2019-16-3-8-9.
8. Куклев Е. Оценка риска аварий для высоконадежных авиационных систем в чрезвычайных ситуациях / Е. Куклев, В. Жилинский // Транспорт и телекоммуникации. — 2018. — Т. 19. — № 1. — С. 59–63. — DOI: 10.2478/tj-2018-0006.
9. Паламарчук Г. И. Аспекты повышения конкурентоспособности логистических услуг российских предприятий / Г. И. Паламарчук, В. Н. Кузьменкова, А. В. Дадаев // Russian Journal of Logistics & Transport Management. — 2020. — Т. 5. — № 1. — С. 19–27.
10. Куклев Е. А. Аэрокосмические технологии Springer / Е. А. Куклев, В. С. Шапкин, В. Л. Филиппов и др. // Риски и безопасность авиационной системы. — 2019. — ISBN 978-981-13-8122-5. — С. 1–4.
11. 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.
12. Либерман П. Ю. Управление рисками как способ повышения эффективности деятельности предприятия / П. Ю. Либерман // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. — 2009. — № 3(79). — С. 142–146.
13. Либерман П. Ю. Анализ и оценка эффективности управления рисками в авиационной деятельности / П. Ю. Либерман, А. П. Ястребов // Качество. Инновации. Образование. — 2020. — № 6. — <https://elibrary.ru/item.asp?id=44701060> (дата обращения: 23.06.2022).
14. Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП). Дос. 9859 AN/474. — Изд. 3. — ICAO, 2016. — С. 35–37.
15. Кузьменкова В. Н. Особенности маркетинга на транспорте / В. Н. Кузьменкова, Г. И. Паламарчук, Н. Н. Кацер // Специальная техника и технологии транспорта. — 2020. — № 7(45). — С. 215–219.

Дата поступления: 29.06.2022

Решение о публикации: 28.08.2022

Контактная информация:

ПАЛАМАРЧУК Геннадий Иванович — канд. техн. наук, доц.; palamarchuk.67@mail.ru

ЛИБЕРМАН Павел Юрьевич — канд. экон. наук, доц.; pavellibe@yandex.ru

Risk Management Imperatives in Aviation Activity

G. I. Palamarchuk¹, P. Yu. Liberman²

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky av., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²State Federal Budget Educational Institution of Higher Education “Saint-Petersburg State University of Civil Aviation”, 38, Pilotov av., Saint Petersburg, 196210, Russian Federation

For citation: Palamarchuk G. I., Liberman P. Yu. Risk Management Imperatives in Aviation Activity // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 489–497. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-489-497

Summary

Purpose: To consider the matter on efficiency definition and assessment for risk management in aviation activity. **Methods:** System analysis methods of safety management in aviation activity are applied. **Results:** Comprehensive research on the matters of risk assessment implementation in aviation enterprise activity has been pursued. Methodology for risk management in aviation activity has been proposed. **Practical significance:** Methodology for assessment and definition of risk management efficiency in aviation activity is proposed. The understanding of the world and aviation industry biggest issues as well as the risk management in the organization in the future will allow the companies to gain concurrence advantage [10].

Keywords: Safety system, risk management, compliance, additive technologies, safety complex indicators.

References

1. *Mezhdunarodnyy (zarubezhnyy) standart. Upravlenie riskami bezopasnosti poletov (SRM—Safety Risk Management)* [International (foreign) standard. Safety Risk Management (SRM)]. U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration FAA AC120-92A 2015, p. 23.
2. Safety Management Manual (SMM). ICAO Doc 9859, Order Number: 9859 ISBN 978-92-9249-214-4. ICAO 2016, pp. 5–8.
3. Smurov M. Yu., Kuklev E. A., Evdokimov V. G., Gipich G. N. *Bezopasnost' poletov vozdushnykh sudov grazhdanskoj aviatsii s uchetom riskov vozniknoveniya negativnykh sobytij. Transport rossiyskoj federatsii* [Flight safety of civil aviation aircraft taking into account the risks of negative events. Transport of the Russian Federation Publisher]. “Izdatel'skiy dom T-PRESSA” Publ. 2012, pp. 48–52. ISSN: 1994-831XeISSN: 2658-3674 <http://elibrary.ru/item.asp?id=17846694> (accessed: June 23, 2022). (In Russian)
4. Kachalov R. M., Oparin S. G. *IV Nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Upravlenie riskami v ekonomike: problem i resheniya». Ekonomicheskaya nauka sovremennoy Rossii* [IV Scientific and Practical Conference “Risk Management in Economics: Problems and Solutions”. Economic science of modern Russia]. 2019, I. 1(84), pp. 129–132. DOI: 10.33293/1609-1442-2019-1(84)-139-145. (In Russian)
5. Kleyner G. B. *Sotsial'no-ekonomicheskie ekosistemy v svete sistemnoy paradigmy. Sistemnyy analiz v ekonomike–2018* [Socio-economic ecosystems in the light of the systemic paradigm. System Analysis in Economics–2018]. Moscow: Prometey Publ., 2018, pp. 6–11. (In Russian)
6. Zhuleva O. I., Kuz'menkova V. N. *Obosnovanie strategicheskogo znacheniya Severnogo morskogo puti metodom analiza logisticheskikh i geopoliticheskikh aspektov ego perspektivnogo funkcionirovaniya* [Substantiation of the strategic importance of the Northern Sea Route by analyzing the logistic and geopolitical aspects of its prospective

functioning]. *Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava* [Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law]. 2020, I. 5-2, pp. 295–299. (In Russian)

7. Bykov A. A. *O postroenii sistem upravleniya riskami na predpriyatiyakh. Problemy analiza riska* [On the construction of risk management systems at enterprises. Problems of risk analysis]. 2019, I. 16–3, pp. 6–8. DOI:10.32686/1812-5220-2019-16-3-8-9. (In Russian)

8. Kuklev E., Zhilinskiy V. Otsenka riska avariyy dlya vysokonadezhnykh aviatsionnykh sistem v chrezvychaynykh situatsiyakh [Evaluation of the risk of accidents for highly reliable aviation systems in emergency situations]. *Transport i telekommunikatsii* [Transport and telecommunications]. 2018, vol. 19, I. 1, pp. 59–63. DOI 10.2478/tj-2018-0006. (In Russian)

9. Palamarchuk G. I., Kuz'menkova V. N., Dadaev A. V. *Aspekty povysheniya konkurentosposobnosti logisticheskikh uslug rossiyskikh predpriyatii* [Aspects of improving the competitiveness of logistics services of Russian enterprises]. *Russian Journal of Logistics & Transport Management*. 2020, vol. 5, I. 1, pp. 19–27. (In Russian)

10. Kuklev E. A., Shapkin V. S., Filippov V. L., Shatrakov Yu. G. *Aerokosmicheskie tekhnologii Springer. Riski i bezopasnost' aviatsionnoy sistemy* [Aerospace Technologies. Aviation System Risks and Safety]. 2019. ISBN 978-981-13-8122-5. Pp. 1–4. (In Russian)

11. Palamarchuk G. I., Kuz'menkova V. N., Malyshchev N. V. *Imitatsionnoe modelirovanie mul'timodal'noy tsepi postavok* [Simulation modeling of a multimodal supply chain]. *Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta* [Special Technique and Transport Technologies]. 2019, I. 3(41), pp. 112–117. (In Russian)

12. Liberman P. Yu. *Upravlenie riskami kak sposob povysheniya effektivnosti deyatelnosti predpriyatiya.*

Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Ekonomicheskie nauki [Risk management as a way to improve the efficiency of an enterprise. Scientific and technical statements of the St. Petersburg State Polytechnic University. Economic sciences]. 2009, I. 3 (79), pp. 142–146. (In Russian)

13. Liberman P. Yu., Yastrebov A. P. *Analiz i otsenka effektivnosti upravleniya riskami v aviatsionnoy deyatelnosti* [Analysis and evaluation of the effectiveness of risk management in aviation activities]. *Zhurnal: Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Journal: Quality. Innovation. Education]. Moscow, 2020 ISSN: 1999-513X. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44701060> (accessed: June 23, 2022). (In Russian)

14. *Rukovodstvo po upravleniyu bezopasnost'yu poletov (RUBP) Doc. 9859 AN/474* [Safety Management Manual (SMM) Doc. 9859 AN/474]. ICAO: 2016, pp. 35–37. (In Russian)

15. Kuz'menkova V. N., Palamarchuk G. I., Katser N. N. *Osobennosti marketinga na transporte* [Peculiarities of marketing in transport]. *Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta* [Special equipment and technologies of transport]. 2020, I. 7(45), pp. 215–219. (In Russian)

Received: June 29, 2022

Accepted: August 28, 2022

Author's information:

Gennadiy I. PALAMARCHUK — PhD in Engineering, Associate Professor; palamarchuk.67@mail.ru

Pavel Yu. LIBERMAN — PhD in Economics, Associate Professor; pavellibe@yandex.ru



УДК 629.4.027.114

Модернизация буксы электровоза для радиальной установки колесной пары в кривой

И. А. Гайшинец, С. В. Доронин, И. И. Доронина

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 680021, Хабаровск, ул. Серышева, 47

Для цитирования: *Гайшинец И. А., Доронин С. В., Доронина И. И.* Модернизация буксы электровоза для радиальной установки колесной пары в кривой // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 498–504. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-498-504

Аннотация

Цель: Модернизация буксового узла электровоза для устранения недостатков существующих схем радиальной установки колесных пар в кривой и проведение прочностного расчета на основе напряженно-деформированного состояния модели. **Методы:** Исследования проводились методом конечных элементов в современной машиностроительной системе автоматизированного проектирования. **Результаты:** Разработан первый вариант новой конструкции буксы. Проведенные исследования показали, что в нескольких местах напряжения превышают пределы текучести материала, которые ведут к разрушению модели, имеются недостатки в геометрических формах деталей и в передачи управляющих сил на корпус буксы, намечены пути улучшения конструкции. **Практическая значимость:** Модернизированная конструкция буксового узла локомотива позволит значительно уменьшить величину управляющего момента, сопротивление движению, интенсивность бокового износа гребней колесных пар и рельсов без больших изменений в раме тележки.

Ключевые слова: Вписывание в кривые, износ гребня, колесная пара, радиальная установка, буксовый узел, модернизация, прочностной расчет.

Введение

При вписывании подвижного состава в кривые малого радиуса тележка на всем протяжении кривой занимает перекосное положение, появляется угол набегания колесной пары на наружную нить, который достигает больших значений. По этой причине возникают значительные силы давления гребней колес на

рельс, что ведет к повышению сопротивления движению и бокового износа контактирующих поверхностей [1–4].

Ранее основным параметром, по которому производилась обточка колес, был прокат по кругу катания, тогда как в настоящее время ее выполняют для восстановления профиля гребня, что резко снижет срок службы колеса [1].

Износ пытались снизить путем разработки нового профиля поверхности катания колес, смазыванием контактирующих поверхностей, поверхностным упрочнением и др. Эти способы хоть и повышают ресурс рельсов и гребней колес, но они борются со следствием, а не с причиной износа. Для радикального решения проблемы нужно для локомотивов, особенно работающих на участках с кривыми малого радиуса, предусматривать создание специальных устройств, обеспечивающих управляемую радиальную установку колесных пар (РУКП) локомотивных тележек [1, 2].

Различают три типа тележек с РУКП: с самопроизвольной; с полупринудительной и с принудительной установкой колесных пар. Самопроизвольная ориентация обеспечивается подбором горизонтальной жесткости буксового рессорного подвешивания. Полупринудительная выполняется за счет наличия пассивных связей между колесными парами в тележке. Принудительная осуществляется при помощи управляемых механизмов. Наилучшие показатели по снижению интенсивности износа гребней колес в кривых наблюдаются у тележек третьего типа [3, 4].

Существующие тележки с управляемыми механизмами имеют гидравлическую, пневматическую или механическую систему передачи управляющего усилия на две крайние колесные пары [5–10]. Наиболее перспективным вариантом является механическая система, так как в ней отсутствует трубопровод с рабочей жидкостью или газом, что уменьшает сложность конструкции тележки и увеличивает надежность системы. В данных тележках поводковая связь заменяется жесткими тягами, передающими управляющее усилие от привода на колесную пару. Использование такой передачи требует значительных конструктивных изменений в раме тележки, а высокая продольная жесткость на прямых участках пути вызывает прокат по кругу катания колес и

увеличивает необходимое управляющее усилие для разворота колесных пар в кривой.

В известных тележках разворачивающие устройства установлены на обеих колесных парах, но при этом расположении невозмущенное движение тележки в кривой малого радиуса является неустойчивым. Устойчивость движения сохранится, если разворачивающее устройство установлено только на одной передней колесной паре. Управление разворотом первой по ходу движения колесной парой позволяет многократно уменьшить величину угла набегания колеса на рельс и бокового давления при наименьшем управляющем моменте по сравнению со второй колесной парой и рамой тележки [4].

Для устранения недостатков существующих схем был разработан первый вариант конструкции буксового узла электровоза для механических систем РУКП, предложенной в [4]. Преимуществами новой буксы (рис. 1) являются:

1. Прямое управление разворотом первой по ходу движения колесной парой без промежуточных элементов.
2. Незначительные изменения в конструкции рамы тележки, уменьшение сложности монтажа и обслуживания системы РУКП.
3. Снижение упруго-продольных сил, препятствующих принудительному развороту колесной пары в традиционных тележках, позволяет устранить накопление повреждений в поводках и в корпусе буксы, снижает величину управляющего момента и обеспечивает равномерный износ бандажей на прямых участках пути.

Особенности конструкции модернизированного буксового узла

Для оценки работоспособности предложенного варианта модернизации и выявления недостатков конструкции было выполнено построение трехмерной модели новой конструкции буксового узла электровоза 2ЭС5К «Ермак» в

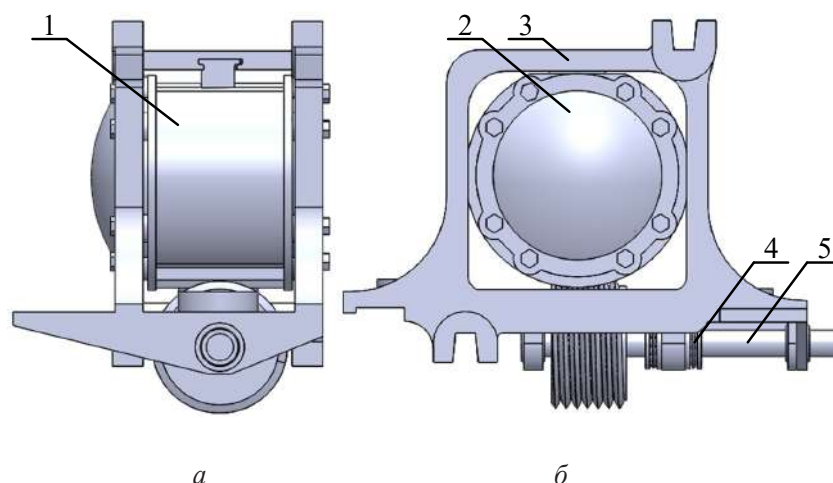


Рис. 1. Новая конструкция буксового узла электровоза для механических систем РУКП: *а* — вид сбоку, *б* — вид спереди; 1 — корпус буксы, 2 — передняя крышка, 3 — рама буксы, 4 — упорный подшипник, 5 — винт

современной машиностроительной системе автоматизированного проектирования.

Модернизированный буксовый узел (рис. 1) состоит из передней крышки, корпуса буксы, рамы буксы, винтового механизма и упорных подшипников. Буксовый узел электровоза был разделен на две основные части — это корпус и рама буксы. Корпус буксы представляет собой цилиндр, во внутренней части которого находятся лабиринтное кольцо, осевые подшипники, дистанционные кольца, корончатая шайба, стопорная планка. В верхней части расположен Т-образный ползун для направления движения корпуса и передачи вертикальных сил от рамы буксы. В нижней части располагается зубчатая рейка винтового механизма для передачи управляющего усилия на корпус буксы. Рама буксы состоит из двух приливов под пружины, воспринимающие нагрузку от рамы тележки, четырех кронштейнов для крепления буксовых поводков и трех кронштейнов для крепления винта в нижней части рамы буксы. Упорные подшипники необходимы для передачи тяговых и тормозных сил с корпуса на раму буксы. Передняя крышка не подвергалась изменениям.

Новая букса работает следующим образом. При движении подвижного состава в криволинейном участке пути на винт подается управляющий момент от привода системы РУКП. Под действием заданного момента вал начинает вращаться, поступательно перемещая зубчатую рейку вместе с корпусом буксы, устанавливая оси колесных пар по радиусу кривой. Таким образом, уменьшается угол набегания колеса на рельс и, как следствие, боковой износ контактирующих поверхностей.

Расчетная схема для прочностного расчета

Прочностной расчет модернизированной буксы выполнялся на основе напряженно-деформированного состояния модели с использованием метода конечных элементов.

В качестве материала предлагаемой конструкции была выбрана сталь 25Л, из которой изготовлен корпус серийного буксового узла 2ЭС5К «Ермак» [2].

Граничные условия расчета полностью имитируют нагрузки и крепления, которые определяют поведение буксового узла в эксплуата-

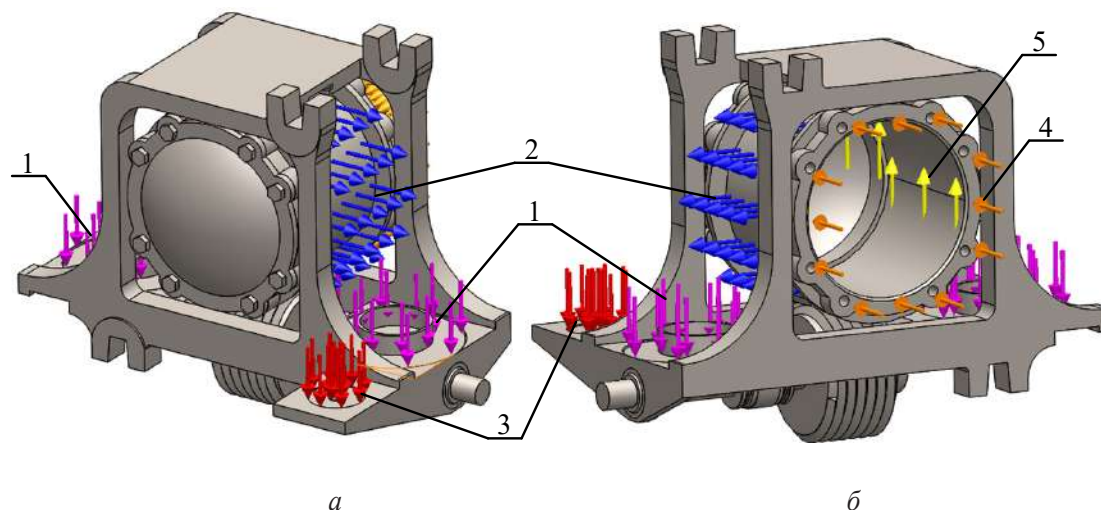


Рис. 2. Расчетная схема приложения сил: *а* — вид спереди, *б* — вид сзади; 1 — нагрузка от веса подрессоренной части электровоза, 2 — сила тяги, 3 — сила диссипации, 4 — центробежная сила, 5 — сила от неровности пути

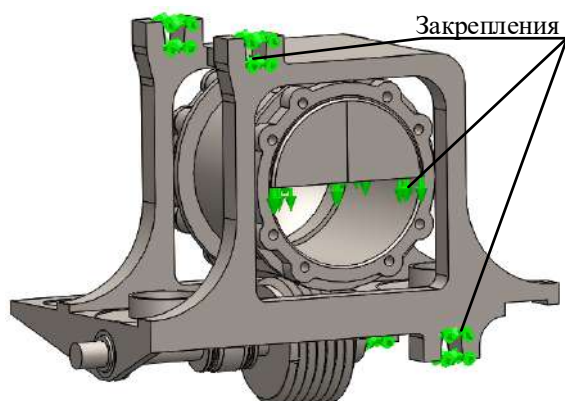


Рис. 3. Расчетная схема приложения ограничений

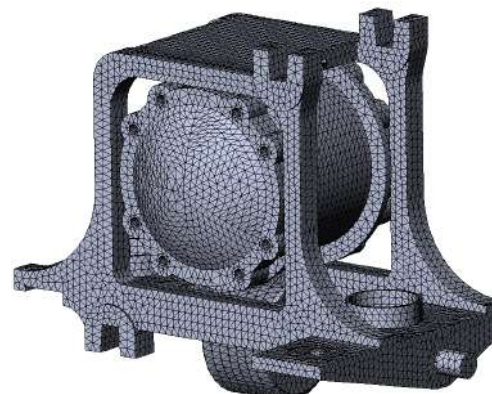


Рис. 4. Конечно-элементная сетка модернизированного буксового узла

ции. На рис. 2 и 3 представлена расчетная схема модели буксового узла.

В расчете были приложены силы: от веса подрессоренной части электровоза, тяги, от неровности пути, диссипации и центробежная сила. Центробежная сила появляется при движении подвижного состава в кривых участках пути и направлена горизонтально наружу кривой. Сила диссипации передается на раму буксы от гасителя колебаний при прохождении стыков и неровностей пути.

Закрепления в местах крепления поводков моделируют их взаимодействие с рамой буксы, ограничивающие продольные и поперечные перемещения. Движение рамы и корпуса буксы вертикально вниз ограничивает модель половины оси колесной пары, но допускает перемещение вверх, моделируя поведение буксового узла при прохождении неровностей пути [2, 4].

На рис. 4 показана конечно-элементная сетка модернизированного буксового узла.

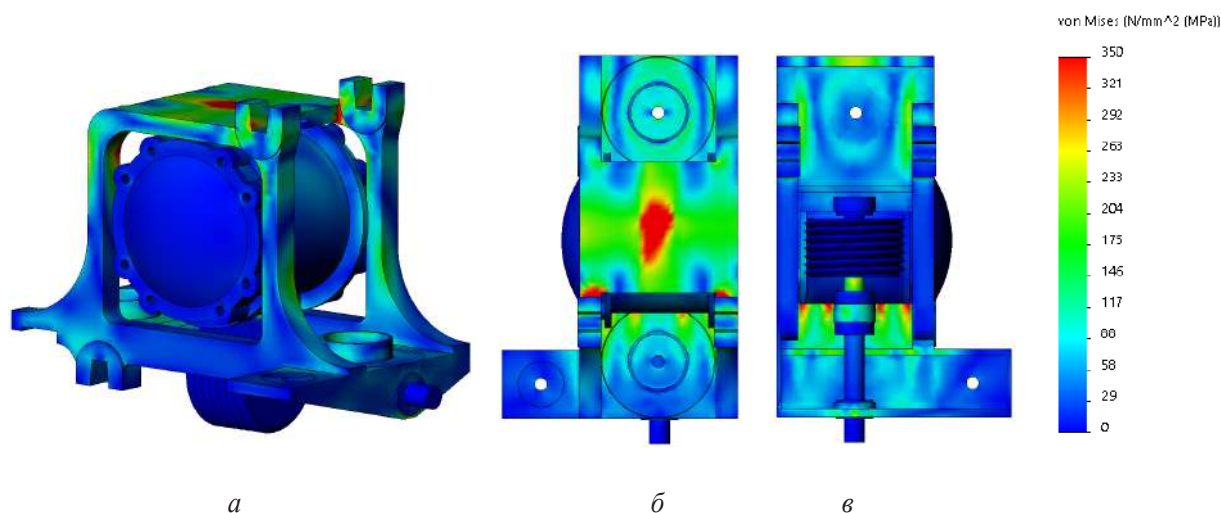


Рис. 5. Эпюра напряжений конструкции буксового узла:
a — вид сбоку, *б* — вид сверху, *в* — вид снизу

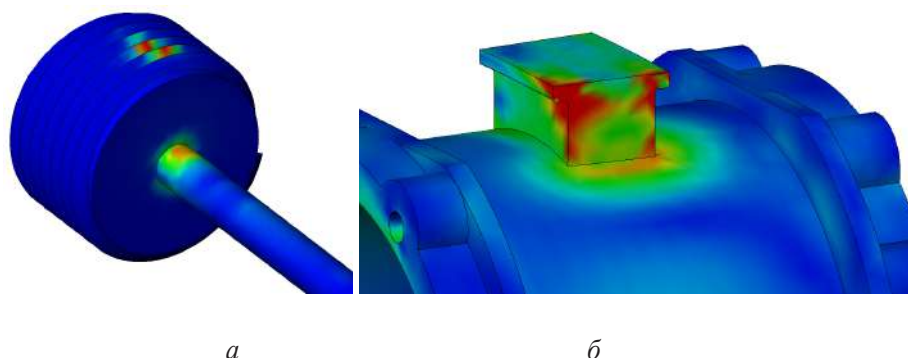


Рис. 6. Эпюра напряжений конструкции буксового узла:
a — в области винта, *б* — в области ползуна

Анализ результатов прочностного расчета

На рис. 5 и 6 представлены эпюры напряжений буксового узла. Как видно из данных рисунков, основные концентрации напряжений находятся в области ползуна, винта, центрального винтового кронштейна и в местах крепления буксовых поводков. В указанных узлах напряжения превышают предел текучести материала (235 МПа), что ведет к разрушению деталей. Форма Т-образного ползуна и винта является нежелательной. При перемещении ползуна по направляющему вырезу в раме буксы может произойти его заклинивание. Большая разница в сечениях винта приводит к

высоким напряжениям в зоне перехода. Самым существенным недостатком в данной конструкции является то, что корпус буксы не закреплен. При передаче управляющего усилия на зубчатую рейку вместо поступательного движения корпус буксы будет вращаться вокруг оси колесной пары.

По результатам анализа прочностного расчета модель буксового узла необходимо доработать. Ползун следует выполнить прямоугольной формы и увеличить на всю поверхность корпуса буксы, что позволит уменьшить нагрузку со стороны рамы буксы и устранить заклинивание. Для увеличения площади контакта между зубчатой

рейкой и винтом предлагается заменить данную передачу на передачу «винт — гайка» и переместить ее на боковую поверхность корпуса, соединяющую раму буксы с передней крышкой, исключая вращение корпуса буксы. Вместе с этим переднюю крышку, корпус и раму буксы следует видоизменить.

Заключение

В данной работе представлена модернизированная конструкция буксового узла локомотива, предназначенная для обеспечения радиальной установки осей колесных пар по радиусу кривой. Она позволит уменьшить интенсивность бокового износа гребней колесных пар и рельсов без значительных изменений в раме тележки. Проведенные исследования первого варианта конструкции буксового узла показали, что в нескольких местах напряжения превышают предел текучести материала, имеются недостатки в геометрических формах деталей и в передачи управляющих сил на корпус буксы. На основе полученных результатов исследований намечены пути улучшения конструкции модернизированного буксового узла.

Библиографический список

1. Боковой износ рельсов и гребней колесных пар подвижного состава в кривых / Под ред. В. Г. Григоренко. — Хабаровск, 1991. — 143 с.
2. Бирюков И. В. Механическая часть тягового подвижного состава: учебник для вузов ж.-д. трансп. / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак и др.; под ред. И. В. Бирюкова. — М.: Транспорт, 1992. — 440 с.
3. Горбунов Н. И. Обоснование рациональных характеристик мехатронных систем управления положением колесных пар / Н. И. Горбунов и др. // Транспортні системи і технології. — 2020. — № 35. — С. 69–79.

4. Доронин С. В. Движение многосекционных локомотивов в кривых малого радиуса: монография / С. В. Доронин. — Хабаровск: ДВГУПС, 2009. — 220 с.

5. Hur H. Analysis on steering performance of active steering bogie according to steering angle control on curved section / H. Hur et al. // Applied Sciences. — 2020. — Vol. 10. — № 12. — P. 4407.

6. Umehara Y. Development of electro-hydraulic actuator with fail-safe function for steering system / Y. Umehara et al. // Quarterly Report of RTRI. — 2014. — Vol. 55. — № 3. — Pp. 131–137.

7. Kamoshita S. Total performance evaluation of the assist steering system for bolsterless bogie / S. Kamoshita et al. // Quarterly Report of RTRI. — 2018. — Vol. 59. — № 4. — Pp. 243–248.

8. Himmelstein G. The Mechatronic Bogie-A Novel Design / G. Himmelstein // EUROPEAN RAILWAY REVIEW. — 2005. — № 4.

9. Miyajima N. Multibody Dynamics Simulation and Bogie Structure Evaluation for Active-Bogie Steering Truck / N. Miyajima et al. // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. — 2007. — Vol. 43106. — Pp. 459–465.

10. Park J. H. Design and analysis of an active steering bogie for urban trains / J. H. Park et al. // Journal of Mechanical Science and Technology. — 2010. — Vol. 24. — № 6. — Pp. 1353–1362.

Дата поступления: 26.04.2022

Решение о публикации: 13.05.2022

Контактная информация:

ГАЙШИНЕЦ Илья Александрович — аспирант;
ilya.ghs@yandex.ru

ДОРОНИН Сергей Владимирович — канд. техн. наук,
доц.; sd@festu.khv.ru

ДОРОНИНА Ирина Ивановна — канд. техн. наук, доц.;
iidoronina@festu.khv.ru

Modernization of Electric Locomotive Axle Box for Radial Installation of a Wheelset in a Curve

I. A. Gaishinets, S. V. Doronin, I. I. Doronina

Far Eastern State Transport University, 47, Serysheva Street, Khabarovsk, 680021, Russian Federation

For citation: Gaishinets I. A., Doronin S. V., Doronina I. I. Modernization of Electric Locomotive Axle Box for Radial Installation of a Wheelset in a Curve // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 498–504. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-498-504

Summary

Purpose: Modernization of electric locomotive axle box for to eliminate the shortcomings of existing schemes for wheelset radial installation in a curve and to perform strength calculation based on stress-strain state of a model. **Methods:** The research was carried out by finite element method in modern machine-building computer-aided design system. **Results:** The first version of axle box new design has been developed. The performed studies have shown that in several locations, stresses exceed material yield strength, leading to destruction of the model. There are shortcomings in geometric shapes of parts and in the transfer of control forces to the box body. Ways to improve the design are outlined. **Practical significance:** The modernized design of locomotive axle box assembly will allow to reduce significantly control moment quantity, movement resistance, the intensity of lateral wear of wheel set and rail flanges without big changes in a bogie frame.

Keywords: Fitting into curves, flange wear, wheelset, radial installation, axle box assembly, modernization, strength calculation.

References

1. *Bokovoy iznos rel'sov i grebney kolesnykh par podvizhnogo sostava v krivykh* [Lateral Wear of Rails and Flanges of Rolling Stock Wheel Sets in Curves]. Khabarovsk, 1991, 143 p. (In Russian)
2. *Mekhanicheskaya chast' tyagovogo podvizhnogo sostava* [The mechanical part of the traction rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1992. 440 p. (In Russian)
3. Gorbunov N. I. Obosnovanie ratsional'nykh kharakteristik mekhatronnykh sistem upravleniya polozheniem kolesnykh par [Substantiation of rational characteristics of mechatronic systems for controlling the position of wheel pairs]. *Transportni sistemi i tekhnologii* [Transport systems and technologies]. 2020, I. 35, pp. 69–79. (In Russian)
4. Doronin S. V. *Dvizhenie mnogosektsionnykh lokomotivov v krivykh malogo radiusa* [Movement of multi-section locomotives in curves of small radius]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2009. 220 p. (In Russian)
5. Hur H. Analysis on steering performance of active steering bogie according to steering angle control on curved section. *Applied Sciences*. 2020, vol. 10, I. 12, p. 4407.
6. Umehara Y. Development of electro-hydraulic actuator with fail-safe function for steering system. *Quarterly Report of RTRI*. 2014, vol. 55, I. 3, pp. 131–137.
7. Kamoshita S. Total performance evaluation of the assist steering system for bolsterless bogie. *Quarterly Report of RTRI*. 2018, vol. 59, I. 4, pp. 243–248.
8. Himmelstein G. The Mechatronic Bogie-A Novel Design. *EUROPEAN RAILWAY REVIEW*. 2005, I. 4.
9. Miyajima N. Multibody Dynamics Simulation and Bogie Structure Evaluation for Active-Bogie Steering Truck. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2007, vol. 43106, pp. 459–465.
10. Park J. H. Design and analysis of an active steering bogie for urban trains. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2010, vol. 24, I. 6, pp. 1353–1362.

Received: April 26, 2022

Accepted: May 13, 2022

Author's information:

Ilya A. GAISHINETS — Postgraduate Student; ilya.ghs@yandex.ru

Sergei V. DORONIN — PhD in Engineering, Associate Professor; sd@festu.khv.ru

Irina I. DORONINA — PhD in Engineering, Associate Professor; iidoronina@festu.khv.ru

УДК 621.39

Обеспечение информационной безопасности системы тактовой сетевой синхронизации на основе ее энтропийного анализа

А. К. Канаев¹, Е. В. Опарин², Е. В. Опарина¹

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

²Институт по проектированию сигнализации, централизации, связи и радио на железнодорожном транспорте «Гипротрансигналсвязь» — филиал АО «Росжелдорпроект», Российская Федерация, 191119, Санкт-Петербург, Боровая ул., 49К

Для цитирования: Канаев А. К., Опарин Е. В., Опарина Е. В. Обеспечение информационной безопасности системы тактовой сетевой синхронизации на основе ее энтропийного анализа // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 505–514. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-505-514

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос обеспечения информационной безопасности системы тактовой сетевой синхронизации при ее функционировании в составе телекоммуникационной системы. Для достижения поставленной цели в статье поэтапно рассмотрено решение следующих задач: проведен системный анализ процесса функционирования системы тактовой сетевой синхронизации в условиях воздействия организованных злоумышленников, приведены основные угрозы информационной безопасности для системы тактовой сетевой синхронизации. В качестве комплексной характеристики процесса функционирования системы тактовой сетевой синхронизации предложено использование ее дифференциальной энтропии, выявлена взаимосвязь значений дифференциальной энтропии от значений параметров информационной безопасности и управляемости системы ТСС, на основании которой предложены подходы по обеспечению информационной безопасности ТСС. **Методы:** Используемые в работе методы исследования основаны на фундаментальных положениях теории систем, теории вероятностей, теории сетей, энтропийного моделирования, системного и математического анализа, математического моделирования. **Результаты:** Сформирована энтропийная модель динамики процесса функционирования системы тактовой сетевой синхронизации, предложена поэтапная структура действий по обеспечению информационной безопасности системы тактовой сетевой синхронизации исходя из требований защищенности и управляемости. **Практическая значимость:** Возможность для операторов телекоммуникационных систем обоснованно формировать количественный и качественный характер средств защиты, а также оптимально настраивать параметры процесса функционирования системы ТСС и входящих в ее состав элементов.

Ключевые слова: Телекоммуникационная система, система тактовой сетевой синхронизации, дифференциальная энтропия, угроза, информационная безопасность.

Введение

Функционирование телекоммуникационной системы (ТКС) зависит от множества подсистем, среди которых одной из наиболее важных является система тактовой сетевой синхронизации (ТСС). Основным назначением системы ТСС является формирование, передача и распределение сигналов синхронизации до цифрового оборудования ТКС с целью его согласованного взаимодействия. Система ТСС обеспечивает установление и поддержание определенного значения тактовой частоты цифровых сигналов в цифровых сетях связи, которые служат для цифровой коммутации, транзита и синхронного объединения цифровых потоков информации, а также обеспечивает устойчивую работу всех задающих генераторов, установленных на сетях связи. Функционирование системы ТСС осуществляется по принципу принудительной иерархической синхронизации элементов сетей связи. В случае применения на сети оборудования, реализующего канальный уровень на основе технологии Ethernet, синхронизация оборудования обеспечивается с применением технологии Synchronous Ethernet [1–3].

В связи с появлением множества автоматизированных систем управления (АСУ), функционирующих в режиме реального времени, существует потребность в частотно-временном обеспечении данных систем. Таким образом, качество услуг связи неразрывно связано с показателями функционирования ТСС, синхросигналы и полезные информационные сигналы передаются, как правило, в одних и тех же цифровых потоках и по одним и тем же направляющим системам. Возникновение отказов в системе ТСС, а также отклонение значений параметров сигналов синхронизации от нормативных значений может привести к значительному ухудшению качества услуг связи вплоть до полного их прекращения [4, 5].

В силу указанных особенностей система ТСС является потенциальным местом проникновения

в ТКС со стороны организованных злоумышленников с целью оказать деструктивное и разрушающее воздействие.

Особая опасность воздействия на систему ТСС состоит в том, что влияние носит косвенный характер, при котором разрушение сети ТСС приводит к последующему разрушению ТКС. При возникновении подобных ситуаций могут возникать значительные затруднения по восстановлению процесса функционирования ТКС, так как зачастую невозможно достоверно определить причину возникновения отказов.

Обзор основных угроз информационной безопасности для системы тактовой сетевой синхронизации

Система ТСС является сложной гетерогенной структурой и представляет собой единый комплекс, который функционирует во взаимосвязи со сторонними подсистемами ТКС и который подвержен различным дестабилизирующим факторам. Отказ или нарушение функционирования отдельных элементов системы ТСС может привести к значительному ухудшению качества синхросигналов в сегменте, находящемся ниже по иерархии. Таким образом, злоумышленник потенциально может нейтрализовать отдельный элемент или узел системы ТСС, что способно привести к отказу узлов, находящихся ниже по уровню иерархии.

Территориально система ТСС располагается в рамках определенного региона синхронизации, поэтому злоумышленник способен искусственно расширить или сузить регион синхронизации, вывести из-под контроля систем управления отдельные узлы системы ТСС или добавить дополнительные, что приведет к изменению маршрутов доставки синхросигналов, а также подмене ведущих/ведомых источников синхронизации.

Взаимодействие между элементами системы ТСС осуществляется через стандартные интерфейсы, определяемые международными и наци-

ональными рекомендациями, определяющими интерфейсы передачи цифровых сигналов. Данные интерфейсы являются точками обмена информацией между различными подсистемами. Ошибки при определении связей функционирования способны привести к потере контроля над системой ТСС [6–8].

Основополагающими функциями системы ТСС является формирование сигналов синхронизации, распространение и распределение сигналов синхронизации с использованием различных направляющих систем и систем передачи; восстановление сигналов синхронизации; преобразование синхросигналов. Злоумышленник способен изменить набор функций, выполняемых системой ТСС, дополнить набор нестандартными функциями, которые не свойственны системе ТСС, устранить ряд функций, что приведет к разрушению структуры системы ТСС, а в последующем всей системы ТКС.

Эффективное осуществление функций системы ТСС возможно только при организации оптимальной системы управления. Управление системой ТСС, как правило, имеет многоуровневую иерархическую структуру, в соответствии с регионами синхронизации. Комплексное управление осуществляется единым центральным органом управления. Злоумышленник способен внедриться в систему управления ТСС, получив таким образом полноту и свободу действий по управлению сетью ТСС.

Дополнительно злоумышленник способен воздействовать на физическую среду распространения сигналов синхронизации, управлять направлением дестабилизирующих факторов [6–8].

Обобщенная модель предметной области функционирования системы ТСС в условиях воздействия организованных злоумышленников имеет следующий вид (рис. 1).

Указанная модель (см. рис. 1) имеет трехуровневую структуру, на нижнем уровне распо-

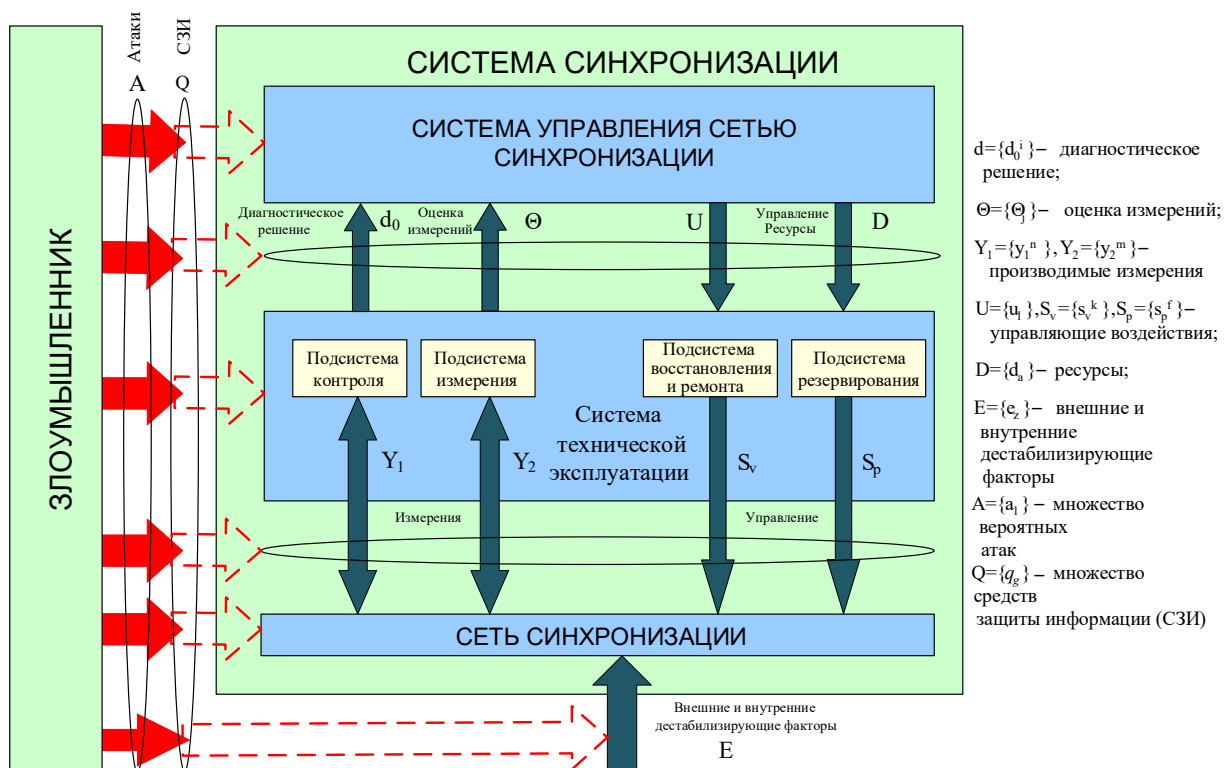


Рис. 1. Обобщенная модель предметной области функционирования системы ТСС в условиях воздействия организованных злоумышленников

лагается сеть ТСС, включающая все основное оборудование синхронизации. Второй уровень образует система технической эксплуатации сети ТСС, включающая подсистемы контроля, измерений, резервирования, восстановления и ремонта. Третий уровень образует система управления сетью ТСС. В совокупности указанные три уровня образуют систему ТСС. Злоумышленник способен осуществлять воздействия на каждый из уровней или его элементы.

Изменения в системе ТСС в результате воздействий злоумышленников могут носить стремительный характер, например, в случае, отказа направляющих систем или источников синхронизации верхних уровней, так и монотонный, в случае постепенного дрейфа частоты в генераторах сетевых элементов. Изменения могут носить как качественный, так и количественный характер, а также внезапный или детерминированный [6–8].

Оценка дифференциальной энтропии системы тактовой сетевой синхронизации

В соответствии с моделью, представленной на рис. 1, элемент структуры системы ТСС имеет определенные параметры функционирования. Это могут быть внутренние параметры узлов системы ТСС, выходные параметры генераторного оборудования, параметры функционирования элементов, характеристики сигналов синхронизации, такие как джиттер, вандер и дрейф частоты, а также различные диагностические параметры. Применительно к системам технической эксплуатации следует отметить параметры распределения ресурсов, параметры систем резервирования, контроля, измерения и ремонта, например количество находящихся ресурсов в данных системах, а также их качественный характер. Для систем управления следует выделить параметры функционирования узлов управления, например серверного оборудования, систем распределения управляющих воздействий.

Система ТСС является сложной динамической стохастической системой, каждый элемент которой характеризуется множеством параметров и взаимосвязей. Значения данных параметров могут быть взаимозависимы, так и не зависеть друг от друга. Таким образом, представление процесса функционирования ТСС с использованием традиционных подходов, например, на основе логико-вероятностных моделей или на основе графов существенно затруднено. В подобных случаях рациональным является применение энтропийных методов моделирования. Энтропия представляет собой универсальный параметр, который позволяет объединить в единое целое процессы различной природы, поэтому его применение является целесообразным для анализа сложных систем [9].

Для анализа процесса функционирования системы ТСС возможно применение дифференциальной энтропии. Дифференциальная энтропия определяется исходя из плотности распределения вероятности, она применима во всех системах, в которых определено понятие вероятности, в том числе и для системы ТСС [9].

Дифференциальная энтропия определяется в соответствии со следующим выражением (1) [9–12]:

$$H = - \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \ln f(x) dx, \quad (1)$$

где $f(x)$ — плотность распределения сигнала непрерывного источника как случайной величины.

Для оценки дифференциальной энтропии системы ТСС будем использовать следующий подход. Будем оценивать изначально дифференциальную энтропию отдельного элемента системы ТСС, а далее исходя из полученных значений конкретных элементов оценим общую дифференциальную энтропию системы ТСС или ее фрагментов.

Представим отдельный элемент системы ТСС в виде вектора $Y(2)$:

$$Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m), \quad (2)$$

где Y_1, Y_2, \dots, Y_m представляют собой множество параметров элемента системы ТСС.

Введем следующие допущения:

- вектор $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ имеет многомерное нормальное распределение;
- для вектора $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ возможно вычисление ковариационной матрицы Σ (3).

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{Y_1}^2 & \text{cov}(Y_1, Y_2) & \dots & \text{cov}(Y_1, Y_m) \\ \text{cov}(Y_2, Y_1) & \sigma_{Y_2}^2 & \dots & \text{cov}(Y_2, Y_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{cov}(Y_m, Y_1) & \text{cov}(Y_m, Y_2) & \dots & \sigma_{Y_m}^2 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Первое допущение введено исходя из соображений того, что в работе [9–12] отмечается следующий факт. Аналитическое нахождение энтропии $H(Y)$ в настоящее время возможно лишь для совместного нормального распределения. Использование других распределений существенно затруднено и вызвано отсутствием величины, аналогичной определителю корреляционной матрицы для совместного нормального распределения [12]. Тем не менее, учитывая большое разнообразие элементов системы ТСС и их параметров, использование многомерного нормального распределения вполне оправдано.

Вычисление ковариационной матрицы для вектора Y возможно путем накопления статистики параметров процесса функционирования элементов системы ТСС.

Таким образом, исходя из введенных допущений, дифференциальная энтропия отдельного элемента системы ТСС может быть вычислена следующим образом (4) [9–12]:

$$H(Y) = \frac{1}{2} \ln \left[(2\pi e)^m |\Sigma| \right] = \sum_{i=1}^m H(Y_i) + \frac{1}{2} \ln |R| = H(Y)_\Sigma + H(Y)_R, \quad (4)$$

где $|\Sigma|$ — определитель ковариационной матрицы Σ вектора Y ;

$|R|$ — определитель корреляционной матрицы R вектора Y .

По выражению (4) видно, что энтропия отдельного элемента системы ТСС складывается из двух составляющих, величина $H(Y)_\Sigma$ определяет предельную дифференциальную энтропию, соответствующую полной независимости параметров элемента системы ТСС и представляет собой энтропию хаотичности, а величина $H(Y)_R$ отражает степень взаимосвязей между параметрами и представляет собой энтропию самоорганизации.

Представление дифференциальной энтропии в виде двух составляющих определяет ее двойственный характер. Изменение дифференциальной энтропии может происходить, с одной стороны, за счет изменения дисперсий значений параметров элемента системы ТСС, а с другой — за счет изменения коррелированности параметров, по которым определяется дифференциальная энтропия [9–12].

При непрерывном измерении параметров элемента системы ТСС можно отследить динамику изменения дифференциальной энтропии. Если в течение рассматриваемого периода времени значение дифференциальной энтропии не изменилось, то элемент системы ТСС стабилен и функционирует в стационарном режиме, если значение дифференциальной энтропии уменьшилось, то элемент системы ТСС стал функционировать более стабильно, если значение дифференциальной энтропии увеличилось, то происходящие в элементе системы ТСС изменения привели к увеличению нестабильности процесса его функцио-

нирования. Анализируя происходящие изменения с точки зрения энтропии хаотичности и энтропии самоорганизации, можно отметить, что если увеличилась энтропия хаотичности, то увеличился разброс значений параметров функционирования элемента системы ТСС, если энтропия хаотичности уменьшилась, то разброс значений параметров функционирования элемента системы ТСС уменьшился.

Аналогично, если энтропия самоорганизации увеличилась, то произошло уменьшение взаимосвязей параметров элемента системы ТСС. Если энтропия самоорганизации уменьшилась, то произошло увеличение взаимосвязей параметров [9–12].

Используя указанный подход на основе выражения (2) и оценив дифференциальную энтропию каждого элемента системы ТСС, можно оценить дифференциальную энтропию всей системы ТСС или отдельного ее фрагмента системы ТСС. Проведя указанные действия, будет получена энтропийная модель динамики системы ТСС. В этом случае в качестве параметров будут выступать полученные дифференциальные энтропии отдельных элементов системы ТСС. Определяя энтропию хаотичности и энтропию самоорганизации системы ТСС, можно определять динамику изменения взаимосвязей элементов системы ТСС, определять отказавшие элементы и элементы с пониженным качеством функционирования.

Обеспечение информационной безопасности системы ТСС путем управления значениями ее дифференциальной энтропии

В работе [9] отмечается факт, что рост дифференциальной энтропии сложной системы соответствует повышению ее безопасности. Данный факт можно объяснить тем, что с ростом энтропии уменьшается взаимосвязь между элементами. Следовательно, будет уменьшена резуль-

тативность атаки со стороны организованного злоумышленника, так как дестабилизирующее воздействие сконцентрируется на атакуемом узле и получит меньшее распространение на смежные узлы системы ТСС. Таким образом, можно искусственно повышать значение дифференциальной энтропии системы ТСС за счет повышения дифференциальной энтропии отдельных ее элементов. Данное повышение возможно за счет изменения энтропии хаотичности и энтропии самоорганизации. Однако следует отметить, что с повышением дифференциальной энтропии уменьшается управляемость системой ТСС вследствие уменьшения взаимосвязей между элементами, что существенно может сказаться на процессе ее функционирования. Таким образом, основную задачу при построении системы информационной безопасности ТСС можно сформулировать как нахождение оптимального диапазона значений дифференциальной энтропии системы ТСС, при котором будет достигнута требуемая информационная безопасность, но в то же время будет обеспечена необходимая управляемость системы ТСС.

Для решения данной задачи необходимо определиться с критерием информационной безопасности системы ТСС, а также с критерием управляемости системы ТСС. Решение задачи обеспечения информационной безопасности можно проводить с использованием двух подходов. В основе первого подхода лежит идея обеспечения требуемой информационной безопасности. Необходимо найти минимальное значение дифференциальной энтропии системы ТСС, для которой будет обеспечена требуемая информационная безопасность. Исходя из данного значения дифференциальной энтропии, в дальнейшем необходимо определить оптимальные значения параметров системы ТСС, при которых будет обеспечена максимальная ее управляемость. В основе второго подхода лежит идея обеспе-

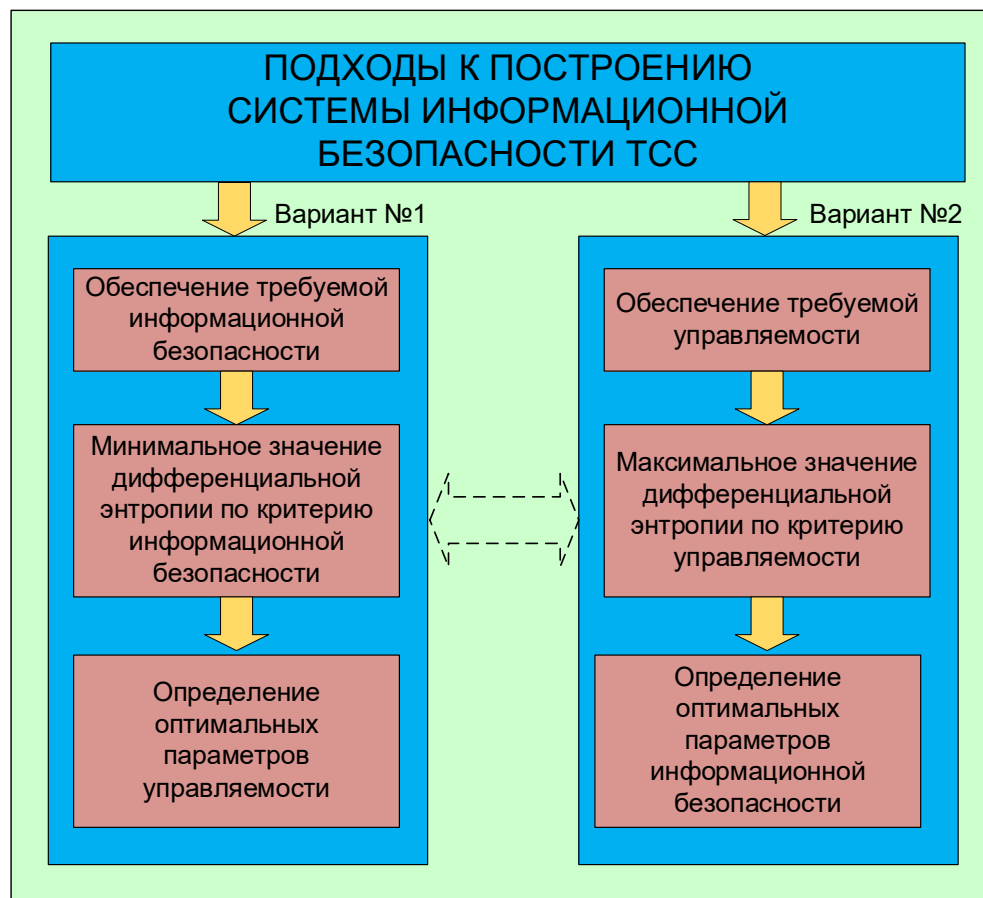


Рис. 2. Подходы к построению системы информационной безопасности ТСС

чения требуемой управляемости системы ТСС. Необходимо найти максимальное значение дифференциальной энтропии, при которой будет обеспечена требуемая управляемость. Исходя из данного значения дифференциальной энтропии, в дальнейшем необходимо определить оптимальные значения параметров системы ТСС, при которых будет обеспечена максимальная информационная безопасность. Учитывая сформулированные подходы, блок-схема построения системы информационной безопасности примет следующий вид (рис. 2).

Решение задачи обеспечения информационной безопасности системы ТСС возможно с использованием различных методов оптимизации. Конечным итогом будет являться находже-

ние таких значений параметров системы ТСС, при которых будут достигнуты необходимые значения критериев информационной безопасности и управляемости.

Заключение

Система тактовой сетевой синхронизации представляет собой основополагающую подсистему в структуре ТКС. Нарушение процесса функционирования системы ТСС способно привести к значительным отказам в предоставлении телекоммуникационных услуг, взаимодействии элементов и смежных подсистем ТКС. Данный факт обуславливает актуальную задачу построения эффективной системы информационной безопасности ТСС, способной надежно блоки-

ровать целенаправленные внешние воздействия. В статье были предложены подходы к обеспечению информационной безопасности ТСС на основании оценки динамики изменения ее дифференциальной энтропии. Оценку дифференциальной энтропии системы ТСС возможно проводить путем анализа параметров функционирования элементов ТСС, на основании которого возможно построение энтропийной модели динамики системы ТСС. Изменение параметров функционирования системы ТСС и ее элементов находит отражение в изменении ее дифференциальной энтропии. Увеличение значения дифференциальной энтропии способствует повышению информационной безопасности ТСС, но также влияет и на процесс управляемости системой.

Отличительной особенностью предложенных подходов является оценка системы информационной безопасности ТСС исходя из процесса функционирования самой ТСС, без учета влияния датчиков безопасности, межсетевых экранов и систем обнаружения вторжений. Процесс функционирования системы ТСС обуславливает построение энтропийной модели динамики в реальном времени, в результате чего можно в реальном времени отслеживать параметры информационной безопасности.

Построение систем управления ТСС с учетом предложенных подходов в сочетании с традиционными системами информационной безопасности способно значительно повысить защищенность ТСС без потери ее управляемости.

Библиографический список

1. Еремеев Е. Л. Синхронизация и цифровая передача в сетях SDN / Е. Л. Еремеев, С. Ф. Буцев, И. И. Горай и др. // *Инновации, наука, образование*. — 2021. — № 43. — С. 1010–1025.
2. Колтунов М. Н. Актуальные вопросы применения оборудования частотно-временного обеспечения на ЕСЭ России / М. Н. Колтунов, М. Л. Шварц // *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов*. — 2018. — № 2. — С. 113–120.
3. Лобастова М. В. Оценка надежности работы элемента сети тактовой сетевой синхронизации / М. В. Лобастова, А. Ю. Матюхин // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. — 2020. — № 3. — С. 27–36.
4. Нетес В. А. Соглашение об уровне обслуживания при предоставлении сигналов синхронизации / В. А. Нетес // *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов*. — 2018. — № 2. — С. 137–140.
5. Малыгин С. В. Особенности построения систем тактовой сетевой синхронизации для распределенных сетей связи / С. В. Малыгин, М. Л. Шварц // *Информатизация и связь*. — 2021. — № 1. — С. 29–40.
6. Канаев А. К. Моделирование атаки на систему управления сетью синхронизации / А. К. Канаев, А. Н. Горбач, Е. В. Опарин // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. — 2020. — № 72. — С. 35–47.
7. Канаев А. К. Обобщенная модель действий злоумышленника на начальном этапе реализации атаки на систему управления сетью синхронизации / А. К. Канаев, А. Н. Горбач, Е. В. Опарин // *Телекоммуникации*. — 2020. — № 12. — С. 16–24.
8. Канаев А. К. Методика мониторинга технического состояния сети тактовой сетевой синхронизации на основе энтропийного анализа диагностических параметров ее элементов / А. К. Канаев, Е. В. Опарин, Е. В. Опарина // *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. — 2021. — № 3. — С. 108–117.
9. Тырсин А. Н. Энтропийный подход к риск-анализу систем критичных инфраструктур / А. Н. Тырсин, А. А. Сурина // *Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научной конференции Секции естественных наук*. — 2014. — С. 210–218.
10. Цветков О. В. Энтропийный анализ данных в физике, биологии, технике / О. В. Цветков. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. — 202 с.
11. Тырсин А. Н. Исследование динамики многомерных стохастических систем на основе энтропийного моделирования / А. Н. Тырсин, О. В. Ворфоломеева //

Информатика и ее применения. — 2013. — Т. 7. — № 4. — С. 3–10.

12. Лебедева О. В. Энтропийное моделирование динамики многомерных стохастических систем: дис. ... канд. физ.-мат. наук / О. В. Лебедева. — Челябинск, 2015. — 174 с.

Дата поступления: 20.07.2022

Решение о публикации: 05.08.2022

Контактная информация:

КАНАЕВ Андрей Константинович — д-р техн. наук, проф. кафедры «Электрическая связь»; kanaevak@mail.ru

ОПАРИН Евгений Валерьевич — канд. техн. наук, инженер I категории; ОпаруН@mail.ru

ОПАРИНА Екатерина Владимировна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Механика и прочность материалов и конструкций»; sirayaekaterina@mail.ru

Ensuring Information Security for Clocked Network Synchronization System on the Basis of the System Entropy Analysis

A. K. Kanaev¹, E. V. Oparin², E. V. Oparina¹

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

²Institute of Signaling, Centralization and Communication Projecting on Railway Transport “Giprotranssignal-svyaz” — “Roszheldorproekt” JSC Branch, 49, Borovaya St., Saint Petersburg, 191119, Russian Federation

For citation: Kanaev A. K., Oparin E. V., Oparina E. V. Ensuring Information Security for Clocked Network Synchronization System on the Basis of the System Entropy Analysis // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 505–514. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-505-514

Summary

Purpose: To consider the issue of ensuring informational security for clocked network synchronization system during its operation as a part of telecommunication system. To achieve this goal, the article considers by stages the solution of the following tasks: system analysis of function process of clocked network synchronization system under the influence of organized intruders is carried out, main threats to information security for clocked network synchronization system are given. As a complex characteristic of function process of network clocked synchronization (NCS) system, the use of its differential entropy is proposed, the relationship of differential entropy values with parameter values for informational security and NCS system controllability is revealed which basis on, the approaches to ensure NCS system information security are proposed. **Methods:** Research methods used in the work are based on fundamental principles of system theory, probability theory, network theory, entropy modeling, system and mathematical analysis and mathematical modeling. **Results:** Entropy model for dynamics of function process of clocked network synchronization system has been formed, phased structure for actions to ensure information security of clocked network synchronization system on the strength of security and controllability requirements has been proposed. **Practical significance** of the work lies in the possibility for telecommunication system operators to form reasonably a quantitative and qualitative character of protection means as well as to adjust optimally the parameters of NCS system functioning and the system constituent elements.

Keywords: Telecommunication system, clocked network synchronization system, differential entropy, threat, information security.

References

1. Ereemeev E. L., Butsev S. F., Goray I. I., Buravtsova D. A., Usatskiy V. A., Dmitriev A. M. Sinkhronizatsiya i tsifrovaya peredacha v setyakh SDH [Synchronization and digital transmission in SDH networks]. *Innovatsii, nauka, obrazovanie* [Innovations, science, education]. 2021, I. 43, pp. 1010–1025. (In Russian)
2. Koltunov M. N., Shvarts M. L. Aktual'nye voprosy primeneniya oborudovaniya chastotno-vremennogo obespecheniya na ESE Rossii [Topical issues of the use of time-frequency equipment in the Unified Energy System of Russia]. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov* [Systems of synchronization, formation and processing of signals]. 2018, I. 2, pp. 113–120. (In Russian)
3. Lobastova M. V., Matyukhin A. Yu. Otsenka nadezhnosti raboty elementa seti taktovoy setevoy sinkhronizatsii [Evaluation of the reliability of the network element of clock network synchronization]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy* [Radio engineering and telecommunication systems]. 2020, I. 3, pp. 27–36. (In Russian)
4. Netes V. A. Soglashenie ob urovne obsluzhivaniya pri predostavlenii signalov sinkhronizatsii [Service level agreement for the provision of synchronization signals]. *Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov* [Systems of synchronization, formation and processing of signals]. 2018, I. 2, pp. 137–140. (In Russian)
5. Malygin S. V., Shvarts M. L. Osobennosti postroeniya sistem taktovoy setevoy sinkhronizatsii dlya raspredelennykh setey svyazi [Features of building clock network synchronization systems for distributed communication networks]. *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication]. 2021, I. 1, pp. 29–40. (In Russian)
6. Kanaev A. K., Gorbach A. N., Oparin E. V. Modelirovanie ataki na sistemu upravleniya set'yu sinkhronizatsii [Modeling an attack on a synchronization network control system]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University]. 2020, I. 72, pp. 35–47. (In Russian)
7. Kanaev A. K., Gorbach A. N., Oparin E. V. Obobshchennaya model' deystviy zloumyshlennika na nachal'nom etape realizatsii ataki na sistemu upravleniya set'yu sinkhronizatsii [A generalized model of an attacker's actions at the initial stage of an attack on a synchronization network control system]. *Telekommunikatsii* [Telecommunications]. 2020, I. 12, pp. 16–24. (In Russian)
8. Kanaev A. K., Oparin E. V., Oparina E. V. Metodika monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya seti taktovoy setevoy sinkhronizatsii na osnove entropiynogo analiza diagnosticheskikh parametrov ee elementov [Method of monitoring the technical condition of the clock network synchronization network based on the entropy analysis of the diagnostic parameters of its elements]. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya* [Issues of radio electronics. Series: TV Technique]. 2021, I. 3, pp. 108–117. (In Russian)
9. Tyrsin A. N., Surina A. A. Entropiynyy podkhod k risk-analizu sistem kritichnykh infrastruktur [Entropy approach to risk analysis of critical infrastructure systems]. *Nauka YuUrGU: materialy 66-y nauchnoy konferentsii Sektsii estestvennykh nauk* [SUSU Science: Proceedings of the 66th Scientific Conference of the Section of Natural Sciences]. 2014, pp. 210–218. (In Russian)
10. Tsvetkov O. V. *Entropiynyy analiz dannykh v fizike, biologii, tekhnike* [Entropy analysis of data in physics, biology, technology]. St. Petersburg: SPbGETU «LETI» Publ., 2015. 202 p. (In Russian)
11. Tyrsin A. N., Vorfolomeeva O. V. Issledovanie dinamiki mnogomernykh stokhasticheskikh sistem na osnove entropiynogo modelirovaniya [Study of the dynamics of multidimensional stochastic systems based on entropy modeling]. *Informatika i ee primeneniya* [Computer science and its applications]. 2013, Vol. 7, I. 4, pp. 3–10. (In Russian)
12. Lebedeva O. V. *Entropiynoe modelirovanie dinamiki mnogomernykh stokhasticheskikh sistem. Kand. Diss* [Entropy modeling of the dynamics of multidimensional stochastic systems. Cand. Diss]. Chelyabinsk, 2015. 174 p. (In Russian)

Received: July 20, 2022

Accepted: August 05, 2022

Author's information:

Andrey K. KANAEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Electrical Connection Department; kanaevak@mail.ru

Evgeny V. OPARIN — PhD in Engineering; First Category Engineer; onapuh@mail.ru

Ekaterina V. OPARINA — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanics and Strength of Materials and Structures; sirayaekaterina@mail.ru

УДК 621.3.053

Разработка стационарного устройства по диагностике малообслуживаемой системы заземления опор контактной сети на переменном токе

А. В. Агунов, И. А. Терёхин, Д. Д. Лаврухин, И. А. Баранов

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

Для цитирования: Агунов А. В., Терёхин И. А., Лаврухин Д. Д., Баранов И. А. Разработка стационарного устройства по диагностике малообслуживаемой системы заземления опор контактной сети на переменном токе // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 515–527. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-515-527

Аннотация

Цель: Разработка устройства диагностики и мониторинга состояния системы заземления опор контактной сети в режиме реального времени для создания комплексного решения проблемы малообслуживаемой системы заземления опор контактной сети. **Методы:** Сравнение характеристик элементной базы для устройства в зависимости от географической зоны применения, электрические расчеты для выбора элементов из существующих на рынке. **Результаты:** Рассмотрены различные варианты решения, а также выявлены и сведены наиболее оптимальные решения для создания устройства диагностики и мониторинга состояния системы заземления опор контактной сети в режиме реального времени. **Практическая значимость:** Показана острая необходимость в существующих реалиях создания и внедрения устройств диагностики и мониторинга в режиме реального времени систем электроснабжения, в том числе систем электроснабжения железных дорог, системы заземления опор контактной сети. Приведены расчеты для данного устройства по географическим зонам, а также показаны реальные наиболее оптимальные элементы для такого устройства из существующих на рынке.

Ключевые слова: Малообслуживаемая система, система заземления, диагностика и мониторинг, переменный ток, опора контактной сети.

Введение

Классическим способом обеспечения высоких показателей надежности является резервирование и увеличение запаса прочности. Так, при скорости движения свыше 160 км/ч запрещена эксплуатация контактного провода с износом, превышаю-

щим 20 % от номинального сечения. При этом на линиях с низкой скоростью движения допускается износ в 30 %. Идентичная ситуация с натяжением контактных проводов и тросов, входящих в состав контактной подвески. Несмотря на положительное влияние увеличения натяжения на качество

токосяема, его ограничивают на уровне около 50 % от предела текучести материала.

Описанные причины привели к тому, что эксплуатация контактной сети в настоящее время подразумевает замену контактных проводов значительно раньше достижения ими критического износа, а также приводит к понижению динамических характеристик работы системы токосяема. Исключительную актуальность имеют проблемы, связанные с увеличением допустимых скоростей движения и ресурса контактных проводов в условиях перехода на высокоскоростное движение, при проектировании высокоскоростных скоростных магистралей.

При эксплуатации заданные проектом характеристики регулировки контактной сети способны выходить за допустимые значения в результате воздействий электроподвижного состава, климатических условий и токовых нагрузок, что ведет к отказам. Для обеспечения качественного и надежного токосяема необходимо постоянно контролировать состояние контактной сети и тяговой сети в целом. Совершенствование технологий эксплуатации контактной сети с применением постоянно действующей системы диагностики и мониторинга способствует снижению потребности ОАО «РЖД» в поставках элементов тяговой сети с повышенными прочностными характеристиками, а также увеличению периода его замены, обеспечит возможность высокоскоростного движения на участках со стандартными конструктивными решениями.

Также контактная сеть имеет некоторые особенности своей конструкции, из-за которых возможность контролировать в режиме реального времени параметры ее работы затруднительно. К таким особенностям относятся: колоссальная протяженность, высокий уровень напряжения, а также ограничения, предъявляемые требованиями к массе устройств, закрепленных на контактных проводах. Согласно «Стратегии научно-

технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г. и на перспективу до 2030 года» [1] и «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г.» [2], ключевой задачей в сфере транспорта железных дорог является повышение надежности и эффективности технического обслуживания системы электроснабжения железных дорог за счет применения программно-аппаратных комплексов и устройств, которые могут диагностировать систему электроснабжения железных дорог в автономном режиме. Применение автономных устройств диагностики и мониторинга, связанных в единую систему, позволит повысить качество и эффективность обслуживания и ремонта, а также снизить потребность в высококвалифицированном персонале.

В настоящее время, согласно Инструкции ЦЭ-191 «По заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах» от 10 июня 1993 г. [3], эксплуатация заземляющих устройств заключается в своевременном проведении работ по техническому обслуживанию, текущему ремонту и капитальному ремонту. Выполнение данных требований влечет за собой высокие трудозатраты. Например, для замены индивидуального заземления опоры контактной сети требуется 32,4 чел.-ч, а для проверки и ремонта 1 пролета группового заземления опор контактной сети 31,1 чел.-ч.

Разработка стационарного устройства

Кафедрой «Электроснабжение железных дорог» ПГУПС разработаны новые конструкции системы заземления опор контактной сети (рис. 1), которые позволяют за счет применения электропроводящего бетона [4] полностью отказаться от заземляющих спусков, искровых промежутков и иной заземляющей арматуры. В новой системе заземления опоры контактной сети выступают в качестве естественных заземлителей [5]. Однако и

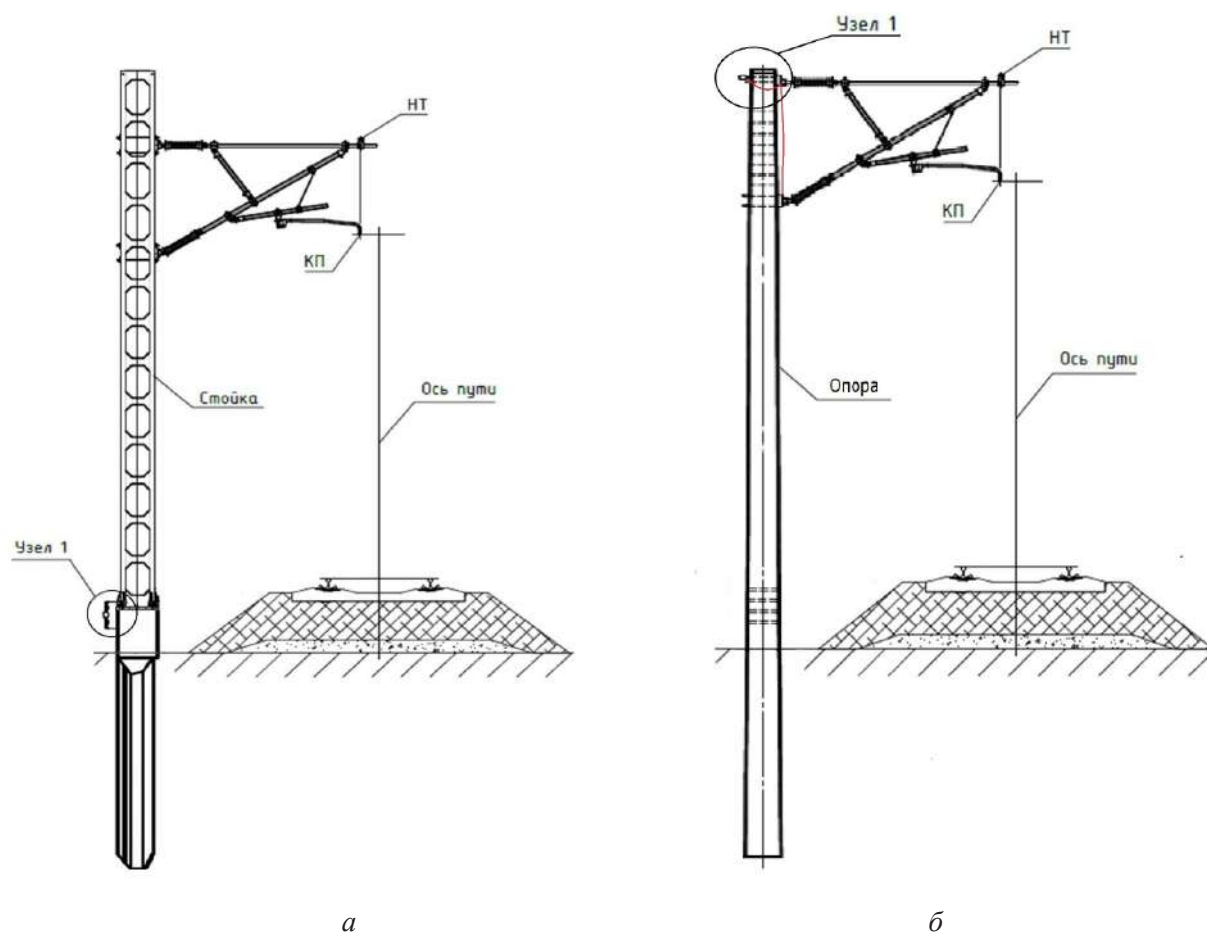


Рис. 1. Новые конструкции системы заземления опор контактной сети:
а — для металлических стоек опор; *б* — для нераздельных железобетонных опор
 (Узел 1 — соединение металлических элементов, способных попасть под напряжение в аварийном режиме с арматурой фундамента (опоры))

при такой системе заземления необходимо также контролировать параметр сопротивления [6], что не делает данную систему заземления малообслуживаемой. Для реализации проекта малообслуживаемой системы заземления необходимо в автоматическом режиме контролировать сопротивление заземления.

На рис. 2 представлена функциональная схема стационарного устройства по диагностике малообслуживаемой системы заземления опор контактной сети на переменном токе.

Данное стационарное устройство обладает следующей элементной базой:

- «передатчик» (компонент, осуществляющий сбор и передачу информации об измеряемом параметре);
- аккумуляторная батарея, отвечающая за автономное питание устройства в целом;
- источник электрической энергии для аккумулятора (в качестве возможных вариантов питания, для соблюдения условия малообслуживаемости, а также в соответствии с одной из целей стратегии развития РЖД до 2030 г. [2] по приоритету «зеленым» технологиям и обеспечением снижения нагрузки на окружающую среду в 2 раза, рассматриваются солнечные батареи).

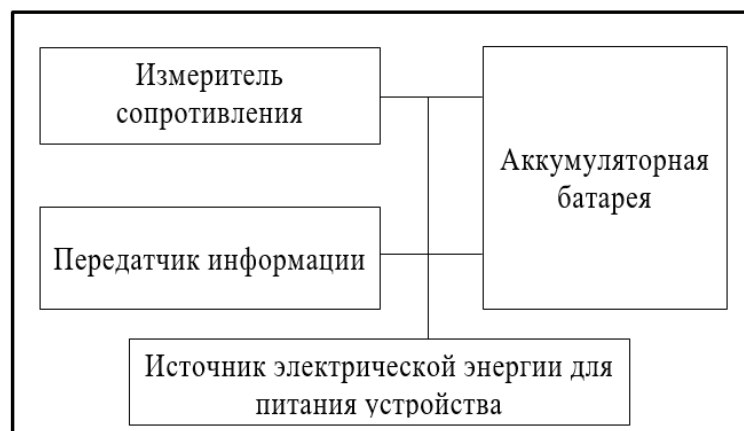


Рис. 2. Функциональная схема стационарного устройства по диагностике малообслуживаемой системы заземления опор контактной сети на переменном токе

С точки зрения алгоритма работы (рис. 3) устройство функционирует следующим образом. Устройство располагается на металлическом проводнике в районе «узла 1» (см. рис. 1) или, если применяется групповое заземление, на спуске троса группового заземления к арматуре опоры контактной сети (данный вариант и рассмотрим далее) [7].

Устройство находится во включенном состоянии на постоянной основе, обеспечивая непрерывный процесс диагностики и мониторинга уровня сопротивления заземления. Статус работоспособности определяется самодиагностикой устройства. В случае отсутствия напряжения внутри устройства оператор в контролируемом пункте на ближайшей тяговой подстанции получает извещение об этом путем смены цветовой индикации датчика конкретного устройства с зеленого цвета (работоспособный режим) на красный цвет (нарушение работоспособного режима).

При отсутствии нарушений в работе устройства в штатном режиме, после успешно пройденной самодиагностики производится измерение сопротивления группы опор. Далее происходит сравнение измеренного параметра сопротивления с оптимальными параметрами, заданными и внесенными в устройство при установке. В течение

срока эксплуатации задаваемые оптимальные параметры могут быть изменены, так как это обусловлено необходимостью подстраивать предельно допустимый уровень сопротивления для корректной работы релейной защиты электрифицированного участка.

В случае, если сравнение не выявило выхода параметра уровня сопротивления за предельно допустимое значение, контроль уровня сопротивления продолжается, возвращая работу устройства на этап сразу после успешного прохождения самодиагностики. Если сравнение выявило нарушение предельно допустимого значения, предупреждающий сигнал об этом поступает на рабочее место оператора в контролируемый пункт на тяговой подстанции. После уведомления оператора устройство продолжает работу в штатном режиме, выполняя этап непрерывного измерения сопротивления группы опор.

Так как группы опор могут быть объединены тросом группового заземления в двух вариациях, по Т-образной или Г-образной схемам, это предполагает различие в местах установки разрабатываемого устройства на электрифицированной линии железных дорог. Схематичное изображение с местами расположения представлено на рис. 4 и 5.



Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы устройства

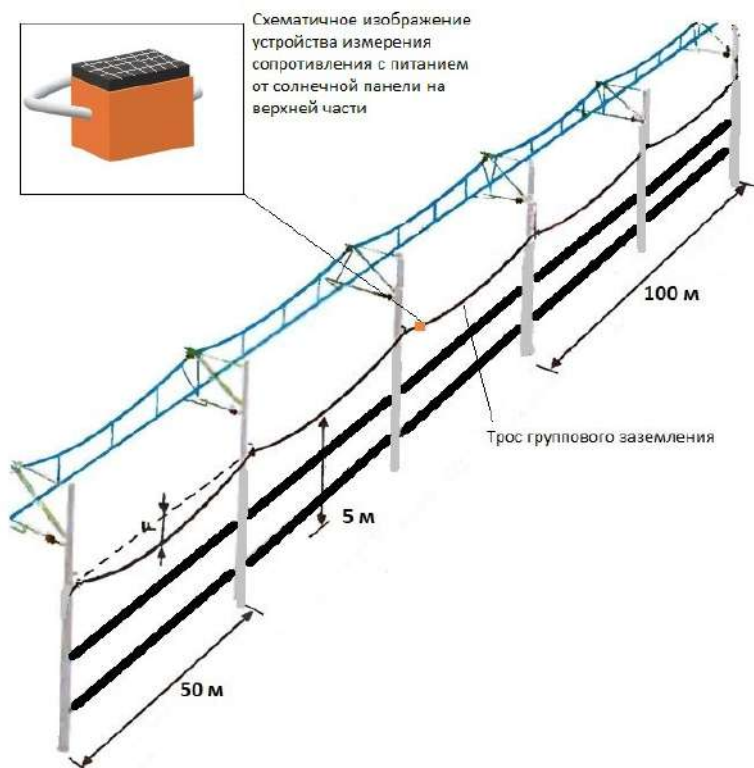


Рис. 4. Месторасположение устройства при Т-образной схеме объединения заземления опор

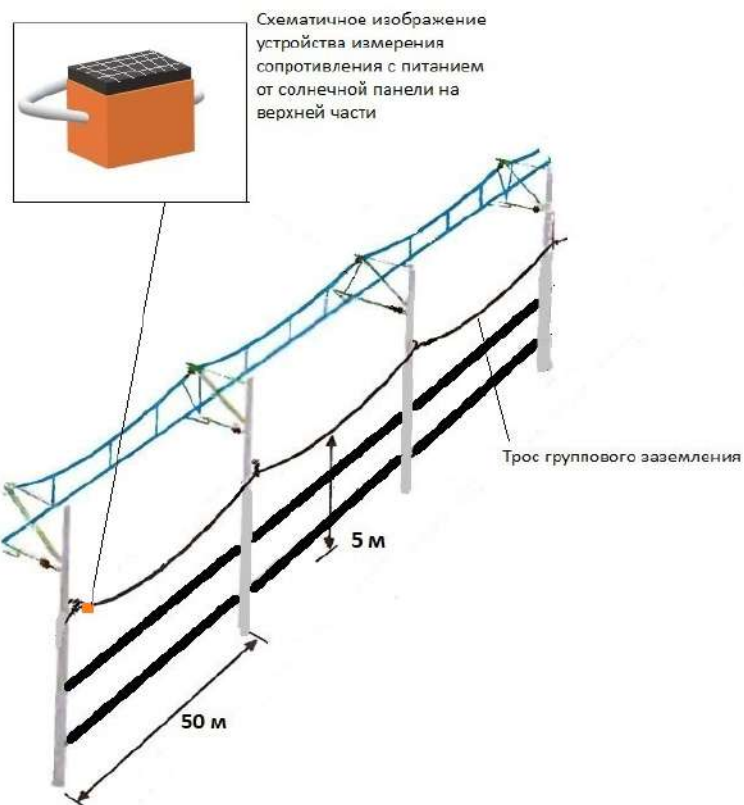


Рис. 5. Месторасположение устройства при Г-образной схеме объединения заземления опор

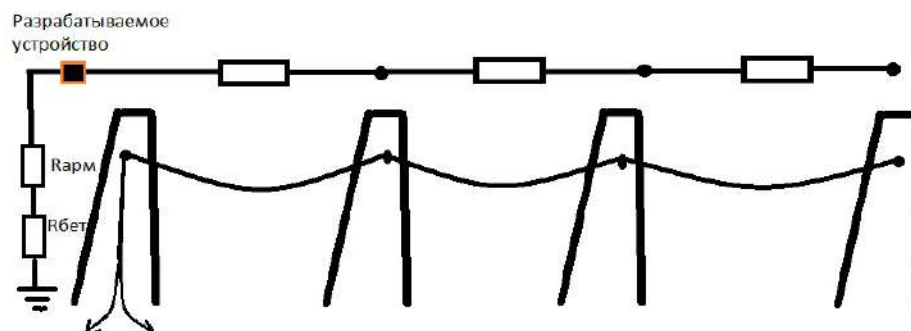


Рис. 6. Схема сопротивлений модернизированной системы заземления при Г-образном соединении

Электрическая схема, отражающая параметр сопротивления в электрической цепи при объединении группы опор тросом группового заземления по Г-образной схеме, изображена на рис. 6.

Таким образом, исходя из понимания требуемых функций устройства, его месторасположения, наличия основных его компонентов, алгоритма работы, далее следует описать принцип работы прибора по измерению сопротивления заземления и провести технический расчет. Расчет должен отражать мощность, потребляемую устройством, с учетом непрерывной его работы, аккумуляторную батарею, достаточную для такой мощности, а также солнечную панель, способную питать соответствующий аккумулятор. Несмотря на обозначенные ранее иные виды альтернативных источников электрической энергии (ветроэнергетика, электромагнитные волны), при расчетах используются данные для построения конструкции разрабатываемого устройства только с применением солнечной энергетики, так как на сегодняшний день именно этот вид возобновляемого источника энергии является наиболее распространенным. Из этого факта следует глубокая степень изученности технических тонкостей использования, а также относительная дешевизна разработки и производства.

Принцип измерения сопротивления заземления состоит в следующем: измеряется испытательный

ток, протекающий по заземляющему проводнику или шине, которые в данном случае являются вторичной обмоткой. После чего с помощью вольтметра снимается показание действующего напряжения в цепи. Для вычисления искомого сопротивления достаточно воспользоваться законом Ома.

Непрерывная работа разрабатываемого устройства напрямую сказывается на потребляемой им энергии. Для расчета данной величины необходимо знать параметры всех величин, по которым ее можно вычислить. Таковыми являются сила тока (I), напряжение (U) и время (t). При условии непрерывной работы время будет составлять 24 часа. Электрические параметры принимаются приблизительно, в соответствии с таковыми у других приборов по измерению сопротивления заземления. Параметр силы электрического тока составляет 30 миллиампер, параметр напряжения составляет 30 вольт. Для корректности производимых расчетов необходимо привести параметры в соответствие международной системе единиц (СИ). Таким образом, суточное потребление энергии рассчитывается по формуле:

$$W = I \cdot U \cdot t, (1)$$

где $I = 30 \text{ мА} = 0,03 \text{ А}$;

$U = 30 \text{ В}$;

$t = 24 \text{ ч} = 86\,400 \text{ с}$.

$$W = 0,03 \cdot 30 \cdot 86400 = 77\,760 \text{ Дж} = \\ = 0,0216 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Солнечные дни

Так как для питания разрабатываемого устройства выбрана солнечная энергетика, довольно значимым фактором становится среднегодовое количество солнечных дней, потому что именно во время солнечной ясной погоды солнечная панель работает на полную мощность. Карта Российской Федерации, отражающая среднегодовое количество солнечных часов и дней в году, изображена на рис. 7.

Исходя из этой карты, а также прочих источников информации по продолжительности солнечного сияния в течение года, территорию страны можно условно разделить на 7 зон по количеству солнечных часов и дней:

- 1 зона (2400 часов и более — 100 дней и более);
- 2 зона (от 2200 часов до 2400 часов — от 91 до 100 дней);
- 3 зона (от 2000 часов до 2200 часов — от 83 до 91 дня);
- 4 зона (от 1800 часов до 2000 часов — от 75 до 83 дней);
- 5 зона (от 1600 часов до 1800 часов — от 66 до 75 дней);
- 6 зона (от 1400 часов до 1600 часов — от 58 до 66 дней);
- 7 зона (менее 1400 часов — до 58 дней).

Несмотря на тот факт, что наиболее распространены в применении на производствах и в бытовых нуждах являются поликристаллические солнечные панели, которые не слишком сильно зависят от прямых солнечных лучей и вполне

КОЛИЧЕСТВО СОЛНЕЧНЫХ ДНЕЙ В ГОДУ ПО ГОРОДАМ РОССИИ



Рис. 7. Карта солнечных часов и дней в году на территории Российской Федерации

ТАБЛИЦА 1. Минимально необходимая емкость аккумулятора для обеспечения автономности

№ зоны	1	2	3	4	5	6	7
Емкость АКБ, А · ч	не менее 15,12	не менее 15,84	не менее 16,56	не менее 17,28	не менее 18	не менее 18,72	не менее 19,44

ТАБЛИЦА 2. Подбор аккумулятора, удовлетворяющего условиям

№ зоны	1	2	3	4	5	6	7
Производитель	Delta Battery	Delta Battery	Delta Battery	Delta Battery	Varta	Varta	Delta Battery
Емкость АКБ, А · ч	16	16	17	18	19	19	20
Масса, кг	6,09	6,09	5,7	5,9	7,04	7,04	5,5
Габарит: Д × Ш × В, мм	207 × 72 × 164	207 × 72 × 164	181 × 77 × 167	182 × 76 × 167	175 × 101 × 156	175 × 101 × 156	181 × 77 × 167
Стоимость, руб.	5150	5150	4500	4600	6600	6600	6200

работоспособны в облачную и даже пасмурную погоду, параметр количества солнечных дней нельзя оставлять без внимания. Емкость аккумулятора разрабатываемого устройства должна быть выбрана с учетом «запаса» и в зависимости от «солнечной зоны» места предполагаемой установки устройства для обеспечения автономности.

Источник питания

Таким образом, на основании имеющихся данных необходимо произвести расчет ориентировочной емкости аккумуляторной батареи для обеспечения автономности в условиях отсутствия солнечного излучения, способного восполнить заряд аккумулятора с помощью солнечной панели. Расчет емкости состоит в вычислении ежемесячного количества дней без солнца по зонам, а затем, учитывая известное суточное потребление энергии, в вычислении необходимой емкости для полного покрытия потребления мощности за известный период времени. Результаты вычислений по всем зонам сведены в табл. 1.

Теперь, имея представление о необходимых емкостях аккумуляторной батареи, необходимо для каждой отдельной зоны подобрать свой аккумулятор, пользуясь различными их классификациями.

Аккумуляторные батареи используются для автономного питания в широком диапазоне производств и техники, поэтому и требования, предъявляемые к этим устройствам, тоже весьма различны [8].

Примеры аккумуляторов с подходящими параметрами по «солнечным зонам» отражены в табл. 2.

Солнечная панель

Способы изготовления солнечных панелей с применением аморфного кремния значительно отличается от производства солнечных панелей на кристаллических фотоэлектрических элементах. Особенность заключается в применении не чистого кремния, а гидрид кремния, что позволяет его парам осажаться на подложку панели. Итогом такого технологического решения является отсутствие классических кристаллов и существенное снижение затрат на производство. В настоящее время известно уже несколько поколений солнечных панелей, изготовленных по такой технологии, с каждым новым поколением возрастает КПД таких панелей. Так, первые образцы модулей имели КПД порядка 4–5 %, на данный момент наиболее распространены модели следующего поколения с эффективностью 8–9 %. Также разработаны и постепенно входят в рас-

ТАБЛИЦА 3. Подбор солнечной панели, удовлетворяющей условиям

№ зоны	1	2	3	4	5	6	7
Производитель	Delta Battery	Delta Battery	One-Sun	Delta Battery	One-Sun	Delta Battery	One-Sun
Отдача электро-энергии, Вт	200	200	280	280	280	280	280
Габарит: Д × Ш, мм	1300 × 991	1300 × 991	1640 × 992	1640 × 990	1640 × 992	1640 × 990	1640 × 992
Стоимость, руб.	10 000	10 000	11 500	12 000	11 500	12 000	11 500

пространение панели с КПД до 12 %, однако их стоимость достаточно велика.

Ключевой особенностью технологии создания солнечных панелей с применением аморфного кремния является то, что они позволяют изготавливать модули на гибкой подложке, что является причиной их широкого применения в гибких тонкопленочных солнечных модулях. Однако, что очевидно, такое исполнение солнечной панели имеет более высокую стоимость [9].

Для генерации электроэнергии физико-химическая структура гидрида кремния обладает способностью хорошо поглощать фотоны слабого рассеянного света. Ввиду чего обуславливается эффективность применения данной технологии в северных районах.

Важно отметить, что и при высокой температуре работоспособность модулей на основе гидроксида кремния не снижается, хоть и уступает модулям из арсенида галлия.

В заключение можно указать следующие преимущества солнечных панелей на основе гидроксида кремния:

- возможность изготовления в жестком исполнении и в гибком, что, как следствие, дает возможность придания любой архитектурной формы при размещении на зданиях и сооружениях;
- практически полное отсутствие негативного влияния от высоких температур на работоспособность;
- простота и надежность конструкции, ввиду чего такие панели практически не ломаются;

– меньшие потери производительности при загрязнении поверхности, чем у аналогов;

– поддержание высокой эффективности при слабом рассеянном свете.

Срок службы панелей из аморфного кремния составляет около 25 лет при потере мощности за весь срок не более чем на 15 %. Главным недостатком рассмотренного оборудования является необходимость иметь большие площади для размещения оборудования заданной мощности.

Основными параметрами, по которым определяется пригодность использования солнечной панели в разрабатываемом устройстве, являются отдача электрической энергии, габариты панели и стоимость. В первую очередь солнечная панель должна удовлетворять параметру мощности, будучи достаточной для питания определенного аккумулятора в соответствии с зоной установки. Примеры панелей с подходящими параметрами по «солнечным зонам» отражены в табл. 3.

На основании полученных данных по предложенным солнечным панелям для каждой конкретной зоны можно сделать вывод о том, что каждая из панелей подходит для установки в разрабатываемое устройство, габаритные размеры и стоимость отличаются незначительно.

Применение инвертора не является необходимым, так как разрабатываемое устройство питается от аккумулятора 12 В, а инверторы применяют для преобразования постоянной энергии, получаемой панелями от солнца, превращая в переменную с повышением напряжения до 220 В [10].

Заключение

По результатам расчета параметров разрабатываемого устройства и подбора удовлетворяющих параметры основных его компонентов можно сделать следующие выводы.

При всей неоспоримой перспективности подобного устройства по автоматическому контролю уровня сопротивления заземления опор контактной сети на переменном токе как неотъемлемой части малообслуживаемой системы заземления нельзя не учитывать возникшие в процессе разработки сложности, связанные с особенностями технического исполнения. Одной из главнейших проблем является автономность работы устройства и способ ее поддержания за счет применения солнечной энергетики.

Необходимо учитывать, что устройство находится во включенном состоянии на протяжении всего времени эксплуатации, для чего используется энергоемкий аккумулятор, разнообразие которого в свободной продаже достаточно велико. Гораздо важнее, чтобы солнечная панель, функционирующая в составе устройства, круглогодично имела возможность подпитывать данный аккумулятор. В результате размер подобной панели получается довольно большим, что влечет за собой некоторые сложности во взаимном расположении компонентов разрабатываемого устройства на спуске троса группового заземления. Также нельзя не учитывать такие факторы, как влияние местоположения на выработку энергии, угол наклона солнечной панели, ее КПД в течение года, учет потерь энергии, взаимную совместимость всех компонентов и некоторые другие параметры.

Затронутые вопросы требуют серьезного научного подхода в процессе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Однако при их проведении и подтверждении эффективности технологии со всех точек зрения имеет место шанс ее распространения, доход от которого окупит затраченные средства.

Библиографический список

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г. и на перспективу до 2030 г. / Утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 17 апреля 2018 г. № 769/р.
2. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. / Утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р.
3. Инструкции ЦЭ-191 «По заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах» от 10 июня 1993 г.
4. Терёхин И. А. Разработка оптимального состава электропроводящего бетона / И. А. Терёхин, А. В. Агунов, Е. Г. Абишов и др. // III Бетанкуровский Международный инженерный форум: сборник трудов, Санкт-Петербург, 02–03 декабря 2021 г. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2021. — С. 164–165.
5. Баранов И. А. Совершенствование системы заземления опор контактной сети за счет применения электропроводящих фундаментов / И. А. Баранов, А. В. Агунов, И. А. Терёхин // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 19–26 апреля 2021 г. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2021. — С. 109–113.
6. Титова Т. С. Оценка условий электробезопасности при применении опор контактной сети в качестве естественных заземлителей / Т. С. Титова, Т. П. Сацук, И. А. Терёхин, И. В. Тарабин // Электротехника. — 2021. — № 2. — С. 7–11.
7. Правила устройства электроустановок. Изд. 7. Общие правила. Заземление и защитные меры безопасности. Утверждены Приказом № 204 Министерства энергетики Российской Федерации от 8 июля 2002 г.
8. ГОСТ Р МЭК 62485-2—2011. Батареи аккумуляторные и установки батарейные. Требования безопасности. Ч. 2. Стационарные батареи / Утв. приказом

Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 1196-ст.

9. Казанский А. Г. Тонкопленочные кремниевые солнечные элементы на гибких подложках / А. Г. Казанский // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. — 2015. — Т. 7. — № 1. — С. 15–24. — DOI: 10.17725/rensit.2015.07.015.

10. Изучение солнечных фотоэлектрических элементов: учебно-методическое пособие / В. В. Бессель, В. Г. Кучеров, Р. Д. Мингалеева. — М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2016. — 90 с.

Дата поступления: June 21, 2022

Решение о публикации: August 29, 2022

Контактная информация:

АГУНОВ Александр Викторович — д-р техн. наук, проф.; alexagunov@mail.ru

ТЕРЁХИН Илья Александрович — канд. техн. наук, доц.; terekhin@pgups.ru

ЛАВРУХИН Дени Дмитриевич — студент; denislavr@mail.ru

БАРАНОВ Иван Александрович — аспирант; baranov@pgups.ru

Development of Stationary Device for Diagnostics of Low-Maintenance Grounding System of Catenary Poles Being on Alternating Current

A. V. Agunov, I. A. Terekhin, D. D. Lavrukhin, I. A. Baranov

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

For citation: Agunov A. V., Terekhin I. A., Lavrukhin D. D., Baranov I. A. Development of a Stationary Device for Diagnostics of Low-Maintenance Grounding System of Catenary Poles Being on Alternating Current // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 515–527. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3 -515-527

Summary

Purpose: Development of the device for diagnostics and monitoring the state of grounding system of catenary poles in real time to create a comprehensive solution to the problem of low-maintenance grounding system of catenary poles. **Methods:** Comparison of the characteristics of element base for the device depending on application geographical area; electrical calculations for element selection from existing elements on the market. **Results:** Different solutions are considered as well as the most optimal ones for creating the device for diagnosing and monitoring the state of grounding system for catenary poles in real time are identified and summarized. **Practical significance:** Urgent necessity in the existing realities in creating and implementing devices for real-time diagnosing and monitoring power supply systems, including power supply ones of railroads, grounding system for catenary poles, is shown. Calculations for the given device by geographical zones are presented and also, real, the most optimal elements for such device from existing ones on the market are shown.

Keywords: Low-maintenance system, grounding system, diagnostics and monitoring, alternating current, catenary pole.

References

1. *Strategiya nauchno-tehnologicheskogo razvitiya kholdinga «RZhD» na period do 2025 goda i na perspektivu do 2030 goda. / Utv. rasporyazheniem OAO «RZhD» ot 17 aprelya 2018 g. № 769/r* [The strategy of scientific and

technological development of the Russian Railways holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030. / Approved. by order of Russian Railways OJSC dated April 17, 2018 No. 769/r]. (In Russian)

2. *Strategiya razvitiya zhelezнодорожного транспорта v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda / Utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 17.06.2008 g. № 877-r* [Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030 / Approved. Decree of the Government of the Russian Federation dated June 17, 2008 No. 877-r]. (In Russian)

3. *Instruktsii TsE-191 «Po zazemleniyu ustroystv elektrosnabzheniya na elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorogakh» ot 10.06.1993 g.* [Instructions TsE-191 “On grounding of power supply devices on electrified railways” dated 10.06.1993]. (In Russian)

4. Terekhin I. A., Agunov A. V., Abishov E. G. Razrabotka optimal'nogo sostava elektroprovodyashchego betona [Development of the optimal composition of electrically conductive concrete]. *III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: Sbornik trudov, Sankt-Peterburg, 02–03 dekabrya 2021 goda* [III Betancourt International Engineering Forum: Proceedings, St. Petersburg, December 02–03, 2021 of the year]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2021, pp. 164–165. (In Russian)

5. Baranov I. A., Agunov A. V., Terekhin I. A. Sovershenstvovanie sistemy zazemleniya opor kontaktnoy seti za schet primeneniya elektroprovodyashchikh fundamentov [Improvement of the grounding system of contact network supports through the use of electrically conductive foundations]. *Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXXI Vserossiyskoy nauchno-tekhnikeskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Sankt-Peterburg, 19–26 aprelya 2021 goda* [Transport: problems, ideas, prospects: Proceedings of the LXXXI All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, graduate students and young scientists, St. Petersburg, April 19–26, 2021]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2021, pp. 109–113. (In Russian)

6. Titova T. S., Satsuk T. P., Terekhin I. A., Tarabin I. V. Otsenka usloviy elektrobezopasnosti pri primenenii opor kontaktnoy seti v kachestve estestvennykh zazemliteley [Evaluation of electrical safety conditions when

using contact network supports as natural ground electrodes]. *Elektrotehnika* [Electrotechnics]. 2021, I. 2, pp. 7–11. (In Russian)

7. *Pravila ustroystva elektroustanovok 7e izdanie. Obshchie pravila. Zazemlenie i zashchitnye mery bezopasnosti. Utverzhdeny Priказом № 204 Ministerstva energetiki Rossiyskoy Federatsii ot 08.07.2002* [Rules for electrical installations 7th edition. General rules. Grounding and safety precautions. Approved by Order No. 204 of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated July 8, 2002]. (In Russian)

8. GOST R MEK 62485-2—2011 Batarei akkumulyatornye i ustanovki batareynye. Trebovaniya bezopasnosti. Chast' 2. Statsionarnye batarei. [GOST R IEC 62485-2—2011 Batteries and battery installations. Safety requirements. Part 2. Stationary batteries]. *Utv. prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 13.12.2011 g. № 1196-st* [Approved. by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of December 13, 2011 No. 1196-st]. (In Russian)

9. Kazanskiy A. G. Tonkoplennochnye kremnievye solnechnye elementy na gibkikh podlozhkakh [Thin-film silicon solar cells on flexible substrates]. *Radioelektronika. Nanosistemy. Informatsionnye tekhnologii* [Radioelectronics. Nanosystems. Information Technology]. 2015, vol. 7, I. 1, pp. 15–24. DOI: 10.17725/rensit.2015.07.015. (In Russian)

10. Bessel' V. V., Kucherov V. G., Mingaleeva R. D. *Izuchenie solnechnykh fotoelektricheskikh elementov* [Study of solar photovoltaic cells]. Moscow: RGU nefi i gaza (NIU) imeni I.M. Gubkina Publ., 2016. 90 p. (In Russian)

Received: June 21, 2018

Accepted: August 29, 2022

Author's information:

Alexander V. AGUNOV — Dr. Sci in Engineering, Professor; alexagunov@mail.ru

Ilya A. TEREKHIN — PhD in Engineering, Associate Professor; terekhin@pgups.ru

Denis D. LAVRUKHIN — Student; denislavr@mail.ru

Ivan A. BARANOV — Postgraduate Student; baranov@pgups.ru

УДК 656.21:355.691.2

Методы и мероприятия устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла

Г. И. Паламарчук¹, А. А. Фомин²

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

²Военный институт (Железнодорожных войск и военных сообщений) «Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева», Российская Федерация, 198504, Санкт-Петербург, гор. Петродворец, ул. Суворовская, 1

Для цитирования: Паламарчук Г. И., Фомин А. А. Система обеспечения устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 528–536. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-528-536

Аннотация

Цель: Определение методов и мероприятий (оперативных, инженерно-строительных и организационно-технических) по повышению устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла. **Методы:** Общая теория систем. **Результаты:** Разработан комплекс мероприятий, позволяющих обеспечивать устойчивость процессов функционирования железнодорожного узла в зависимости от условий транспортной обстановки. **Практическая значимость:** Выбор мероприятия по повышению устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла как основного элемента железных дорог при организации железнодорожных перевозок.

Ключевые слова: Железнодорожный узел, система, устойчивость, процесс функционирования, методы, мероприятия системы обеспечения устойчивости.

Введение

Растущий спрос на качественные транспортные услуги в настоящее время удовлетворяется не полностью из-за недостаточного технического уровня транспортной системы и накопленного отставания в области транспортных технологий.

Рост объемов перевозок сдерживается дефицитом пропускных и провозных возможностей, недостаточным техническим и технологическим

уровнем транспортной системы. Поэтому стратегической целью государственной транспортной политики является развитие транспортной системы, повышение ее безопасности и устойчивости функционирования.

Сферами, в которых государство стимулирует и поддерживает необходимые изменения, являются: инновации на транспорте, внедрение наиболее эффективных технологий перевозок грузов и пассажиров; развитие транспортной системы в

интересах обеспечения задач в области обороны и безопасности государства.

Одним из главных условий повышения эффективности транспортной системы является повышение технического уровня транспортных средств и оборудования, а также применение современных перевозочных, управленческих и информационно-телекоммуникационных технологий.

При этом важная роль при различных нагрузках и режимах функционирования отводится железнодорожному транспорту, который будет удовлетворять потребности и нужды экономики страны в перевозках. В свою очередь, устойчивое функционирование железных дорог обеспечивается разработкой и формированием мероприятий, направленных на удовлетворение потребностей государства в перевозках.

Устойчивость процессов функционирования железнодорожного узла

Поскольку железнодорожный узел как объект железнодорожного транспорта является стыковым пунктом железных дорог с другими видами транспорта в единой транспортной системе страны и занимает ведущее место в перевозочном процессе, то необходимо показать место и роль железнодорожного узла в системе обеспечения устойчивости функционирования железных дорог в целом.

Подготовка железнодорожных узлов к работе требует значительных капиталовложений и должна соответствовать предъявляемым техническим и эксплуатационным требованиям [1–3], к которым относятся: безопасность движения поездов; обеспечение заданной пропускной и перерабатывающей способности; изменение направления перевозок в зависимости от складывающейся обстановки; непрерывность работы узла в различных условиях; пропуск без остановки транзитных поездопотоков (оперативные, снабженческие,

эвакуационные и др.) через основные станции с организацией технического обслуживания их на предузловых станциях; пропуск поездов в обход основных станций узла по специальным обходным или соединительным путям и ветвям; специализация станций узла для переработки обычных и опасных грузов; выполнение сортировочной работы; взаимозаменяемость, рассредоточение, обеспечение восстановления основных станций и устройств узла; создание резервов производственной мощности узла [4].

Сама подготовка железнодорожных узлов к работе в различных условиях будет реализовываться по определенным временным периодам их функционирования [5–7], к которым отнесем период заблаговременной подготовки и период проведения мероприятий непосредственной подготовки.

В соответствии с указанными периодами наиболее сложные условия функционирования железнодорожного узла будут складываться в непосредственный период и в ходе восстановления производственных мощностей. При этом период проведения мероприятий непосредственной подготовки совпадает с выполнением максимальных объемов перевозок и характеризуется наибольшей интенсивностью работы железнодорожного узла по освоению поездо- и вагонопотоков, а также необходимостью использования всех возможных резервов по увеличению пропускной и перерабатывающей способностей.

При этом основной функцией железнодорожного узла является обеспечение перевозочного процесса в соответствии с планом перевозок. Поэтому следует считать, что чем полнее и своевременнее он обеспечивает перевозки, тем выше устойчивость процессов его функционирования в различные периоды.

Понятие «устойчивость функционирования транспорта» [7–9] определяется как свойство транспорта, характеризующее способность его



Рис. 1. Направления и методы обеспечения устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла (по элементам (объектам))

выполнять перевозки по обеспечению неотложных нужд населения и экономики страны, а также производить продукцию установленной номенклатуры после различного рода возмущений внутреннего и внешнего характера. Оно учитывает все многообразие факторов, включая эксплуатационно-технические отказы, повреждения элементов и всей системы стихийными факторами. Применение этой интегральной характеристики позволяет полнее отразить качество процессов функционирования объектов транспорта [4, 10].

Методы и мероприятия по повышению устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла

С точки зрения функционального состава система обеспечения устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла включает комплекс согласованных по назначению, месту и времени мероприятий, направленных на уменьшение и восполнение вероятных потерь производственных мощностей (пропускной, перерабатывающей и погрузочно-выгрузочной способности).

Таким образом, исследование мероприятий указанной системы обеспечения возможно в рамках оценки устойчивости процессов функциони-

рования железнодорожного узла с учетом различных факторов, направлений и сроков реализации соответствующих мероприятий.

Анализ исследований в предметной области показал, что в настоящее время определены основные направления обеспечения устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла, к которым относятся (рис. 1):

- снижение эффективности производственных возможностей;
- ликвидация «узких мест» в его наличной производственной мощности (пропускной, перерабатывающей и погрузочно-выгрузочной способности).

Достижение целей по каждому из направлений происходит с применением различных методов приведения в соответствие возможностей транспорта. Основными методами в этом случае являются:

- заблаговременная и непосредственная подготовка железнодорожного узла к работе в различных условиях;
- восстановление сооружений и устройств железнодорожного узла;
- интенсификация использования наличных производственных мощностей (пропускной,



Рис. 2. Классификация мероприятий системы обеспечения устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла

перерабатывающей и погрузочно-выгрузочной способности).

На основании обозначенных на рис. 1 направлений и методов предлагается классификация мероприятий по повышению устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла, которая приведена на рис. 2. В качестве основных признаков предлагаемой классификации рассматриваются мероприятия: по времени реализации; по назначению; по характеру и содержанию; по планирующему органу и уровню принятия решения; по способу влияния на производственную мощность; по принадлежности привлекаемых сил и средств.

Сообразно с предложенной классификацией рассмотрим мероприятия, выделенные по характеру и содержанию в: оперативные, организационно-технические и инженерно-строительные.

К группе оперативных относятся мероприятия, проводимые дирекцией инфраструктуры в интересах повышения устойчивости транспортной системы, в рамках которой рассматривается железнодорожный узел (рис. 3).

Группу инженерно-строительных мероприятий, связанных со значительными затратами ресурсов, следует разделить на три группы (рис. 4).

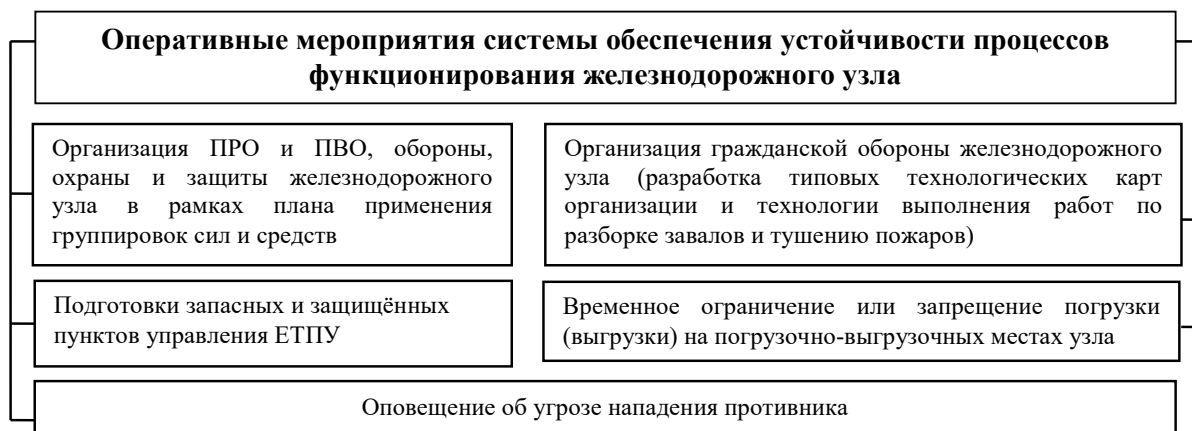


Рис. 3. Оперативные мероприятия системы обеспечения устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла

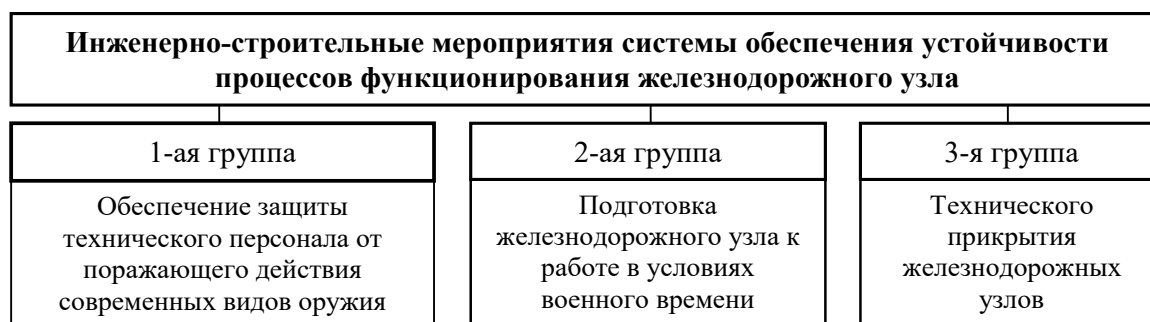


Рис. 4. Инженерно-строительные мероприятия по обеспечению устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла

Исходя из рис. 4, к мероприятиям первой группы относятся:

- подготовка на станциях узла и на подходах к нему защитных сооружений и устройств;
- подготовка и рациональное размещение санпропускников, пунктов специальной обработки транспортных средств, а также обеспечение индивидуальными средствами защиты технического персонала.

Вторая группа включает следующие мероприятия:

- подготовка и строительство дублирующих устройств (обходов, соединительных ветвей, погрузочно-выгрузочных мест, сортировочных устройств), а также создание подвижных комплексов различных устройств, способных при

необходимости полностью или частично заменить основные устройства;

- развитие и реконструкция станций узла, усиление их погрузочно-выгрузочной, пропускной и перерабатывающей способности (удлинение путей, укладка дополнительных путей в парках станций, переустройство горловин, развязка подходов в разных уровнях, строительство экипировочных устройств и др.);
- подготовка предузловых станций для технического обслуживания поездов на подходах к узлу.

В третью группу выделены следующие мероприятия:

- выделение и развертывание сил и средств технического прикрытия для ликвидации послед-

ствий по восполнению потерь производственных мощностей;

– разработка проектной документации, обосновывающих материалов (проектных соображений), технических заданий по восстановлению объектов технического прикрытия.

В группе организационно-технических рассматриваются мероприятия, проводимые для повышения устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла с относительно небольшими затратами ресурсов на их реализацию, в результате которых повышается (перераспределяется) наличная пропускная, перерабатывающая и погрузочно-выгрузочная способность, а также, как и инженерно-строительные, мероприятия, способствующие сокращению перерывов в движении поездов и потерь производственной мощности объектов узла (рис. 5).

Критерии оценки устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла

Исходя из достаточно большого набора рассматриваемых мероприятий (рис. 3–5), возникает необходимость использования процедуры формализации в рамках снижения размерности указанного набора. Для этой цели предлагается использовать следующую процедуру: оценка эффективности их реализации как альтернативных, т. е. отдельно реализуемое мероприятие (например, только оперативное или только инженерно-строительное), так и неальтернативных, т. е. совместно реализуемые мероприятия (например, оперативные совместно с инженерно-строительными или инженерно-строительные с организационно-техническими), тем самым формируя эффективное множество по предлагаемому показателю эффективности. При этом определяется этот уровень в соответствии с условием максимизации уровня устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла.

В рамках данной процедуры возникает необходимость в формировании показателя оценки:

$$\beta = \frac{V}{\Delta N}, \quad (1)$$

где β , V — удельные и общие затраты ресурсов на реализацию одного из мероприятий по повышению устойчивости;

ΔN — прирост производственной мощности (пропускной, перерабатывающей и погрузочно-выгрузочной способности) железнодорожного узла.

Однако применение показателя (1) для оценки эффективности мероприятий по повышению устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла затруднено из-за значительного количества видов ресурсов.

С учетом этого предлагается в качестве показателя для оценки эффективности использовать величину удельных затрат времени на восстановление железнодорожного узла (открытия сквозного движения):

$$\beta = \frac{T_y}{\Delta N} \text{ или } \tau = \frac{\Delta N}{T_y}, \quad (2)$$

где ΔN — увеличение количества поездов, пропускаемых железнодорожным узлом в единицу времени после реализации одного из мероприятий по повышению его производственной мощности (пропускной, перерабатывающей и погрузочно-выгрузочной способности по элементам);

T_y — условный перерыв в движении поездов.

Выводы

Таким образом, в статье предлагаются мероприятия по повышению устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла, заключающиеся в принципиальном переходе от

Организационно-технические мероприятия системы обеспечения устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла	
По сокращению времени на переработку грузо-, вагоно- и пассажиропотоков	По перераспределению сортировочной работы в узле
Совмещение операций и согласование технологии работы станций узла с воинским графиком движения поездов на подходах и внутри узла	Вынос обработки транзитных поездов и обслуживания перевозимых войск на предузловые станции, а погрузку и выгрузку на станции участков, примыкающих к узлу
Сокращение стационных интервалов на станциях	Открытие ранее построенных и законсервированных обходов железнодорожных узлов, устройств локомотивного хозяйства, автоматики и связи и других технических средств
Ликвидация враждебности маршрутов	Изменение специализации станций (станционных путей) и технологического процесса их работы
Максимальная параллельность выполнения всех операций в железнодорожном узле	Изменения и корректировка плана формирования поездов с целью перераспределения сортировочной работы в узле
Предварительное определение очерёдности и порядка пропуска поездов в обход разрушенного узла с учётом состояния поездного положения на подходах к нему	Использование подьездных путей для формирования поездов или подформирования групп вагонов
Изменение технологических маршрутов следования поездов в узле	По расщеплению парка вагонов и локомотивов на станциях узла на уровне, не превышающем их возможности по расщеплению
	Временное прекращение приёма поездов отдельных категорий на станции
	Усиление темпа отправления сформированных поездов со станций
	Организацию вывода отдельных поездов и групп вагонов на промежуточные станции, перегоны, подьездные пути и соединительные ветви
	Расщепленное выполнение технологических операций на станциях с воинскими эшелонами и транспортами

Рис. 5. Организационно-технические мероприятия системы обеспечения устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла

максимизации уровня устойчивости (зачастую его абсолютизации) к определению достаточности этого уровня для предлагаемых условий при реализации рассматриваемых мероприятий. Данное обстоятельство позволяет снизить затраты ресурсов (на 10–40 %), выделяемых в рамках указанных ранее направлений и методов обеспечения устойчивости процессов функционирования железнодорожного узла.

Библиографический список

1. Аристов В. В. Станции и узлы для военных целей / В. В. Аристов, В. Н. Белов, С. В. Земблинов и др.; под ред. проф. С. В. Земблинова. — Л.: ВАТТ, 1956. — 330 с.
2. Шацев Н. З. Основы теории живучести транспорта: учебное пособие / Н. З. Шацев, В. П. Довбня. — Л.: ВАТТ, 1985. — 73 с.
3. Фомин А. А. Влияние перерывов в движении поездов на характер эксплуатационной работы железнодорожных направлений перевозки войск / Д. А. Павленко, В. П. Махонько, А. А. Фомин // *Специальная техника и технологии транспорта*. — 2019. — № 3(41). — С. 46–49.
4. Кацер Н. Н. Порядок оказания услуг по организации перевозок / Н. Н. Кацер, Г. И. Паламарчук, Д. В. Серебряков // *Сборник научных статей ВИ (ЖДВ и ВОСО)*. — Петергоф, 2020. — № 5(43). — С. 125–131.
5. Гроте Г. В. Эксплуатация железных дорог в военное время: учебник / Г. В. Гроте, М. Е. Дидковский, К. М. Козаков и др.; под ред. проф. Г. В. Гроте. — Л.: ВАТТ, 1966. — 434 с.
6. Довбня В. П. Основы теории устойчивости функционирования транспорта: учебное пособие. 2-е изд. / В. П. Довбня, Д. В. Кочнев, А. А. Фомин. — СПб.: ВАТТ, 2009. — 168 с.
7. Кацер Н. Н. Оценка эффективности транспортных услуг при выполнении перевозок / Н. Н. Кацер, Г. И. Паламарчук, В. Н. Кузьменкова // *Специальная техника и технологии транспорта: сборник научных статей*. — Петергоф: ВИ (ЖДВ и ВОСО), 2021. — № 10. — С. 147–152.
8. Шацев Н. З. Основы теории устойчивости функционирования транспорта: учебное пособие / Н. З. Шацев, В. П. Довбня. — СПб.: ВАТТ, 1997. — 147 с.
9. Фомин А. А. К вопросу обеспечения устойчивости процессов функционирования железнодорожных узлов в условиях военного времени / А. А. Фомин, Д. В. Кочнев, В. М. Кочнев, С. В. Ярошенко // *Сборник статей и тезисов докладов постоянно действующего межвузовского научно-практического семинара*. — СПб.: ВИТУ. — 2009. — Вып. 12. — С. 147–148.
10. Паламарчук Г. И. Сервисное обслуживание грузовых вагонов на основе контракта жизненного цикла / Г. И. Паламарчук, В. Н. Кузьменкова, Н. Н. Кацер // *Сборник научных статей*. — Петергоф: ВИ (ЖДВ и ВОСО), 2021. — № 9. — С. 97–103.

Дата поступления: 27.06.2022

Решение о публикации: 26.08.2022

Контактная информация:

ПАЛАМАРЧУК Геннадий Иванович — канд. техн. наук, доц.; palamarchuk.67@mail.ru

ФОМИН Алексей Анатольевич — канд. техн. наук, доц.; aleksfsp@yandex.ru

Methods and Measures for Railway Junction Functioning Stability

G. I. Palamarchuk¹, A. A. Fomin²

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky av., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Military Institute (Railway troops and military communications) of the of the Military Academy of Logistics named after General of the Army A. V. Khrulyov, 1, Suvorovskaya av., Petrodvorec town, Saint Petersburg, 198504, Russian Federation

For citation: Palamarchuk G. I., Fomin A. A. Methods and Measures for Railway Junction Functioning Stability // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 528–536. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-528-536

Summary

Purpose: Determination of methods and measures (operative, engineering-construction and organizational-technical) on railway junction functioning stability. **Methods:** General theory of systems. **Results:** Measure complex has been developed allowing to provide for railway junction functioning stability depending on transport situation conditions. **Practical significance:** Measure choice on the rise of the stability of function processes for railway junction as a major element of railways at railway transportation organization.

Keywords: Railway junction, system, stability, function process, methods, measures for stability provision system.

References

1. Aristov V. V., Belov V. N., Zemblinov S. V. *Stantsii i uzly dlya voennykh tseley* [Stations and nodes for military purposes]. L.: VATT Publ., 1956. 330 p. (In Russian)
2. Shatsev N. Z. *Osnovy teorii zhivuchesti transporta* [Fundamentals of the theory of transport survivability]. VATT Publ., 1985. 73 p. (In Russian)
3. Fomin A. A. Vliyaniye pereryvov v dvizhenii poezdov na kharakter ekspluatatsionnoy raboty zheleznodorozhnykh napravleniy perevozki voysk [Influence of breaks in the movement of trains on the nature of the operational work of the railway lines of transportation of troops]. *Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta* [Special vehicles and transport technologies]. 2019, I. 3 (41), pp. 46–49. (In Russian)
4. Katser N. N., Palamarchuk G. I., Serebryakov D. V. *Poryadok okazaniya uslug po organizatsii perevozok* [The procedure for the provision of services for the organization of transportation]. Petergof, 2020, I. 5(43), pp. 125–131. (In Russian)
5. Grote G. V., Didkovskiy M. E., Kozakov K. M. *Ekspluatatsiya zheleznykh dorog v voennoe vremya* [Operation of railways in wartime]. VATT Publ., 1966. 434 p. (In Russian)
6. Dovbnya V. P. *Osnovy teorii ustoychivosti funktsionirovaniya transporta* [Fundamentals of the theory of sustainable functioning of transport]. St. Petersburg: VATT Publ., 2009. 168 p. (In Russian)
7. Katser N. N., Palamarchuk G. I., Kuz'menkova V. N. Otsenka effektivnosti transportnykh uslug pri vypolnenii perevozok [Evaluation of the effectiveness of transport services in the performance of transportation]. *Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta* [Special equipment and technologies of transport]. Petergof, 2021, pp. 147–152. (In Russian)
8. Shatsev N. Z. *Osnovy teorii ustoychivosti funktsionirovaniya transporta* [Fundamentals of the theory of sustainable functioning of transport]. St. Petersburg: VATT Publ., 1997. 147 p. (In Russian)
9. Fomin A. A. K voprosu obespecheniya ustoychivosti protsessov funktsionirovaniya zheleznodorozhnykh uzlov v usloviyakh voennogo vremeni [On the issue of ensuring the stability of the processes of functioning of railway junctions in wartime conditions]. *Sbornik statey i tezisov dokladov postoyanno deystvuyushchego mezhvuzovskogo nauchno-prakticheskogo seminara* [Collection of articles and abstracts of reports of the permanent interuniversity scientific and practical seminar]. St. Petersburg: VITU Publ. 2009, I. 12, pp. 147–148. (In Russian)
10. Palamarchuk G. I., Kuzmenkova V. N., Katser N. N. Servisnoe obsluzhivanie gruzovikh vagonov na osnove kontrakta zhiznennogo tsikla [Service maintenance of freight cars on the basis of a life cycle contract]. *Sbornik nauchnikh statey* [Collection of scientific articles]. Petergof, 2021, I. 9, pp. 97–103. (In Russian)

Received: June 27, 2022

Accepted: August 26, 2022

Author's information:

Gennadiy I. PALAMARCHUK — PhD in Engineering, Associate Professor; palamarchuk.67@mail.ru
Alexey A. FOMIN — PhD in Engineering, Associate Professor; aleksfsp@yandex.ru

УДК 656.2

Сравнение энергетической эффективности перевозок на железных дорогах мира

М. Ю. Изварин, М. В. Евстафьева, Д. А. Талюкин, В. С. Павлова

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

Для цитирования: Изварин М. Ю., Евстафьева М. В., Талюкин Д. А., Павлова В. С. Сравнение энергетической эффективности перевозок на железных дорогах мира // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 537–549. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-537-549

Аннотация

Цель: Провести аналитическое сравнение энергоэффективности (удельной энергоемкости) перевозок на железнодорожном транспорте, проанализировать динамику пассажиро- и грузооборота по годам, рассчитать относительную погрешность потребления топливно-энергетических ресурсов железнодорожным транспортом (ТЭР), а также изучить статистику потребления ТЭР для осуществления этой работы по странам: Российская Федерация и Соединенные Штаты Америки. Провести аналитическое исследование расхождения и статистической погрешности между данными мировой и национальной статистики Росстата. Показать взаимосвязь энергоэффективности железнодорожных перевозок с уровнем выбросов CO₂. Изучить тренд изменения удельной энергоемкости по годам и предложить возможные причины наличия динамики. **Методы:** Аналитическая работа со статистическими данными международных и национальных сборников в динамике по годам по выбранным странам; сравнение и выводы на основании рассматриваемых данных. **Результаты:** Проведен сравнительный анализ динамики изменения пассажирского и грузооборота в динамике по ряду лет, рассчитана динамика статистических отклонений данных потребления ТЭР, рассмотрено потребление основных видов топлива железнодорожным транспортом, рассчитана эффективность энергопотребления данным видом транспорта, и проанализирована энергоемкость железнодорожного транспорта ведущих стран мира. **Практическая значимость:** Проблема экологического загрязнения окружающей среды играет существенную роль в мире на сегодняшний день. Железнодорожный транспорт, играющий важную экономическую роль в каждой стране, является крупным энергопотребителем. Наравне с другими энергопотребителями, на железнодорожном транспорте также проводится постоянный анализ эффективности использования топлива и объемов выбросов CO₂. Сравнительный анализ изменения удельной энергоемкости по годам с предположительными выводами о причинах, повлекших за собой данную динамику, позволит спрогнозировать и обеспечить своевременную реакцию на основании первых предпосылок экономических и общеполитических изменений. Анализ энергоэффективности железнодорожного транспорта продемонстрирует положение российских железных дорог в динамичном сравнении с западными странами и позволит проанализировать положительный опыт развития отрасли в других странах с возможностью прикладного применения в нашей стране.

Ключевые слова: Железнодорожные перевозки, приведенный грузооборот, пассажирооборот, энергоэффективность, окружающая среда, выбросы CO₂, энергоемкость.

Энергоэффективность и потребление ТЭР железнодорожным транспортом

С 2012 по 2018 г. Международный союз железных дорог (UIC) и Международное энергетическое агентство (МЭА, IEA) выпускали справочник *Railway Handbook: Energy Consumption and CO₂ Emissions* (Энергопотребление и выбросы двуокиси углерода), в котором по открытым статистическим данным выполняли оценку энергоэффективности железнодорожных перевозок в разных странах мира, как входящих в Организацию экономического сотрудничества и развития ОЭСР (OECD), так и нет.

Соответственно, в этом сборнике был выполнен и расчет влияния железнодорожных перевозок на окружающую среду, прежде всего за счет выбросов CO₂. К сожалению, после принятия Парижских соглашений по климату в 2015 г. МСЖД прекратил выпуск данного издания; соответственно, расчет велся только до 2015 г., а последний выпуск справочника датирован 2018 г.

Тем не менее продолжение данного расчета представляет интерес, так как определение стран, добившихся существенных успехов в плане повышения энергоэффективности железнодорожных перевозок, позволит не только определить, чей опыт необходимо изучать и использовать. Между экономической и энергетической эффективностью имеется взаимосвязь, поэтому, побудив частные и государственные компании-операторы и компании — распорядители инфраструктуры к повышению экономических показателей за счет роста энергоэффективности, можно добиться сокращения нагрузки на окружающую среду во всем мире.

В начале необходимо определиться с понятиями «энергоэффективность» и «энергоёмкость». Энергоэффективность — это критерий рациональности использования топливно-энергетических ресурсов или же использования меньшего количества энергии для обеспечения выполнения одного и того же объема перевозочной работы

применительно к железнодорожному транспорту. Энергоёмкость — это количество энергии, необходимое для осуществления работы на одну единицу измерения перевозок, например на один приведенный тонно-километр [1–6]. Энергоёмкость — один из основных показателей энергоэффективности. Энергоёмкость перевозочной деятельности зависит как от подвижного состава, так и от организации перевозок. Если требуется оценить энергетическую эффективность тягового подвижного состава, то используется показатель «удельный расход электроэнергии/топлива на тягу».

Издание «Энергопотребление и выбросы двуокиси углерода» всех лет является продолжением аналогичного выпуска 2012 г., где определены величины удельного энергопотребления железных дорог РФ, США, Канады, Японии и Китая в 2004–2012 гг. в соответствии с методикой UIC и IEA. Авторы поставили своей задачей не просто сделать перенос и пересчет статистических данных, а представить полноценную работу, в которой определено влияние кризисов (экономических и политических) на динамику энергопотребления перевозок за последние 15–20 лет.

Для построения сравнительной характеристики необходимо определить энергоёмкость железнодорожных перевозок в Российской Федерации и в других странах. Это можно сделать, используя национальную статистику и международные источники данных.

Говоря о Российской Федерации, где доминирующее положение на рынке перевозок и наиболее значительное энергопотребление имеет ОАО «РЖД», другие же компании потребляют меньше энергоресурсов, данные Росстата и энергобаланс МЭА (*Energy Balances of non-OECD Countries*) имеют расхождение в учете по основным видам топлива. Для сравнения принимаются основные для большинства стран ТЭР из железнодорожного сектора: электроэнергия и дизельное топливо. Дан-

ТАБЛИЦА 1. Потребление топлива железными дорогами, по данным Росстата и МЭА

		2009		2010		2011		2012		2013	
Электроэнергия	Росстат, млн т у. т. /ПДж	5,284	154,861	5,635	165,15	5,624	164,825	5,784	169,515	5,672	166,233
	МЭА, МТОЕ/ ПДж	3,909	163,66	4,003	167,60	4,076	170,653	4,192	175,510	4,111	172,119
Диз. топливо	Росстат, млн. т у. т.	3,781	110,812	4,066	119,164	4,192	122,857	4,275	125,289	4,139	121,304
	МЭА, МТОЕ/ ПДж	1,793	75,069	1,634	68,412	1,824	76,367	1,860	77,874	1,801	75,404
Общее потребление	Росстат, млн. т у. т. / ПДж	9,065	265,673	9,701	284,314	9,816	287,683	10,059	294,804	9,811	287,537
	МЭА, МТОЕ/ ПДж	5,702	238,731	5,637	236,012	5,900	247,021	6,052	253,384	5,912	247,523

ные в тоннах условного топлива (по данным Росстата) и в тоннах нефтяного эквивалента, по данным МЭА, с 2009 по 2013 г. приведены в табл. 1.

Погрешность в данных различных систем учета (МЭА и Росстат) объясняется разницей способов учета. При этом МЭА получает данные от Росстата, однако впоследствии их не корректирует, а Росстат по мере получения данных от региональных представителей вносит поправки в итог (особенно это касается учета дизельного топлива, потраченного на тягу поездов). Так как временная задержка в выходе статистических данных всегда примерно одинакова, можно выявить поправку и впоследствии использовать ее для корректировки данных международной статистики. Статистические данные, приведенные к одним и тем же единицам измерения, представлены в виде графика на рис. 1.

Диаграмма наглядно показывает совпадающий общий тренд изменения рассматриваемых величин, а незначительное расхождение параметров между двумя системами обработки статистических данных объяснено выше.

Относительная погрешность учета ТЭР представлена на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что погрешность носит систематический характер и почти не изменяется год от года, составляя в среднем 13,92 %. Учитывая в расчетах поправку, соответствующую этой погрешности, можно использовать для анализа различные статистические системы, как отечественные, так и зарубежные.

Потребление энергоресурсов по видам натурального топлива железнодорожным транспортом в России определяем из данных Росстата (см. раздел 3). Данные сведены в табл. 2.

Кривую энергопотребления до 2009 г. можно построить по данным статистического сборника Handbook МЭА Energy Consumption and CO₂ Emissions, в котором данные кривые имеются.

Данные по грузообороту и пассажирообороту можно определить из ежегодного статистического отчета ОАО «РЖД», а также из «Транспорт в России 2020», КонсультантПлюс, Партнер.ру можно получить данные по коммерческому грузообороту и пассажирскому обо-

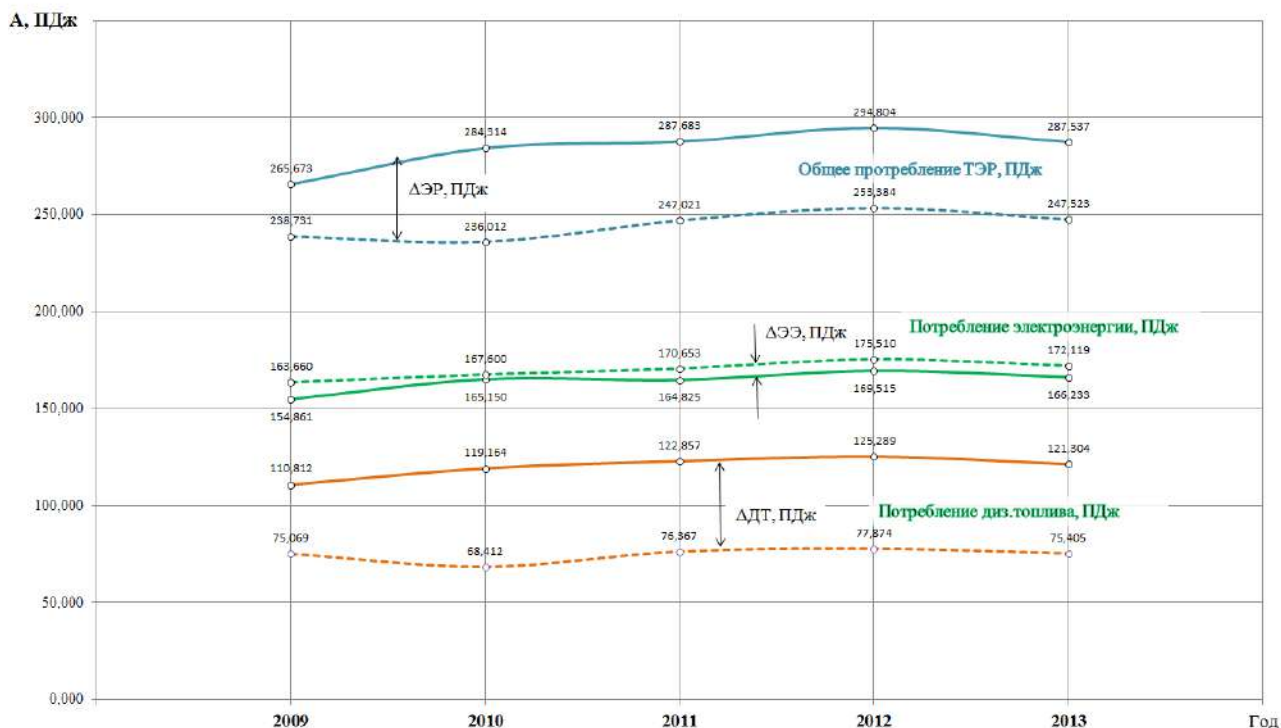


Рис. 1. Сравнение статистических данных Росстата и МЭА потребления ТЭР

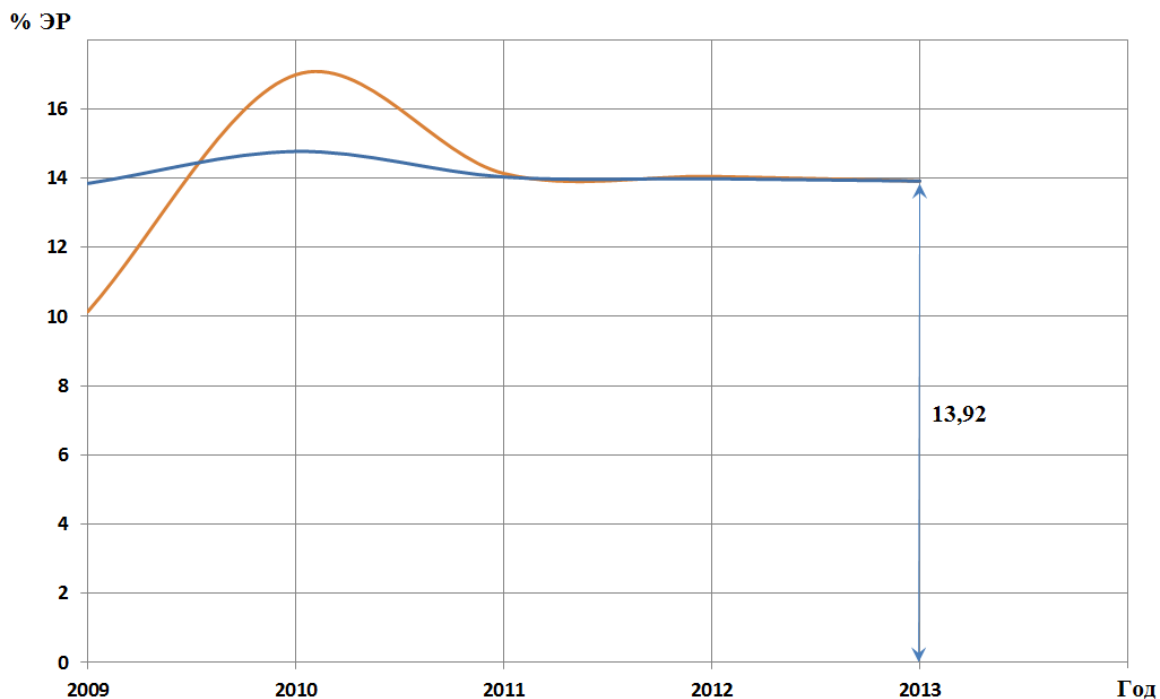


Рис. 2. График изменения относительной погрешности учета ТЭР

ТАБЛИЦА 2. Потребление натурального топлива железными дорогами России

Вид энерго-ресурса	Ед. изм.	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Электрическая энергия	млн кВт · ч	43 014	45 873	45 782	47 084	46 175	46 965	45 944	46 555	48 430	50 219	50 068	49 150
Дизельное топливо	тыс. т	2608	2804	2891	2948	2854	2767	2626	2578	2571	2647	2633	2457
Уголь	тыс. т	1977	2094	1561	1351	1234	1145	994	902,5	703,5	677,9	630,4	612,5
Мазут	тыс. т	572,4	558	487	422,8	382,9	356,7	324,1	308,6	288,8	274,5	256	231,5
Газ природный	млн куб. м	633,3	778,8	574	537,7	500,1	494,4	494,3	494,3	488,8	494,3	430,8	390,8
Бензин	тыс. т	124,8	123,6	114	111,4	108,1	99,9	75,8	34,8	34,2	37,3	37,2	36,5

ТАБЛИЦА 3. Данные по пассажиро- и грузообороту

Вид работы	2016	2017	2018	2019	2020
Пассажирские перевозки, млрд пасс-км	124,6	123,1	129,5	133,6	78
Грузовые перевозки, млрд т-км	2344,1	2493	2598	2602,5	2544,9
Приведенный грузооборот, млрд приведенных т-км	2568,7	2616,1	2727,5	2736,1	2622,9

роту. Для удобства работы с данными приведем их в табличной форме с суммой приведенного грузооборота по приведенной ниже формуле:

$$\Gamma_{\text{пр}} = \Gamma + \Pi \cdot K_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где $\Gamma_{\text{пр}}$ — приведенный грузооборот, прив. Ткм;

Π — пассажирооборот, пасс-км;

$K_{\text{пр}} = 1$ — коэффициент приведения.

Результаты расчетов сведены в табл. 3.

На основании приведенных данных производится расчет удельного энергопотребления (энергоёмкости) перевозочной деятельности.

По результатам расчетов построена зависимость удельного энергопотребления железнодорожного транспорта в РФ, приведенная на рис. 3. Из графика следует, что с 2006 по 2020 г. удельное энергопотребление (энергоёмкость) уменьшилась почти на 20 %. Кроме того, видно, что экономический кризис 2008 г. и связанное с ним падение перевозок практически не сказалось на удельном энергопотреблении, а кризис 2019–2020 гг., связанный с эпидемией коронавируса, вызвал рост энергоёмкости.

Энергоёмкость перевозок в США

Структура железнодорожной отрасли США

Ежегодник Railroad Facts дает возможность взглянуть на статистические показатели работы железных дорог США I класса в их динамике.

Совет по наземному транспорту (СНТ), являющийся Федеральным ведомством, ответственным за экономическое регулирование деятельности железнодорожного транспорта, ежегодно классифицирует железные дороги по трем видам в соответствии с их уровнем доходности: в 2019 г. к железным дорогам I класса относились дороги с годовым эксплуатационным доходом от 504,80 млн долларов и выше; к железным дорогам II класса — от 40,38 млн долларов и выше, но меньше дохода дорог I класса; к железным дорогам III класса — менее, чем минимально требуемый доход для дорог II класса. Эти пороговые финансовые критерии ежегодно пересматриваются с учетом темпов инфляции. Все сортировочные станции и терминалы относятся к железным дорогам III класса.

На железные дороги I класса США приходится большая часть перевозочной деятельности,

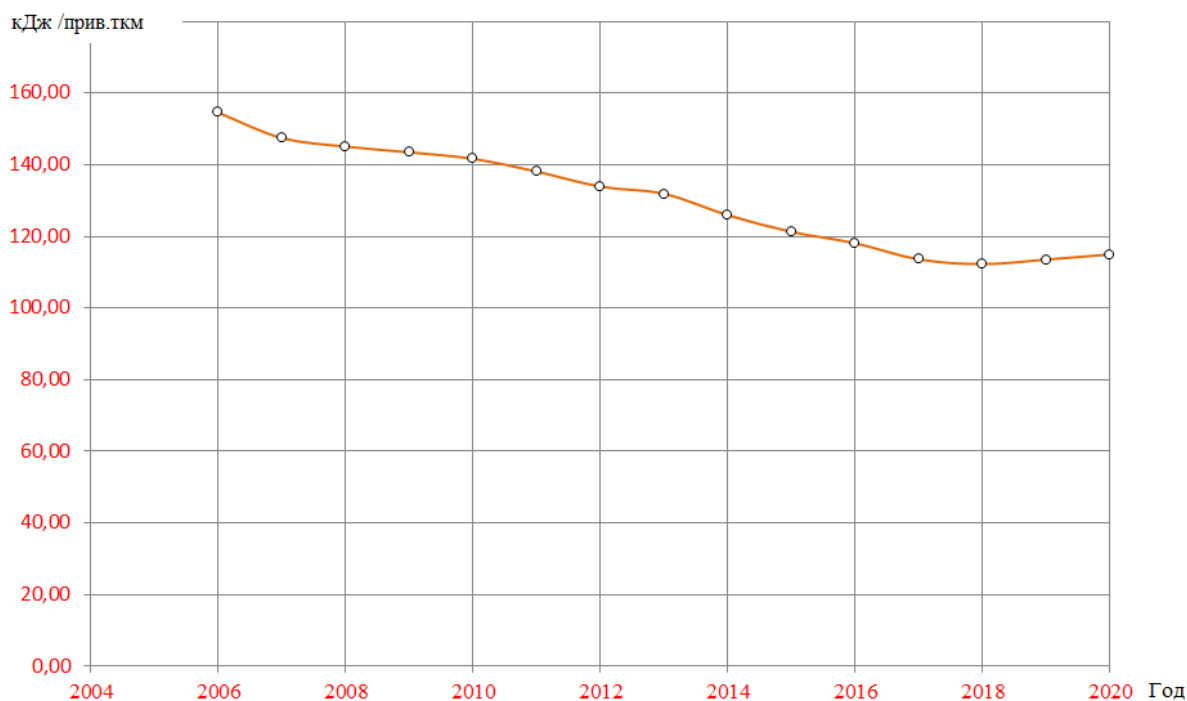


Рис. 3. Удельное энергопотребление (энергоёмкость перевозочной деятельности) железнодорожного транспорта в России

ТАБЛИЦА 4. Грузовая железнодорожная отрасль США, 2017 г.

Класс/категория железных дорог	Количество	Протяженность, км	Численность персонала, чел.	Доход, млрд долларов
Железные дороги I класса	7	149 762	147 537	\$ 67,3
Региональные	22	17 759	5801	\$ 1,3
Местные	584	52 719	13 919	\$ 2,7
Итого по США	613	220 240	167 257	\$ 71,3
Канадские железные дороги	1	76		
Всего	614	220 315		

поэтому достаточно выполнить анализ для них, а не для всей отрасли (табл. 4).

В статистических данных США грузооборот принято измерять в «коротких» тонно-милях. Поэтому для сопоставления с данными статистики ОАО «РЖД» необходимо произвести пересчет в метрические единицы измерения.

Для сопоставления показателей с данными РФ необходимо выполнить пересчет единиц измерения, так как США не перешли на полноценное

использование системы СИ. При этом грузооборот определяется по формуле:

$$\Gamma_{US, M} = \Gamma_{TM} \cdot K_{П1} \cdot K_{П2}, \quad (2)$$

где $\Gamma_{US, M}$ — грузооборот в коротких тоннах на милю (Ton-Miles);

Γ_{TM} — грузооборот в коротких тоннах на милю (Ton-Miles);

$K_{П1}$ — коэффициент перевода миль в км ($K_{П1} \approx 1,609$);

ТАБЛИЦА 5. Коммерческий грузооборот на 1 литр потребляемого топлива

Год	Revenue Ton-Miles (millions)	Fuel consumed (million gallons)	Коммерческий грузооборот, млн ткм	Потребление топлива в грузовом движении, млн литров	Коммерческий грузооборот на 1 л потребленного топлива, ткм/л
1960	572 309	3463	835 571	13 107	63,7
1970	764 809	3545	1 116 621	13 418	83,2
1980	918 958	3904	1 341 679	14 777	90,8
1990	1 033 969	3115	1 509 595	11 790	128
2000	1 465 960	3700	2 140 302	14 005	152,8
2006	1 771 897	4192	2 586 970	15 867	163,0
2007	1 770 545	4062	2 584 996	15 375	168,1
2008	1 777 236	3886	2 594 765	14 709	176,4
2009	1 532 213	3192	2 237 032	12 082	185,2
2010	1 691 004	3494	2 468 866	13 225	186,7
2011	1 729 256	3685	2 524 714	13 948	181
2012	1 712 567	3600	2 500 348	13 626	183,6
2013	1 740 687	3682	2 541 403	13 936	182,4
2014	1 851 229	3867	2 702 794	14 637	184,7
2015	1 738 283	3692	2 537 893	13 974	182,3
2016	1 585 440	3385	2 314 742	12 812	180,7
2017	1 674 784	3495	2 445 185	13 229	184,8
2018	1 729 638	3656	2 525 271	13 838	182,5
2019	1 614 498	3419	2 357 167	12 941	182,1

$K_{П2}$ — коэффициент перевода тонн коротких в тонны метрические ($K_{П2} \approx 0,9072$).

Примеры расчета:

$$\Gamma_{(US)} = \Gamma_{(TM)} \cdot K_{П1} \cdot K_{П2} = 1\,614\,498 \cdot 1,609 \cdot 0,9072 = 2\,357\,167 \text{ млн т-км.}$$

Данные коммерческого грузооборота на 1 литр потребляемого топлива представлены в табл. 5.

В качестве единиц измерения топлива в США принято применять галлоны (1 галлон равен 3,785 л.)

Тогда:

$$Q_{US, л} = Q_M \cdot K_{П3}, \quad (3)$$

где $Q_{US, л}$ — объем потребленного в США дизельного топлива, выраженный в литрах;

$K_{П3}$ — коэффициент перевода галлонов в литры ($K_{П3} \approx 3,785$);

$$Q_{US, л} = K_{П3} = 3419 \cdot 3,785 = 12\,941 \text{ л.}$$

Однако для корректного сопоставления с США необходимо перевести объем израсходованного дизельного топлива в массу, как это принято в РФ.

Для этого необходимо использовать плотность дизельного топлива, принятую в ЦУНР:

$$m(\text{дт } US, \text{ кг}) = Q(US, \text{ л}) \cdot \frac{\rho_{дт}}{1000}, \quad (4)$$

где $m_{дт}$ — масса потребленного дизельного топлива, кг;

$\rho_{дт}$ — плотность дизельного топлива для РФ, 850 кг/м³;

$Q_{US, л}$ — объем потребленного дизельного топлива, л.

График коммерческого грузооборота ж/д класса США приведен на рис. 4. Кривая потребления топлива в грузовом движении США представлена на рис. 5.

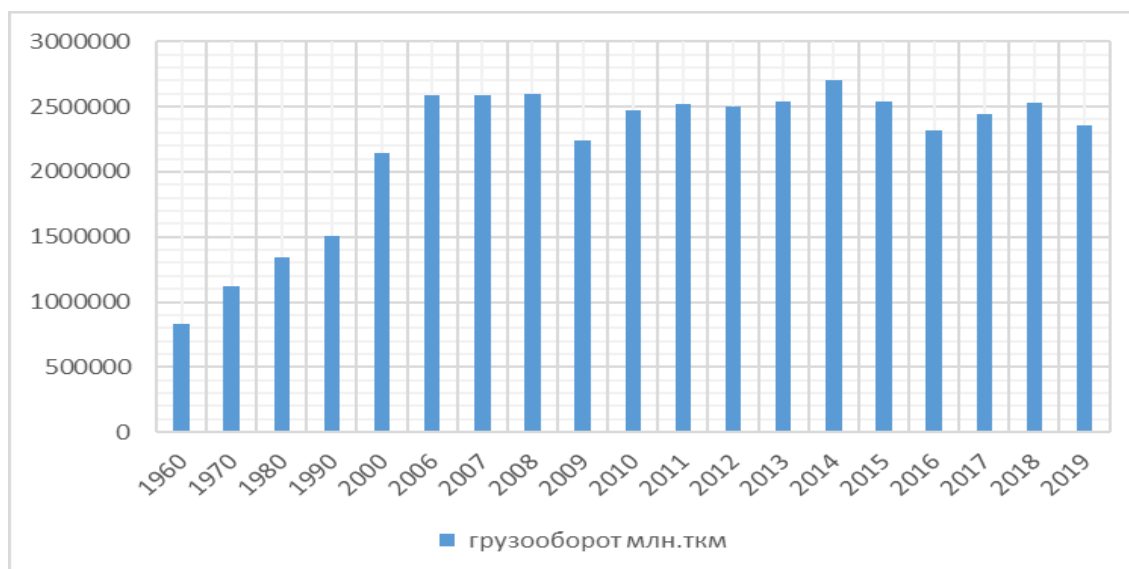


Рис. 4. Коммерческий грузооборот ж/д класса США

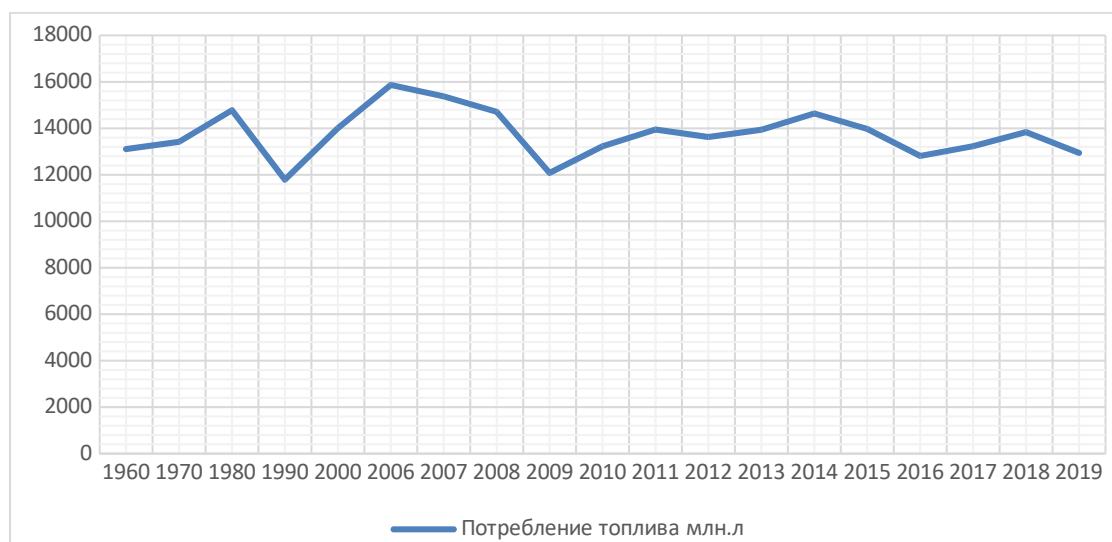


Рис. 5. Потребление топлива в грузовом движении США

График изменения энергоэффективности (грузооборот на 1 л потребляемого топлива) в США приведен на рис. 6.

Однако для сопоставления энергоэффективности перевозок РФ и США необходимо сделать это так же, как было сделано выше для железнодорожного транспорта РФ.

При этом следует учитывать, что данные по потреблению топлива (электроэнергии на тягу

крайне мало) в США из разных источников достаточно сильно различаются (рис. 7).

На рис. 8 представлено удельное энергопотребление ж/д транспорта в США для грузовых перевозок (всеми железными дорогами), ж/д I класса, а также пассажирских перевозок компании AMTRAK.

Из графиков понятно, насколько различается влияние кризисов в экономике на энергоэффек-

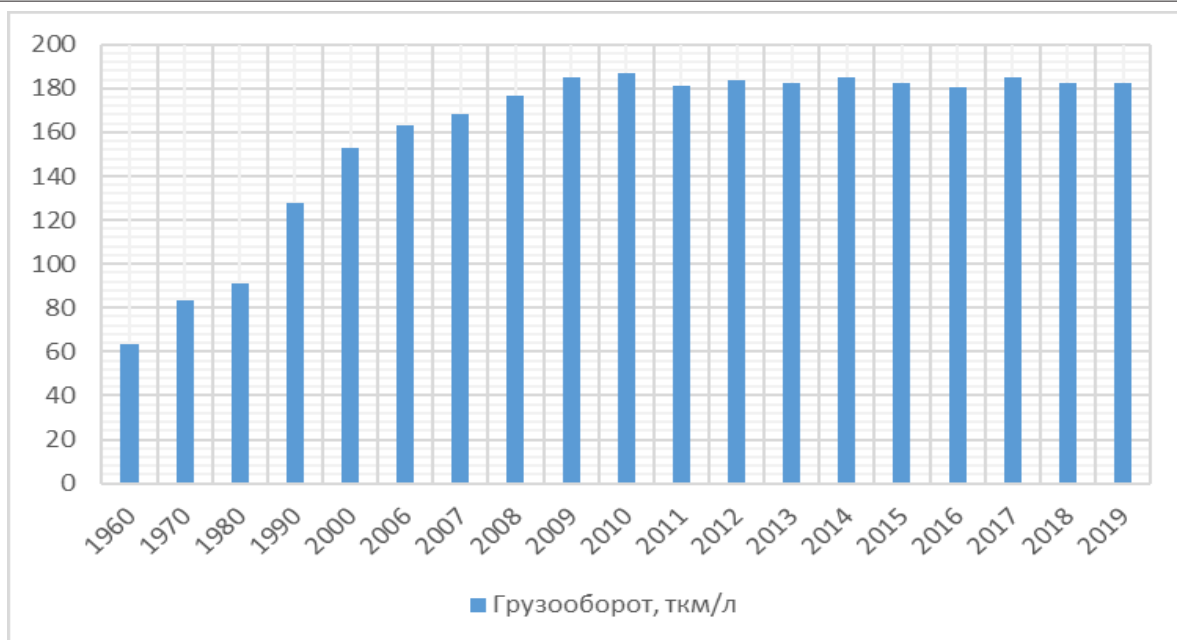


Рис. 6. Коммерческий грузооборот на 1 л потребляемого топлива

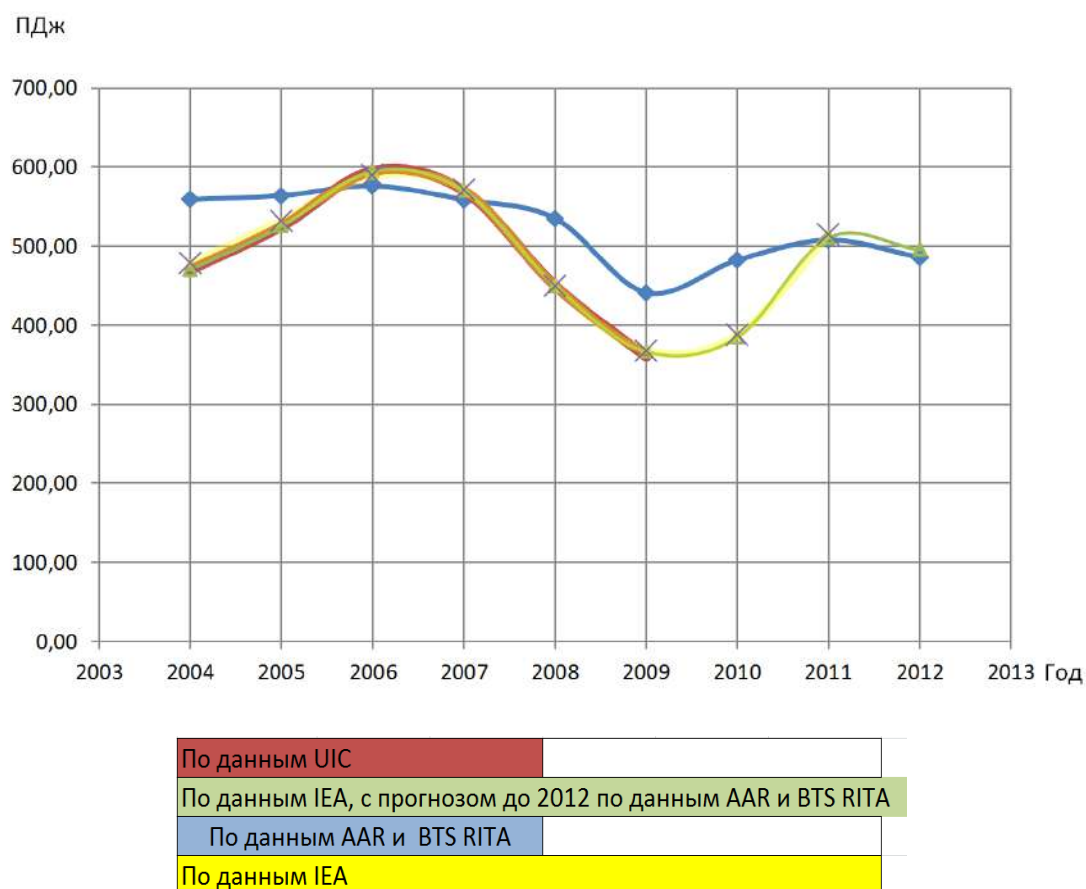


Рис. 7. Потребление топлива в США (по данным из разных источников)



Рис. 8. Удельное энергопотребление ж/д транспорта в США

тивность перевозок. Во время экономического кризиса 2008 г. произошло падение объемов перевозок. За счет грамотного использования высвободившихся ниток графика для применения энергооптимальных режимов вождения ж/д I класса удалось снизить энергоемкость перевозок, но особенно это коснулось пассажирских перевозок, объем которых в США небольшой. В кризис COVID-19 процессы в РФ и США схожи.

Сравнительная диаграмма энергоэффективности

Строить на одной диаграмме полученные значения для РФ и США не корректно, так как изначально они построены для конечной энергии. В то же время в РФ широко используется электрическая тяга, а в США все грузовые перевозки выполняются на тепловозной, приведение же к первичной энергии для электрической тяги и для

тепловозной выполняется по разным методикам. Однако можно учесть производство электроэнергии с использованием коэффициента условного топлива, представляемого Минэнерго РФ. Кроме того, коэффициент должен учитывать соотношение грузооборота, выполняемого на электротяге и тепловозами.

В этом случае коррекционный коэффициент можно определить по формуле:

$$K_{\text{корр1}} = 0,335 \cdot 1,45 = 0,486. \quad (5)$$

$$K_{\text{корр2}} = K_{\text{корр1}} \cdot \frac{\Gamma_{\text{б}}}{\Gamma_{\text{бэ}}}, \quad (6)$$

где $\Gamma_{\text{б}}$ — грузооборот брутто, млн ткм брутто;
 $\Gamma_{\text{бэ}}$ — доля грузооборота брутто, выполняемая электровозами.

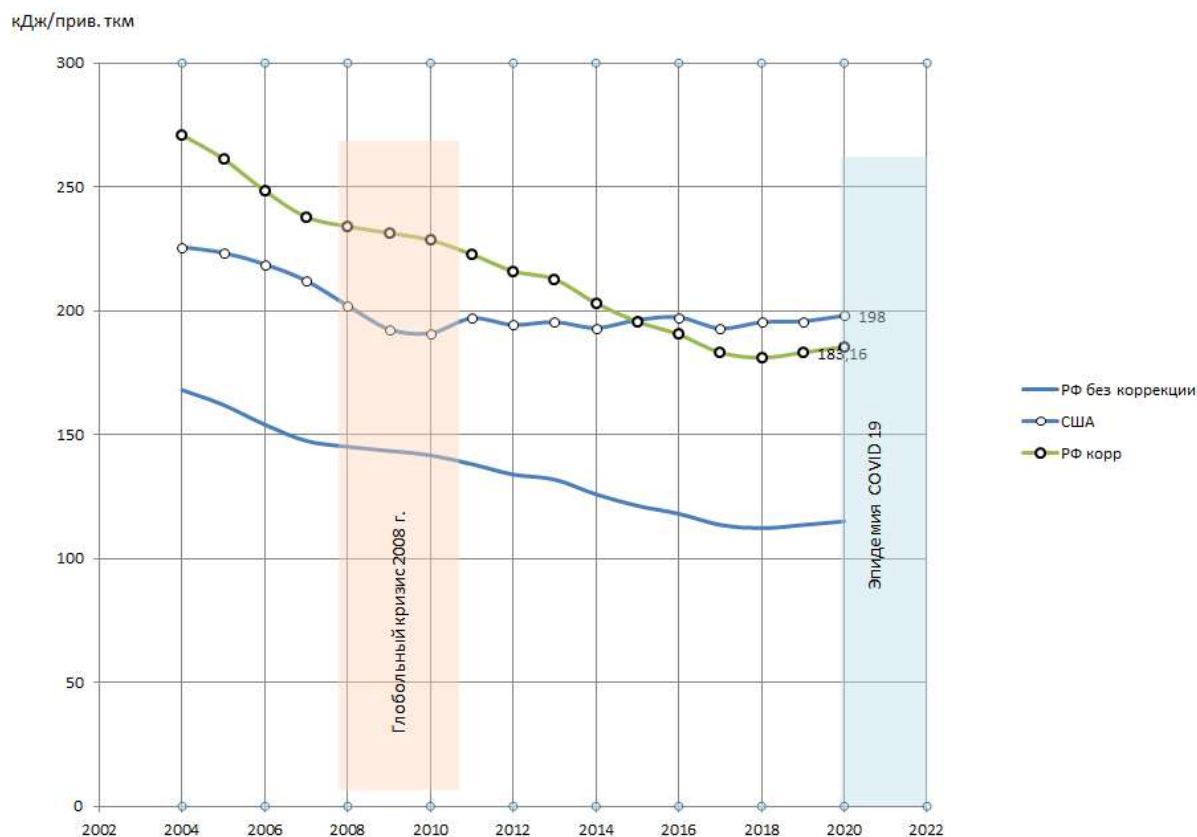


Рис. 9. Сравнительная диаграмма удельного энергопотребления (энергоёмкости перевозок) РФ и США

$$K_{\text{корр}2} = 0,486 \frac{4239199}{3287295} = 0,64.$$

В этом случае энергоёмкость будет больше, а энергоэффективность — хуже, но это необходимо только с целью сопоставления стран, где основной вид тяги различается:

$$\varepsilon_{\text{корр}} = K_{\text{корр}} \cdot \varepsilon, \quad (7)$$

где ε — энергоёмкость перевозок.

Результаты приведены на рис. 9

Из диаграммы видно, что энергоёмкость перевозок в РФ и США сопоставимы, однако в последние годы РФ даже выигрывает в основном за счет использования электротяги. В то же время реакция на кризисы разная. При кризисе 2008 г. энергоэффективность в США существенно

выросла, а в РФ осталась без изменений. Кризис, связанный с событиями на Украине, не повлиял на энергоэффективность, а кризис, связанный с эпидемией коронавируса, ухудшил энергоэффективность перевозок, так как привел к росту энергоёмкости.

Библиографический список

1. Railway handbook Energy consumption and CO₂ emissions OECD // IEA, 2013 International Energy Agency 9 rue de la Fédération 75739 Paris Cedex 15. — France. — URL: https://uic.org/IMG/pdf/2013_uic-iea_railway_handbook_web_low.pdf.
2. Enwrgy Balances of non-OECD Countries 10 Aug 2015. 580 pages / English // International Energy Agency. — URL: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/energy-balances-of-non-oecd-countries_19962843-en.

3. Транспорт в России. 2020: Статистический сборник // Росстат. — М., 2020. — Т. 65. — 108 с. — URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/UbzIvBZj/Transport_2020.pdf.

4. Railroad Facts. 2022: Статистический сборник // США, ежегодный. — URL: <https://www.american-rails.com/today.html>.

5. Отчет о деятельности ОАО «РЖД» в области устойчивого развития акционерное // Открытое общество «Российские железные дороги». — М., 2020. — URL: <file:///C:/Users/Adm/Downloads/Отчет%20об%20устойчивом%20развитии%20за%202020%20г..pdf>.

6. Титова Т. С. Оценки энергоэффективности работы железнодорожного транспорта применением специализированных удельных единиц измерения / Т. С. Титова,

А. М. Евстафьев, М. Ю. Изварин, М. В. Евстафьева // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2017. — Т. 14. — № 1. — С. 119–126.

Дата поступления: 16.05.2022

Решение о публикации: 11.07.2022

Контактная информация:

ИЗВАРИН Михаил Юльевич — канд. техн. наук, доц.; misha3568723@yandex.ru

ЕВСТАФЬЕВА Марина Валерьевна — ассистент кафедры «Электрическая тяга»; elt@pgups.ru

ТАЛЮКИН Даниил Александрович — магистр; daniiltalukin@gmail.com

ПАВЛОВА Виктория Сергеевна — магистр; victoriapavlova@gmail.com

Comparison of Transportation Energy Efficiency on the World Railways

M. Yu. Izvarin, M. V. Evstafieva, D. A. Talyukin, V. S. Pavlova

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

For citation: Izvarin M. Yu., Evstafieva M. V., Talyukin D. A., Pavlova V. Comparison of Transportation Energy Efficiency on the World Railways // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 537–549. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-537-549

Summary

Purpose: To conduct analytical comparison of energy efficiency (specific volumetric capacity) of transportation by rail, to analyze passenger and freight turnover dynamics by years, to calculate relative error in the consumption of fuel and energy resources by rail transport, also to study the statistics of fuel and energy resources consumption for to carry out this work by the countries: Russian Federation and United States of America. To conduct analytical study of discrepancy and statistical error between the data of the world and Rosstat national statistics. To show the relation between energy efficiency of rail transportations and CO₂ emission level. To study the trend of changes in annual specific volumetric capacity and to suggest possible reasons for dynamics presence.

Methods: Analytical work with statistical data from international and domestic digests in annual dynamics by picked countries; comparison and conclusions based on considered data. **Results:** Comparative analysis of change dynamics for passenger and freight turnover annually was carried out, statistical deviation dynamics for fuel and energy resources consumption data was calculated, fuel main types consumption by rail transport was considered, energy consumption efficiency by this type of transport was calculated and energy volumetric capacity for rail transport of leading countries of the world was analyzed. **Practical significance:** Environmental

pollution problem plays a significant role in the world at the moment. Railway transport, which plays an important economic role in every country, is a major energy consumer. Equally to other energy consumers, on rail transport, it's constantly held the analysis of fuel usage efficiency and of CO₂ emission volumes. Comparative analysis of changes in specific energy volumetric capacity annually with hypothetical conclusions on reasons, leading to given dynamics, will make it possible to predict and provide for a timely response on the basis of first prerequisites of economic and general political changes. Analysis of energy efficiency of a railway transport will demonstrate the state of Russian railways in a dynamic comparison with Western countries and will allow to analyze positive experience of the industry development in other countries with the possibility of application in our country.

Keywords: Railway transportation, reduced freight turnover, passenger turnover, energy efficiency, environment, CO₂ emissions, specific energy volumetric capacity.

References

1. Railway handbook Energy consumption and CO₂ emissions OECD. IEA, 2013 International Energy Agency 9 rue de la Fédération 75739 Paris Cedex 15, France. Available at: https://uic.org/IMG/pdf/2013_uic-iaea_railway_handbook_web_low.pdf.
2. Enwrgy Balances of non-OECD Countries 10 Aug 2015. 580 pages. English. International Energy Agency. Available at: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/energy-balances-of-non-oecd-countries_19962843-en
3. Transport v Rossii. 2020: Statisticheskiiy sbornik [Transport in Russia. 2020: Statistical collection]. *Rosstat* [Rosstat]. Moscow, 2020. 108 p. Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/UbzIvBZj/Transport_2020.pdf. (In Russian)
4. Railroad Facts. 2022: Statisticheskiiy sbornik [Railroad Facts. 2022: Statistical compendium]. *SShA, ezhegodnyy* [USA, annual]. Available at: <https://www.american-rails.com/today.html>. (In Russian)
5. Otchet o deyatel'nosti OAO «RZhD» v oblasti ustoychivogo razvitiya aktsionernoe [Report on the activities of JSC “Russian Railways” in the field of sustainable development joint stock]. *Otkrytoe obshchestvo «Rossiyskie zheleznye dorogi»* [Open Society “Russian Railways”]. Moscow. 2020. Available at: <file:///C:/Users/Adm/Downloads/Otchet%20ob%20ustoychivom%20razviti%20za%202020%20g..pdf>. (In Russian)
6. Titova T. S., Evstaf'ev A. M., Izvarin M. Yu., Evstaf'eva M. V. Otsenki energoeffektivnosti raboty zheleznodorozhnogo transporta primeneniem spetsializirovannykh udel'nykh edinits izmereniya [Estimates of the energy efficiency of railway transport using specialized specific units of measurement]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the St. Petersburg University of Communications]. 2017, vol. 14, I. 1, pp. 119–126. (In Russian)

Received: May 16, 2022

Accepted: July 11, 2022

Author's information:

Mikhail Yu. IZVARIN — PhD in Engineering, Associate Professor; misha3568723@yandex.ru

Marina V. EVSTAFIEVA — Assistant, Department “Electric Traction”; elt@pgups.ru

Daniil A. TALYUKIN — Master's Degree Student; daniiltalukin@gmail.com

Victoria S. PAVLOVA — Master's Degree Student; victoriapavlova@gmail.com

УДК 629.1

Статистический анализ поездопотока на участке Палласовка — Верхний Баскунчак с целью выявления ветровых нагрузок

И. А. Гребнев, Н. Н. Сидорова, О. Е. Пудовиков

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

Для цитирования: Гребнев И. А., Сидорова Н. Н., Пудовиков О. Е. Статистический анализ поездопотока на участке Палласовка — Верхний Баскунчак с целью выявления ветровых нагрузок // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 550–557. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-550-557

Аннотация

Цель: Данная статья посвящена важным проблемам энергосбережения. Актуальность статьи особенно велика для степных районов нашей страны, где большую часть года преобладают ветра большой скорости, которые оказывают влияние на увеличение расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на тягу поездов. Данный вопрос открыт, и никаких методик анализа не разработано. А в локомотивных депо нет четкого нормирования энергозатрат на тягу поездов при воздействии дополнительного сопротивления движению. **Методы:** В статье показана высокая значимость данной проблемы для Российских железных дорог (ОАО «РЖД»), были проанализированы основные факторы, влияющие на расход топлива и электроэнергии, и основные методы нормирования ТЭР, которые применяются в нашей стране. Для рассмотрения был выбран участок Палласовка — Верхний Баскунчак Приволжской железной дороги в тяге с тепловозами серии 2ТЭ25КМ. На основе выборок из данных маршрутов машинистов были построены и проанализированы гистограммы удельного расхода топлива для поездов с фиксированной минимальной и максимальной нагрузкой на ось. **Результаты:** На основе данных числовых характеристик полученных выборок были сделаны выводы о влиянии ветровых нагрузок на удельный расход топлива. Наличие ветра существенно повышает энергозатраты на тягу поездов. Влияние ветровых нагрузок сильнее на порожние поезда. **Практическая значимость:** Показана необходимость уточнения норм расхода топлива. Их корректировка позволит повысить точность определения, учета затрат энергоресурсов при их нормировании в локомотивных депо. Предложенные корректировки могут быть рекомендованы к практическому использованию на рассматриваемом участке.

Ключевые слова: ТЭР, энергосбережение, энергоэффективность, удельный расход топлива, ветровые нагрузки.

Введение

Железнодорожный комплекс — один из крупнейших потребителей топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в стране. Что касается дизельного топлива, то затраты на него в общей структуре затрат ОАО «РЖД» весьма значимы и составляют 8 % от всех трат компании.

Экономия дизельного топлива является основной топливно-энергетической политики ОАО «РЖД». Повысить энергоэффективность железнодорожного транспорта можно, задействовав технические или организационные мероприятия. Как правило, организационные мероприятия требуют наименьших инвестиций, применимы конкретно к рассматриваемым локомотивным депо и сводятся к нахождению, выявлению и снижению основных факторов, влияющих на расход топлива [1].

Факторы, которые влияют на затраты топлива при движении поездов на каждом плече, подразделяются на 3 основные категории:

– постоянные, имеющие незначительные изменения за долгое время эксплуатации, которыми можем пренебречь, например профиль железнодорожного пути;

– условно постоянные, которые неизменны за продолжительный период времени (например, типы тягового подвижного состава и вагонов) или имеют достаточную устойчивость в конкретные месяцы года (например, определенные потоки грузовых поездов или сезонная температура окружающей среды);

– переменные, изменяющиеся в каждой конкретной поездке (к примеру, все характеристики грузовых составов) [2].

К последней части относят и такие факторы, которые меняются в функции времени в процессе выполнения поездки и которые надо в ряде случаев учитывать, к примеру температура, скорость и направление ветра. Переменным фактором служит реализуемая зависимость скорости по пути в каждой поездке. Затраты дизельного топлива за

поездку во многом зависят и от степени профессионализма машинистов.

Нормирование расхода топлива на тягу поездов имеет серьезное значение для организации эффективной работы железнодорожного транспорта. На данный момент известны 3 основных метода технического нормирования:

1. Техническое нормирование на основе аналитических расчетов расхода ТЭР на тягу поездов.

2. Нормирование на основе автоматизации обработки данных маршрутов машиниста.

3. Определение расхода ТЭР за поездку на основе энергооптимального тягового расчета [3, 4].

Обработка маршрутов машинистов

На основе данных маршрутов из локомотивного депо ТЧЭ-13 Ершов Приволжской ж. д., работающих на участке Палласовка — Верхний Баскунчак машинистов проводился анализ расхода топлива. Данные были взяты с таким условием, чтобы исключить или пренебречь влиянием на удельный расход температуры атмосферного воздуха. Были взяты данные с марта по май 2021 г. и с октября по декабрь 2020 г. [5]. Средняя температура в этих месяцах примерно одинаковая и варьируется от -10 до 10 °С. То есть исключено влияние высоких и низких температур. Был произведен статистический анализ поездопотока, и были представлены гистограммы плотности распределения удельного расхода.

Также данный ресурс учитывает ветровые воздействия за поездку на основе данных метеостанции и рапорта машиниста. Это можно увидеть в специальной графе «Замечания».

При выборке маршрутов машинистов из исходной совокупности исключались те из них, которые имеют явно искаженные данные фактического расхода топлива. Для выбраковки статистических данных был использован критерий Граббса [6].

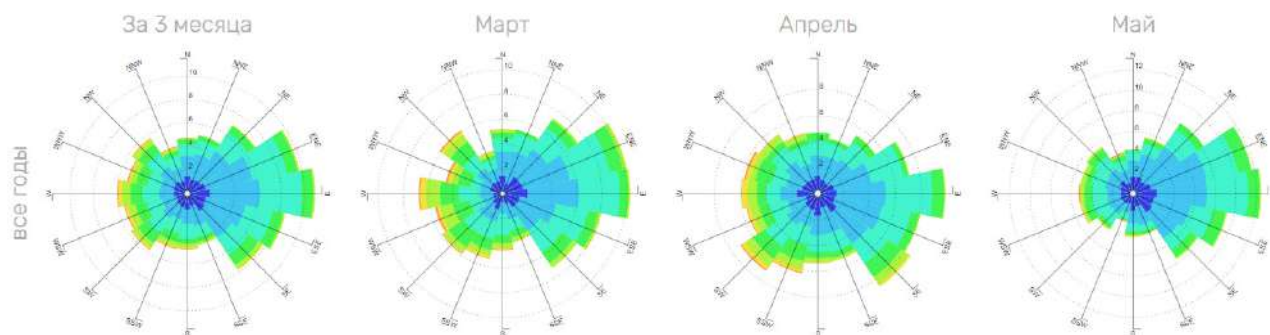


Рис. 1. Роза ветров метеостанции Эльтон

Для рассмотрения был выбран участок Палласовка — Верхний Баскунчак Приволжской железной дороги. Участок был выбран исходя из рельефа местности, погодных и климатических условий. И из-за того, что в локомотивном депо «Ершов», обслуживающем данный участок, устанавливается дополнительная корректировка нормы расхода топлива исходя из походных условий. Участок находится полностью на равнинной степной, местности, переходящей в полупустынную. Следовательно, никакие воздушные потоки, кроме ветровых, здесь не будут оказывать существенного влияния [7]. Роза ветров метеостанции Эльтон, расположенной на данном участке, представлена на рис. 1.

Числовые характеристики рассматриваемых выборок

На основе данных маршрутных листов была построена диаграмма плотности распределения нагрузки на ось в данном направлении [8]. Так как оба направления имеют практически одинаковые распределения с незначительной степенью отклонения, на рис. 1 представлена обобщенная гистограмма распределения нагрузки на ось.

Из диаграммы на рис. 2 можно сделать вывод, что преобладающее количество поездов являются полностью порожними с минимальной усредненной нагрузкой на ось либо полностью гружеными с максимальной нагрузкой. Нагрузка на ось является основным нормообразующим

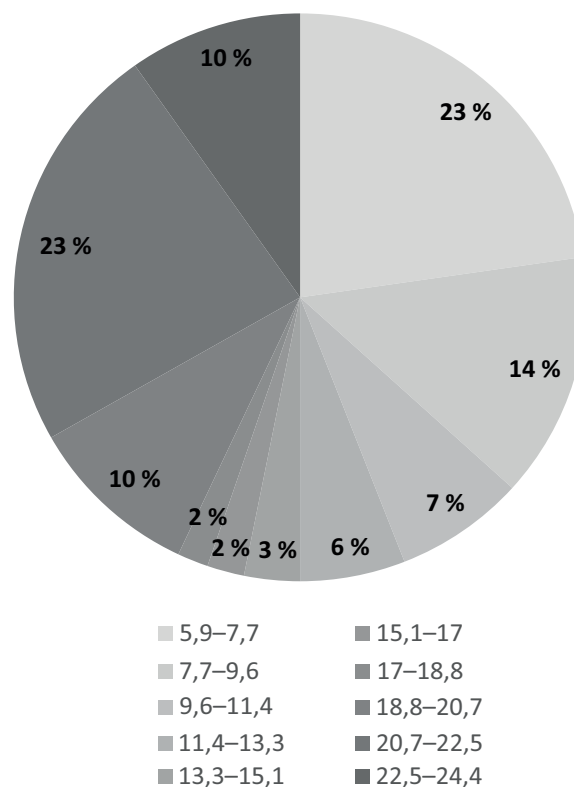


Рис. 2. Диаграмма плотности распределения нагрузки на ось грузовых поездов на рассматриваемом участке

фактором, от которого зависит удельный расход топлива. Поэтому при определении дополнительных факторов, влияющих на расход, принято считать нагрузку на ось постоянной. Была составлена частная выборка маршрутов со значениями нагрузки на ось, имеющими наибольший процент сектора в диаграмме. Числовые характеристики выборок представлены в табл. 1–4.

ТАБЛИЦА 1. Статистические параметры потока поездов общей выборки весом 2000 т без ветра для общей выборки в тяге с двухсекционными тепловозами 2ТЭ25КМ

Параметры поездопотока	Параметры характеристик статистических распределений				
	Объем выборки	Мат. ожидание	Среднее квадратическое отклонение	Минимальное значение параметра	Максимальное значение параметра
Удельный расход топлива e кг·ч/изм	104	28,3	5,4	14,8	46

ТАБЛИЦА 2. Статистические параметры потока поездов общей выборки весом 2000 т с ветром для общей выборки в тяге с двухсекционными тепловозами 2ТЭ25КМ

Параметры поездопотока	Параметры характеристик статистических распределений				
	Объем выборки	Мат. ожидание	Среднее квадратическое отклонение	Минимальное значение параметра	Максимальное значение параметра
Удельный расход топлива e кг·ч/изм	132	30	7,1	14,8	55,6

ТАБЛИЦА 3. Статистические параметры потока поездов общей выборки весом 6000 т без ветра для общей выборки в тяге с двухсекционными тепловозами 2ТЭ25КМ

Параметры поездопотока	Параметры характеристик статистических распределений				
	Объем выборки	Мат. ожидание	Среднее квадратическое отклонение	Минимальное значение параметра	Максимальное значение параметра
Удельный расход топлива e кг·ч/изм	113	15,02	1,88	11,2	19,7

ТАБЛИЦА 4. Статистические параметры потока поездов общей выборки весом 6000 т с ветром для общей выборки в тяге с двухсекционными тепловозами 2ТЭ25КМ

Параметры поездопотока	Параметры характеристик статистических распределений				
	Объем выборки	Мат. ожидание	Среднее квадратическое отклонение	Минимальное значение параметра	Максимальное значение параметра
Удельный расход топлива e кг·ч/изм	138	15,5	2,3	11,2	22,9

Гистограммы плотности распределения удельного расхода топлива

Руководствуясь профилем пути, выборки данных из разных направлений были объединены. Проверка на однородность искомым выборкам проводилась на основе метода t -критерия Стьюдента [9, 10]. Далее на рис. 3, 4 были подготовлены гистограммы плотности распределения удельного расхода топлива для поездов с фиксированной минимальной и максимальной нагрузкой на ось.

Статистический анализ удельного расхода топлива показал, что лучше всего он описывается

логарифмически нормальным законом распределения. Этот вид распределения является устойчивым при любом характере поездопотока: с преобладанием и порожних, и груженных составов. Это связано с тем, что удельный расход не всегда линейно изменяется в зависимости от изменения нормообразующих факторов [11].

Для груженных поездов получились меньшие средние, максимальные и минимальные значения удельного расхода топлива, как в выборках без наличия ветровой нагрузки, так и с наличием: 15,02; 19,7; 11,2 и 28,27; 46; 14,8 (кг/10⁴·т·км брутто)

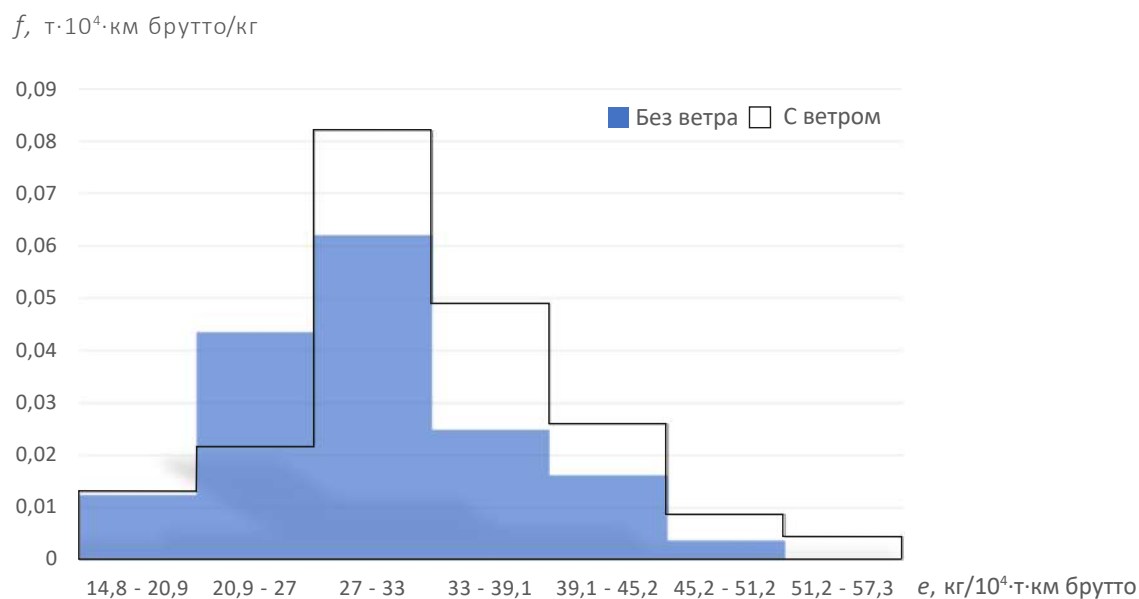


Рис. 3. Гистограмма плотности распределения удельного расхода топлива тепловозом 2ТЭ25КМ для общей выборки и для фиксированной минимальной нагрузки на ось

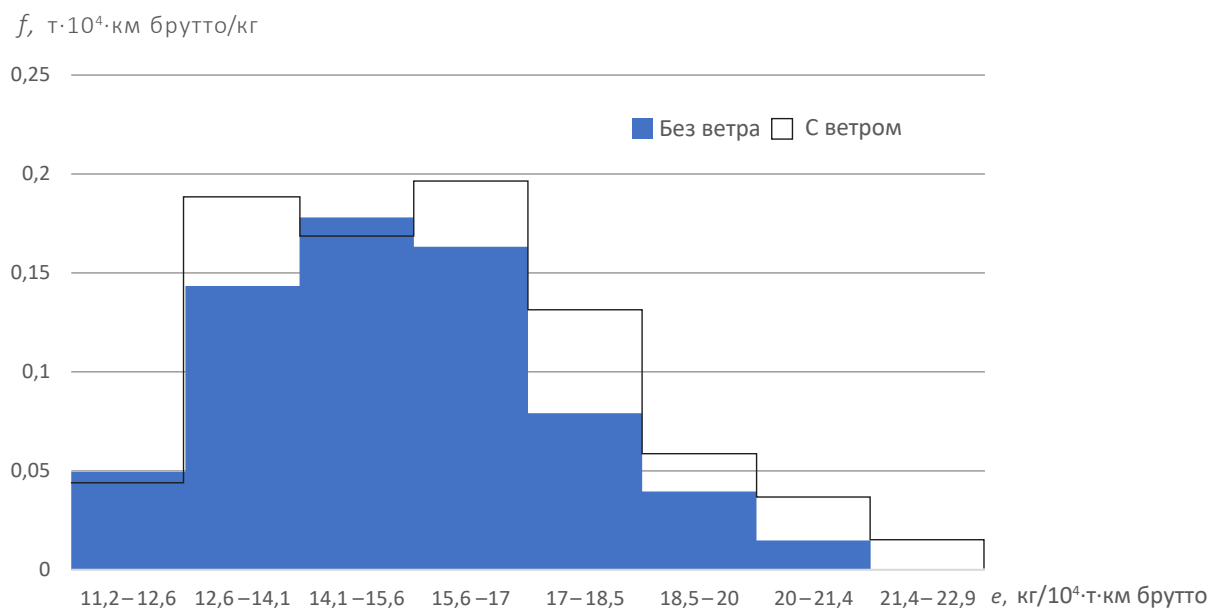


Рис. 4. Гистограмма плотности распределения удельного расхода топлива тепловозом 2ТЭ25КМ с ветром для общей выборки и для фиксированной максимальной нагрузки на ось

соответственно для выборок без влияния ветровых нагрузок, и 15,53; 22,9; 11,2 и 30,05; 55,6; 14,8 (кг/10⁴·т·км брутто) соответственно для выборок с влиянием ветровых нагрузок.

Анализ полученных гистограмм

В полученных гистограммах четко прослеживается увеличение величины удельного расхода топлива при наличии ветровых нагрузок. Это

заметно как в частных выборках, так и в общих выборках. Для порожних поездов среднее значение удельного расхода топлива увеличилось на 6,3 %. Медиана выборки с наличием ветровых нагрузок сместилась на 3,4 % в сторону увеличения. Также заметно увеличение асимметрии из-за наличия у выборки «хвостика», смещенного в сторону увеличения удельного расхода топлива. Получена большая разница в значениях дисперсии. Причем дисперсия для выборки с присутствием ветровых нагрузок значительно выше, чем у выборки без ветровых нагрузок. Вполне возможен такой разброс значений дисперсий из-за разного направления ветровых нагрузок. Это еще раз может доказывать, что присутствие ветровых нагрузок значительно изменяет картину удельного расхода топлива. Если рассматривать значения эксцесса, то мы видим меньшее значение остроты пика у выборки под влиянием ветровых нагрузок, так как у выборки без влияния ветровых нагрузок больше значений, приближенных к среднему удельному расходу топлива. Для выборок с фиксированной максимальной нагрузкой на ось среднее значение удельного расхода топлива увеличилось на 3,4 %. Медиана выборки с наличием ветровых нагрузок сместилась на 3,2 % в сторону увеличения. Также видно увеличение значения дисперсии. Прослеживается и смещение асимметрии вправо. Однако прирост оказался меньшим, чем для поездов с фиксированной минимальной нагрузкой на ось. Значения эксцесса для поездов без влияния ветровых нагрузок имеет отрицательное значение, что характерно для выборок груженого распределения, где значения удельного расхода топлива имеют минимальные значения и незначительно отклоняются от среднего.

Выводы

Анализируя две полученные независимые выборки для поездов с фиксированной минимальной и фиксированной максимальной нагруз-

кой на ось, видно, что под воздействием ветровых нагрузок среднее значение удельного расхода топлива больше возросло для поездов с фиксированной минимальной нагрузкой на ось на 6,3 % против 3,4 %. Это очевидно, так как: при ведении поездов весами, близкими к критическому для тепловоза на данном участке, произведенная мощность, а соответственно, и вырабатываемая энергия практически полностью расходуются на тягу и на выполнение перевозочной работы. Немаловажным является и то, что порожним поездам оказывается большее удельное сопротивление движению, в частности от ветра, из-за создания в открытых люках, дверцах, межвагонном пространстве, полостях вагонов воздушных потоков завихрения.

Библиографический список

1. Годовой отчет ОАО «РЖД» 2018 г. — 2018. — URL: <https://ar2018.rzd.ru/ru>.
2. Феоктистов В. П. Проблема нормирования и экономии энергозатрат в тяге поездов / В. П. Феоктистов, Н. Н. Сидорова, В. Ю. Погосов // ВИНТИ. Транспорт. Наука, техника, управление. — М., 2009. — № 1. — 64 с.
3. Мугинштейн Л. А. Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу поездов: сборник трудов ученых ОАО «ВНИИЖТ» / Л. А. Мугинштейн, А. И. Молчанов, С. А. Виноградов и др. — М.: ВМГ-Принт, 2014. — 144 с.
4. Мугинштейн Л. А. Энергооптимальные методы управления движением поездов: сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ» / Л. А. Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Ябло. — М.: Интекст, 2012. — 80 с.
5. АС ЦОММ Приволжской железной дороги. Автоматизированная система «Интегрированная обработка маршрута машиниста». — URL: <http://ommarc.priv.oao.rzd:8080/comm/index.js>.
6. Weather archive data: данные из архива погодных условий. — URL: meteo.infospace.ru.
7. Trivella A. The impact of wind on energy-efficient train control / A. Trivella, P. Wang, F. Corman // Institute for Transport Planning and Systems, ETH Zürich, 8093. — Zurich, Switzerland.

8. Shah I. A. Characterizations through generalized and dual generalized order statistics, with an application to statistical prediction problem / I. A. Shah, H. M. Barakat, A. H. Khan // *Statistics & Probability Letters*. — 2020. — Vol. 163. — Article № 108872.

9. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. — М.: Высшая школа, 1977. — 429 с.

10. Kawai R. Adaptive importance sampling Monte Carlo simulation for general multivariate probability laws / R. Kawai // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. — 2017. — Vol. 319. — Pp. 440–459.

11. Сидорова Н. Н. Расчет эффективности мероприятий по управлению перевозками на основе диаграммы

энергобаланса / Н. Н. Сидорова, А. А. Бакланов // Тез. докл. науч.-пр. конф. «Современные проблемы экономики и управления на железнодорожном транспорте». — М., 2009. — С. III-12.

Дата поступления: 09.06.2022

Решение о публикации: 01.08.2022

Контактная информация:

ГРЕБНЕВ Иван Алексеевич — аспирант;

lokomotiv197309@gmail.com

ПУДОВИКОВ Олег Евгеньевич — д-р техн. наук, проф.; olegp@mail.ru

СИДОРОВА Наталья Николаевна — д-р техн. наук, ст. науч. сотр.; sidco50@mail.ru

Statistical Analysis of Train Flow on Pallasovka — Verkhniy Baskunchak Section with the Purpose of Wind Burden Identification

I. A. Grebnev, N. N. Sidorova, O. E. Pudovikov

Russian University of Transport (MIIT), 9b9 Obrazcova Street, Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Grebnev I. A., Sidorova N. N., Pudovikov O. E. Statistical Analysis of Train Flow on Pallasovka — Verkhniy Baskunchak Section with the Purpose of Wind Burden Identification // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 550–557. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-550-557

Summary

Purpose: The given article is devoted to energy consumption problematics. The article relevance is especially high for our country steppe regions where high speed winds prevail most of the year that have a significant impact on fuel and energy resource (FER) consumption increase in train traction. This question is open and no analysis methods have been developed. Also, in locomotive depots, there is no clear energy expenditure normalization for train traction under exposure to additional drag to movement. Wind burden impacting train cars is one of the essential factors affecting energy consumption in a traction. **Methods:** The article shows high significance of this problem for Russian Railways (“Russian Railways” JSC). The article analyzes main factors, affecting fuel and power consumption, and major methods of normalization for FER. For the consideration, Pallasovka — Verkhniy Baskunchak section of Privolzhskaya railway in the traction with 2ТЭ25КМ series diesel locomotive was chosen. Histograms of specific fuel consumption for trains with fixed minimal and maximal axle loads were built and analyzed on the basis of samples from the given foot-plate routes. **Results:** Conclusions on the effect of wind loads on specific fuel consumption were made basing on the numerical characteristics of the obtained samples. Contributions of wind loads to a significant increase in a specific fuel consumption have been proved in the article. Moreover, wind burden impact is higher for empty trains. **Practical significance:** The need to clarify fuel consumption norm is shown. The norm adjustment will allow to improve definition and record accuracy for energy resource expenditures at their normalizing in locomotive depots. The proposed adjustments can be recommended for a practical use on the considered section.

Keywords: EFR, energy saving, energy efficiency, fuel specific consumption, wind burdens.

References

1. *Godovoy otchet OAO «RZhD» 2018 goda* [Annual report of Russian Railways 2018]. 2018. Available at: <https://ar2018.rzd.ru/ru>. (In Russian)
2. Feoktistov V. P., Sidorova N. N., Pogosov V. Yu. *Problema normirovaniya i ekonomii energozatrat v tyage poezdov. VINITI. Transport. Nauka, tekhnika, upravlenie* [The problem of rationing and saving energy costs in train traction. VINITI. Transport. Science, technology, management]. Moscow, 2009, I. 1, 64 p. (In Russian)
3. Muginshteyn L. A., Molchanov A. I., Vinogradov S. A. *Sovremennaya metodologiya tekhnicheskogo normirovaniya raskhoda toplivno-energeticheskikh resursov lokomotivami na tyagu poezdov* [Modern methodology of technical regulation of the consumption of fuel and energy resources by locomotives for train traction]. Moscow: VMG-Print Publ., 2014. 144 p. (In Russian)
4. Muginshteyn L. A., Ilyutovich A. E., Yabko I. A. *Energooptimal'nye metody upravleniya dvizheniem poezdov* [Energy-optimal methods of train traffic control]. Moscow: Intekst Publ., 2012. 80 p. (In Russian)
5. *AS TsOMM Privolzhskoy zheleznoy dorogi. Avtomatizirovannaya sistema «Integririrovannaya obrabotka marshruta mashinista»* [AS TsOMM Privolzhskaya railway. Automated system “Integrated processing of the driver’s route”]. Available at: <http://ommarc.priv.oao.rzd:8080/comm/index.js>. (In Russian)
6. Weather archive data: dannye iz arkhiva pogodnykh usloviy. Available at: meteo.infospace.ru
7. Trivella A., Wang P., Corman F. The impact of wind on energy-efficient train control. Institute for Transport Planning and Systems, ETH Zürich, 8093, Zurich, Switzerland
8. Shah I.A., Barakat H.M., Khan A. H. Characterizations through generalized and dual generalized order statistics, with an application to statistical prediction problem. *Statistics & Probability Letters* 2020, vol. 163, Article №108872
9. Gmurman V. E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1977. 429 p. (In Russian)
10. Kawai R. Adaptive importance sampling Monte Carlo simulation for general multivariate probability laws. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2017, vol. 319, pp. 440–459.
11. Sidorova N. N., Baklanov A. A. *Raschet effektivnosti meropriyatiy po upravleniyu perezovkami na osnove diagrammy energobalansa* [Calculation of the effectiveness of transportation management measures based on the energy balance diagram]. Moscow, 2009. (In Russian)

Received: June 09, 2022

Accepted: August 01, 2022

Author’s information:

Ivan A. GREBNEV — Postgraduate Student;
lokomotiv197309@gmail.com

Oleg E. PUDOVIKOV — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; olegep@mail.ru

Natalia N. SIDOROVA — Dr. Sci. in Engineering,
Senior Researcher; sidco50@mail.ru

УДК 625.141.1

Засорение и загрязнение щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути

А. Ф. Колос

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

Для цитирования: Колос А. Ф. Засорение и загрязнение щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 558–575. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-558-575

Аннотация

Цель: Определение закономерностей засорения и загрязнения щебеночного балласта, воспринимающего вибродинамическую нагрузку от подвижного состава, а также его срока службы. **Методы:** В работе использованы теоретические и эмпирические методы исследования. Теоретические методы основаны на анализе известных моделей, описывающих процессы деградации щебня при эксплуатации железнодорожного пути, а эмпирические — на основе проведенных экспериментов и испытаний. Выявление закономерностей накопления в щебеночном балласте загрязнителей и засорителей базировалось на результатах динамических стендовых испытаний и лабораторного определения зернового состава щебня, изъятых из балластной призмы эксплуатируемого железнодорожного пути с разной наработкой тоннажа. В работе использованы методы статистической обработки результатов испытаний и регрессионного анализа. **Результаты:** По данным статистической обработки результатов испытаний и лабораторных определений зернового состава щебня установлены функциональные зависимости накопления в щебеночном балласте продуктов собственного дробления, абразивного износа, а также внешнего загрязнения в зависимости от исходных физико-механических свойств щебня, условий эксплуатации железнодорожного пути и системы его технического обслуживания. В работе разработана математическая модель прогнозирования срока службы щебеночного балласта в зависимости от условий эксплуатации участка железнодорожного пути. **Практическая значимость:** Результаты исследования позволяют прогнозировать срок службы щебеночного балласта из условия его предельно допустимого загрязнения и засорения, а также обоснованно планировать работы по техническому обслуживанию железнодорожного пути.

Ключевые слова: Железнодорожный путь, щебеночный балласт, балластная призма, засорение щебеночного балласта, загрязнение щебеночного балласта, срок службы щебеночного балласта.

Введение

Основной задачей технического обслуживания железнодорожного пути является рациональное определение видов и сроков выполнения путевых работ по устранению и предупреждению появления отступлений от норм содержания рельсовой колеи. Появление отступлений III и IV степени [1] от норм содержания пути, которые требуют либо ограничения скоростей движения поездов, либо вообще закрытия пути и проведения неотложных работ, связано в том числе с состоянием балластного слоя, которое зависит от его несущей способности и степени деформативности. И несущая способность, и деформативность определяются физико-механическими свойствами применяемого в конструкции пути щебеночного балласта, и если изначальные свойства щебня при укладке в путь, как правило, удовлетворяют требованиям стандарта [2], то эти же свойства после определенной наработки тоннажа могут существенно ухудшиться по ряду причин.

Изменение свойств щебеночного балласта в процессе эксплуатации железнодорожного пути будем называть «износом (деградацией) щебеночного балласта» и связывать в том числе с процессами его засорения и загрязнения, а также снижением под действием этих факторов его механических свойств. Загрязнение и засорение щебеночного балласта, как известно [3–7], возникает как за счет внутренних, так и за счет внешних засорителей и загрязнителей. Внутренние — образуются в результате дробления и истирания зерен щебня [8] в процессе его работы в пути под поездной вибродинамической нагрузкой, а также при уплотнении пути подбивкой [9], т. е. в щебеночном балласте образуются продукты собственного дробления и истирания. Внешние — появляются в балластном материале в результате засорения щебня частицами перевозимых грузов, пылью, приносимой ветром и водой [7, 10–12].

Под засорением [10] щебеночного балласта понимается появление в его зерновом составе частиц размером 0,1–25 мм — для щебня II категории; 0,1–30 мм — для щебня I категории и 0,1–22,4 мм — для щебня категории «В» по ГОСТ 7392 [2]. Под загрязнением [10] — появление в зерновом составе щебня пылеватых и глинистых фракций с размером частиц менее 0,1 мм за счет истирания под действием поездной вибродинамической нагрузки его зерен (абразивного износа частиц), а также за счет внешнего загрязнения перевозимыми сыпучими грузами (уголь, песок, руда и т. д.), песком из песочниц локомотивов, а также за счет инфильтрации глинистых и пылеватых частиц из слоев земляного полотна, непосредственно подстилающих балластную призму (при отсутствии разделительного слоя). И засорение, и загрязнение щебеночного балласта в совокупности прежде всего приводят к снижению его фильтрационных свойств.

Указанные выше процессы приводят к снижению следующих механических свойств щебня: сопротивления истираемости и удару, удельного зацепления, угла внутреннего трения, модулей упругости и деформации [3, 10]. При этом под воздействием подвижного состава в балластной призме возникает напряженное состояние, приводящее при уменьшении механических свойств щебня к повышенным упругим и остаточным деформациям пути. Последние постепенно накапливаются в балластной призме и с течением времени обуславливают появление отклонений рельсовых нитей по уровню, возникновение просадов, толчков и перекосов [5].

Анализ проведенных исследований [7, 10, 12] показывает, что в течение межремонтного цикла работа балластного слоя железнодорожного пути характеризуется четырьмя периодами, при этом каждый период характеризуется различной интенсивностью накопления остаточных деформаций пути. Такое различие напрямую связано

с несущей способностью и деформативностью балластной призмы, которые напрямую зависят от степени износа балласта.

В течение I периода происходят доуплотнение щебня, его упрочнение и, следовательно, увеличение несущей способности и снижение деформативности балластного слоя. В течение всего II периода работа балластного слоя под поездной нагрузкой характеризуется значительной несущей способностью и невысокой деформативностью из-за отсутствия критического износа щебня — балластный слой слабо изменяет свои изначальные геометрические очертания, остаточные деформации накапливаются с незначительной интенсивностью и являются практически равномерными по длине, особо не влияя на эксплуатацию железнодорожного пути. III и IV периоды работы балластного слоя характеризуются засоренностью и загрязненностью щебня, сопровождающимися ростом его влажности и, соответственно, появлением выплесков, а также снижением сопротивления истираемости и удару, морозостойкости, формированием зерен щебня более округлой сглаженной формы за счет абразивного износа частиц [10]. Вследствие указанных обстоятельств происходит снижение прочностных свойств щебеночного балласта как сыпучего материала, снижение показателей деформируемости и, следовательно, уменьшение его несущей способности и интенсивное накопление остаточных деформаций пути.

В силу отмеченного можно констатировать, что износ щебеночного балласта, приводящий к ухудшению его физико-механических свойств в процессе его работы под поездной нагрузкой и под воздействием других внешних факторов, прежде всего связан с его засорением и загрязнением и будет приводить к росту количества расстройств и неисправностей рельсовой колеи, выявляемых в ходе эксплуатации. Однако до настоящего времени остаются до конца не исследованными про-

цессы накопления в балласте внешних и внутренних засорителей и загрязнителей в зависимости от наработки тоннажа и исходных физико-механических свойств щебеночного балласта.

Методы испытаний, применяемое оборудование и приборы

Исследование процессов деградации щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути осуществлялось путем определения зернового состава щебня различных горных пород, изъятого из балластной призмы железнодорожного пути с известной наработкой тоннажа, а также в ходе стендовых динамических испытаний, при которых моделировалось воздействие подвижного состава на балластный слой.

Для проведения стендовых испытаний использована сервогидравлическая испытательная машина INSTRON 8802, которая позволяет смоделировать циклическое воздействие подвижного состава на щебеночный балласт. Схема установки представлена на рис. 1.

Машина характеризуется следующими основными параметрами: испытательной нагрузкой до 250 кН в циклическом и статическом режиме; скоростью нагружения до 10 кН/с; частотой приложения нагрузки до 10 Гц; погрешностью измерения нагрузки $\pm 0,5\%$ от измеряемой величины в диапазоне нагрузки от 2,5 до 250 кН; погрешностью измерения деформации $\pm 0,5\%$ от измеряемой величины.

Для проведения исследований использовались специально подготовленные пробы щебня, отличающиеся различными значениями прочностных свойств (сопротивление истираемости в полочном барабане и сопротивление удару на копре ПМ). Подготовленные пробы укладывались в специально изготовленный стальной ящик размером 680 × 490 × 540 мм с толщиной стенки 4 мм (рис. 1, поз. 10) с послойным уплотнением до плотности 1,60 г/см³, которая в среднем соот-

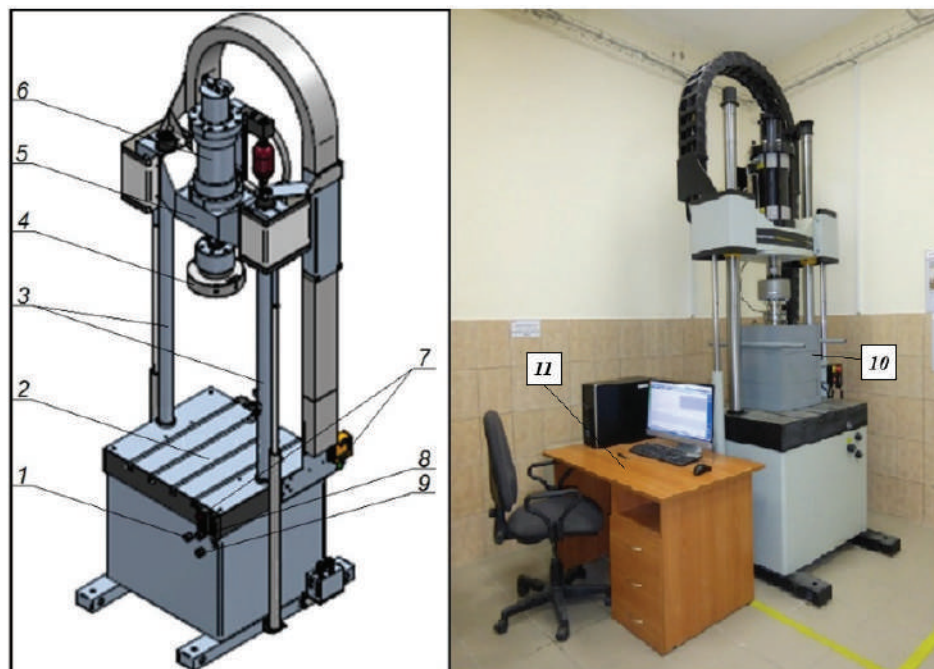


Рис. 1. Схема сервогидравлической испытательной машины INSTRON 8802:
 1 — ручка для управления гидрозажимами траверсы; 2 — стол; 3 — колонны;
 4 — нагрузочная плита; 5 — траверса; 6 — актуатор; 7 — кнопки аварийного выключения
 машины; 8 — ручка для управления подъемом траверсы; 9 — ручка для управления
 опусканием траверсы; 10 — металлический ящик размерами $680 \times 490 \times 540$ мм
 с толщиной стенки 4 мм для засыпки щебеночного балласта; 11 — рабочее место
 оператора, оборудованное компьютером со специальным лицензионным программным
 обеспечением, обеспечивающим настройку и установку параметров циклического
 воздействия, а также запись результатов эксперимента

ветствует плотности щебеночного балласта в балластной призме эксплуатируемых железнодорожных путей.

После подготовки стального короба с уложенным до заданной плотности щебеночным балластом на его поверхность устанавливался штамп. Площадь штампа составила $0,3102 \text{ м}^2$, что в среднем соответствует площади железобетонной полушпалы с учетом изгиба, которая по данным [13] составляет $0,3092 \text{ м}^2$. Этим обеспечивалась идентичность передачи нагрузки на поверхность щебня как при реальных условиях эксплуатации, так и при стендовых динамических испытаниях.

В проводимых испытаниях сила, передающаяся на штамп, была принята 100 кН ($10,0 \text{ тс}$),

таким образом, давление по подошве штампа в стальном ящике, передающееся щебню, составило $3,2 \text{ кг/см}^2$, что соответствует фактическому напряженному состоянию щебеночного балласта под подошвой железобетонной шпалы при движении массового подвижного состава. В экспериментах частоту приложения нагрузки принимали 7 Гц .

Индекс механического износа щебеночного балласта

Изменение зернового состава щебня в процессе эксплуатации железнодорожного пути сопряжено одновременно с процессами дробления зерен щебня и их истирания. С точки зрения обеспечения стабильности балластной призмы

в этом случае критическим является накопление в балласте фракций менее 25 мм, что в итоге приводит к ухудшению фильтрационных свойств балластного материала, снижению несущей способности балластного слоя и к интенсивному накоплению остаточных деформаций рельсовых нитей.

В ходе испытаний щебня на сопротивление удару на копре ПМ [2] определяется потеря массы пробы за счет образования в нем фракций менее 5 мм, а при испытаниях на сопротивление истираемости в полочном барабане — фракций менее 1,25 мм. Таким образом, можно утверждать, что образование в балластном слое под вибродинамической нагрузкой фракций 1,25–25 мм в основном связано с прочностью зерен щебня и может быть оценено сопротивлением щебня удару, а причиной образования фракций менее 1,25 мм является истирание зерен (абразивный износ), которое оценивается показателем сопротивления истиранию.

В этой связи были проведены лабораторные исследования сопротивляемости удару и истирания одних и тех же проб щебня. Как показывают проведенные исследования, при испытаниях в полочном барабане в щебне образуются как фракции 5–25 мм, которые формируются за счет скалывания зерен щебня, так и фракции менее 1,25 мм за счет абразивного износа. В то же время фракции 1,25–5 мм практически не образуются, что, скорее всего, объясняется их быстрым истиранием в процессе испытания с образованием фракций менее 1,25 мм. Очевидно, что сам показатель сопротивляемости истирания по своей сути и метод его определения характеризуют появление в зерновом составе щебня фракций менее 1,25 мм.

Несколько иная картина наблюдается при испытании щебня на сопротивление удару. В зерновом составе щебня после испытаний формируются все фракции: 5–25 мм, 1,25–5 мм и менее 1,25 мм. Как следует из требований ГОСТ 7392 [2], сопротивление удару щебня определяется поте-

рей массы щебня за счет образования фракций менее 5 мм, т. е. включая фракции 1,25–5 мм и менее 1,25 мм. Анализируя экспериментальные данные по определению сопротивления щебня удару, установлено, что содержание фракций менее 1,25 мм в общем содержании фракций менее 5 мм составляет в среднем для щебня разных категорий от 45 до 55 %, т. е. в среднем порядка 50 %. Очевидно, что показатель сопротивляемости удару и метод его определения характеризуют как прочность зерен щебня, так и сопротивляемость истиранию.

Принимая во внимание, что в процессе работы щебеночного балласта под вибродинамической нагрузкой одновременно происходят как процессы дробления зерен, так и их абразивный износ, введем обобщенный показатель, который назовем *индексом механического износа балласта*, $I_{\text{мех}}$. Физический смысл данного показателя состоит в том, что он определяет общую потерю массы щебня как за счет дробления зерен при ударе, так и за счет их истирания. Принимая во внимание, что половина фракций (менее 5 мм) в потере массы при определении сопротивления удару щебня на копре ПМ приходится на фракции менее 1,25 мм, определим индекс механического износа балласта как:

$$I_{\text{мех}} = \Delta M_{\text{и}} + 0,5 \cdot \Delta M_{\text{у}}, \quad (1)$$

где $\Delta M_{\text{и}}$ и $\Delta M_{\text{у}}$ — потери массы щебня после испытаний на истираемость в полочном барабане и после испытаний на сопротивление удару на копре ПМ соответственно, определяемые по ГОСТ 7392—2014 [2], %;

0,5 — показатель, учитывающий наличие во фракциях менее 5 мм доли фракций менее 1,25 мм.

Засорение и загрязнение щебеночного балласта под действием поездной вибродинамической нагрузки

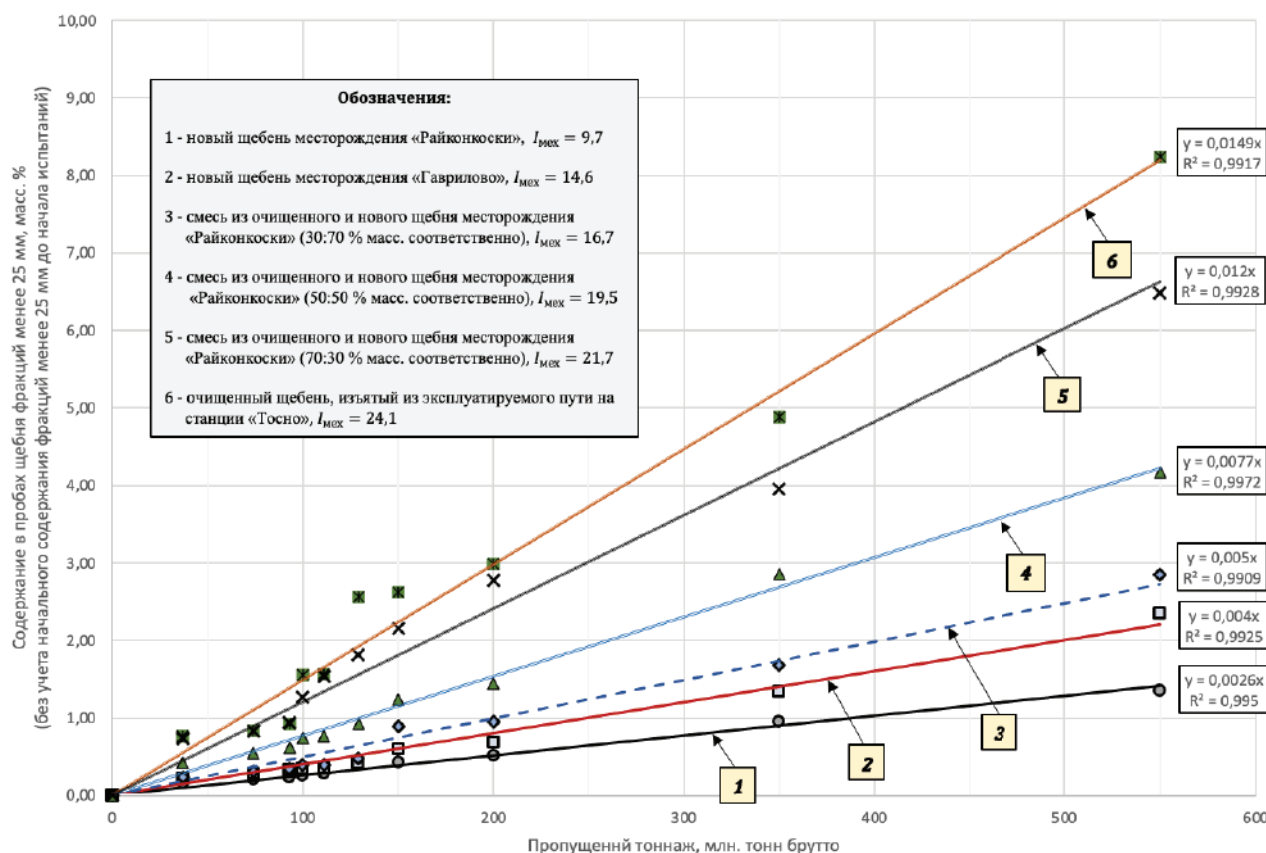


Рис. 2. Образование продуктов собственного дробления (фракции менее 25 мм) в щебне с разным индексом механического износа $I_{\text{мех}}$, в зависимости от наработки тоннажа

Засорение и загрязнение щебеночного балласта под действием поездной вибродинамической нагрузки исследовалось в ходе динамических стендовых испытаний. На рис. 2 приведены зависимости прироста в щебне фракций менее 25 мм, обладающего разным показателем механического износа $I_{\text{мех}}$, в зависимости от пропущенного тоннажа.

Анализ данных, представленных на рис. 2, показывает, что прирост содержания фракций менее 25 мм по массе в зависимости от пропущенного тоннажа для всех разновидностей проб щебня, отличающихся разным индексом механического износа, подчиняется прямолинейной зависимости. Дальнейшие исследования и преобразования позволили установить функциональ-

ную зависимость между содержанием внутренних засорителей и загрязнителей в щебеночном балласте, появляющихся за счет собственного дробления и истирания зерен под воздействием вибродинамической нагрузки, в зависимости от пропущенного тоннажа и индекса механического износа щебня.

$$A = 0,0007 \cdot m \cdot T \cdot e^{0,1272 \cdot I_{\text{мех}}}, \quad (2)$$

где A — содержание внутренних засорителей и загрязнителей в щебеночном балласте (фракции менее 25 мм в щебне II категории [2]; менее 30 мм в щебне I категории [2] и менее 22,4 мм (рассев на квадратных ситах) — в щебне категории «В» по [2]), масс.%;

T — пропущенный тоннаж, млн. тонн брутто; $I_{\text{мех}}$ — индекс механического износа, %; m — эмпирический коэффициент, принимаемый равным 1,15 для щебня I категории и категории «B» и равным 1,0 для щебня II категории по [2].

Влияние уплотняющего действия путевых машин на изменение зернового состава щебеночного балласта

Внутренние засорители и загрязнители щебеночного балласта, как показывают исследования [10, 14–17], формируются в балластной призме не только под воздействием вибродинамической нагрузки от движущегося подвижного состава, но и под воздействием ударного воздействия рабочих органов выправочно-подбивочных машин и ручного механизированного инструмента. При этом количество внутренних загрязнителей и засорителей в этом случае будет определяться количеством таких уплотнений за время между работами капитального характера.

Исследованиями Г. М. Шахуняца [7], С. Н. Попова [10] и других авторов установлена линейная зависимость между количеством таких уплотнений и засорением щебеночного балласта. Аналогичные выводы были получены и в исследованиях зарубежных авторов [14–16]. Анализ имеющихся литературных источников не позволяет выявить влияние различных путевых машин на образование засорителей в щебеночном балласте за одно уплотнение. Однако имеется ряд публикаций, в которых установлено влияние процесса уплотнения балласта виброплитами на процесс формирования засорителей в щебне. Так, например, в работе [18] установлено, что образование фракций в гранитном щебеночном балласте размером менее 22,4 мм (рассев на квадратных ситах) составляет в среднем 1,1–1,25 % за одно уплотнение. По данным Г. М. Шахуняца [19], количество образующихся засорителей за одно уплотнение твердого щебня зависит от применя-

емых уплотнительных средств и составляет при использовании вибрационных шпалоподбоек 0,6–0,7 масс.%, при использовании ручных шпалоподбоек соответственно 1,3–1,8 масс.%.

В этой связи для оценки влияния уплотняющего воздействия рабочих органов путевых машин был произведен сравнительный анализ зернового состава щебеночного балласта, отобранного на откосах балластной призмы и под подошвой железобетонной шпалы после прохода выправочно-подбивочно-рихтовочных машин ВПР-02 и Doumatic на участках пути Октябрьской дирекции инфраструктуры, на котором выполнялись работы по очистке щебеночного балласта. Бойки машин затрагивают зону уплотнения только под подошвой шпалы, следовательно, сравнивая зерновой состав щебня, отобранного с откосных частей и из-под подошвы шпалы, можно оценить влияние работы шпалоподбоек на появление в щебне фракций размером менее 25 мм. Поскольку работа машин ВПР-02 и Doumatic производилась в среднем через 3–10 дней после глубокой очистки щебня, накоплением засорителей в балласте под действием подвижной вибродинамической нагрузки от проходящих поездов можно пренебречь, а разница в количестве засорителей по массе в подшпальной зоне и в откосной зоне будет определять влияние разрушающего действия шпалоподбоек на балластный слой железнодорожного пути.

Анализ полученных результатов показал, что в среднем каждая подбивка шпал выправочно-подбивочно-рихтовочной машиной приводит к увеличению содержания засорителей на 1,5 %. При этом установить влияние вида путевой машины на интенсивность засорения балласта в исследованиях не удалось. Полученные данные хорошо согласуются с данными Г. М. Шахуняца [19], С. Н. Попова [10] и ряда зарубежных авторов [8, 14, 16]. Разумеется, что различные виды путевых машин будут по-разному оказывать влияние

на засорение балласта продуктами собственного дробления при производстве работ, что является предметом дальнейших исследований. Однако в настоящий момент времени в качестве первого приближения для оценки срока службы щебеночного балласта можно принять влияние работы балластоуплотнительных путевых машин на изменение зернового состава щебеночного балласта одинаковым и равным 1,5 % от прохода каждой машины. Такой подход можно считать допустимым для инженерных целей, обеспечив приемлемую погрешность при прогнозировании накопления загрязнителей и засорителей в балластном слое по мере наработки тоннажа при принятой схеме технического обслуживания железнодорожного пути [20].

Учитывая изложенное, содержание внутренних засорителей в балластном слое железнодорожного пути за счет уплотняющего воздействия путевых машин в зависимости от наработки тоннажа может быть представлено в следующем виде:

$$B = m \cdot e_{\text{упл}} \left(\epsilon_{\text{осн}} + \epsilon_{\text{отд}} + \sum_0^T \epsilon_{\text{п-ппв}} \right), \quad (3)$$

где B — содержание внутренних засорителей в щебеночном балласте (фракции менее 25 мм в щебне II категории; менее 30 мм — в щебне I категории и менее 22,4 мм (рассев на квадратных ситах) — в щебне категории «В» по ГОСТ 7392 [2]), масс.%;

$e_{\text{упл}}$ — количество внутренних засорителей в щебеночном балласте, образующихся от одного уплотнения балласта тем или иным способом, принимаемое равным 1,5 масс.%;
 $\epsilon_{\text{осн}}$, $\epsilon_{\text{отд}}$ — количество уплотнений балласта тем или иным способом, выполняемых после глубокой очистки балласта в период выполнения основных и отделочных работ при принятой технологии производства путевых работ соответственно;

$\epsilon_{\text{п-ппв}}$ — суммарное количество уплотнений балласта тем или иным способом после сдачи участка в эксплуатацию после проведения капитального или среднего ремонта пути, за период времени, соответствующий наработке тоннажа T , выполняемых в ходе планово-предупредительной выправки и подъемочном ремонте пути;
 m — эмпирический коэффициент, принимаемый равным 1,15 для щебня I категории и категории «В» и равным 1,0 для щебня II категории по ГОСТ 7392 [2].

Исследование загрязнения щебеночного балласта внешними засорителями

Как показывают результаты исследований, в балластном слое железнодорожного пути помимо загрязнения и засорения продуктами собственного дробления и истирания происходит накопление мелких фракций в том числе за счет внешнего загрязнения. Такими источниками являются просыпающиеся с подвижного состава частицы сыпучих грузов, частицы, переносимые ветром, которые откладываются на поверхности балластной призмы, проникающие впоследствии вглубь балластного слоя. На отдельных участках (на подъемах) источником загрязнения и засорения является песок, подающийся под колеса локомотивов. Кроме того, на участках железнодорожного пути, основная площадка земляного полотна которых сложена глинистыми грунтами или грунтами с повышенным содержанием глинистых фракций, в местах с просадками пути в балластный слой проникают также глинистые частицы.

Представляет интерес установление предельного размера фракций, которые могут вызывать пыление при движении подвижного состава. По данным [21], существует минимальная скорость ветра U_{min} , при которой начинается пыление поверхности отвала. Значение этой скорости может быть определено по логарифмическому уравнению Кармана — Прандтля [22]:

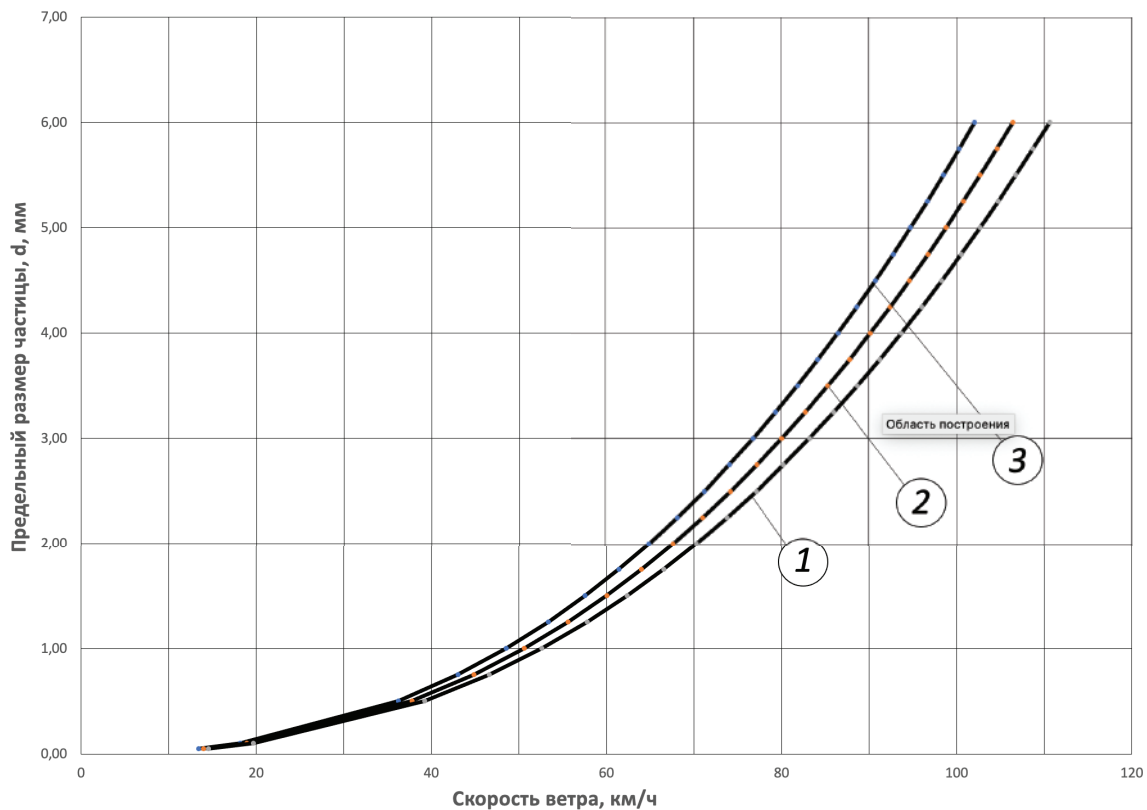


Рис. 3. Предельный размер пылящих частиц в зависимости от скорости ветра:
 1 — при плотности пылящих частиц 2,70 т/м³; 2 — при плотности пылящих частиц 2,50 т/м³;
 3 — при плотности пылящих частиц 2,30 т/м³

$$U_{\min} = A \cdot \left(2,5 \cdot \ln \frac{z}{d_s} + 8,5 \right) n \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_v} \cdot g \cdot d_s}, \quad (4)$$

где A — эмпирический коэффициент, который в среднем может быть принят 0,10;

z — высота, на которой измеряется скорость ветра над поверхностью отвала, м (для движущегося открытого полувагона значение высоты может быть принято 2–3 м);

d_s — размер сдуваемых частиц, м;

ρ_s — плотность частиц сдуваемого сыпучего груза, кг/м³;

ρ_v — плотность воздуха, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, м/с².

На рис. 3 приведен график зависимости предельного размера пылящих частиц с плотностью 2,6 т/м³ от скорости ветра.

В первом приближении можно считать, что скорость движения поезда и скорость ветра на уровне верха борта открытого вагона будут приблизительно равны, тогда по графику рис. 3 нетрудно установить, что при реализуемых сегодня на железных дорогах скоростях движения грузовых поездов 70–90 км/ч максимальный размер фракции, подверженной пылению, составит от 2 до 5 мм. Таким образом, основными продуктами внешнего загрязнения щебеночного балласта будут фракции размером менее 5 мм.

Разработки в 50–80 гг. XX в. методологических подходов к определению степени загрязнения щебеночного балласта от пропущенного тоннажа в основном исходили из предположений прямой линейной зависимости между содержанием фракций различных размеров и пропущенным тоннажем. В частности, такой под-

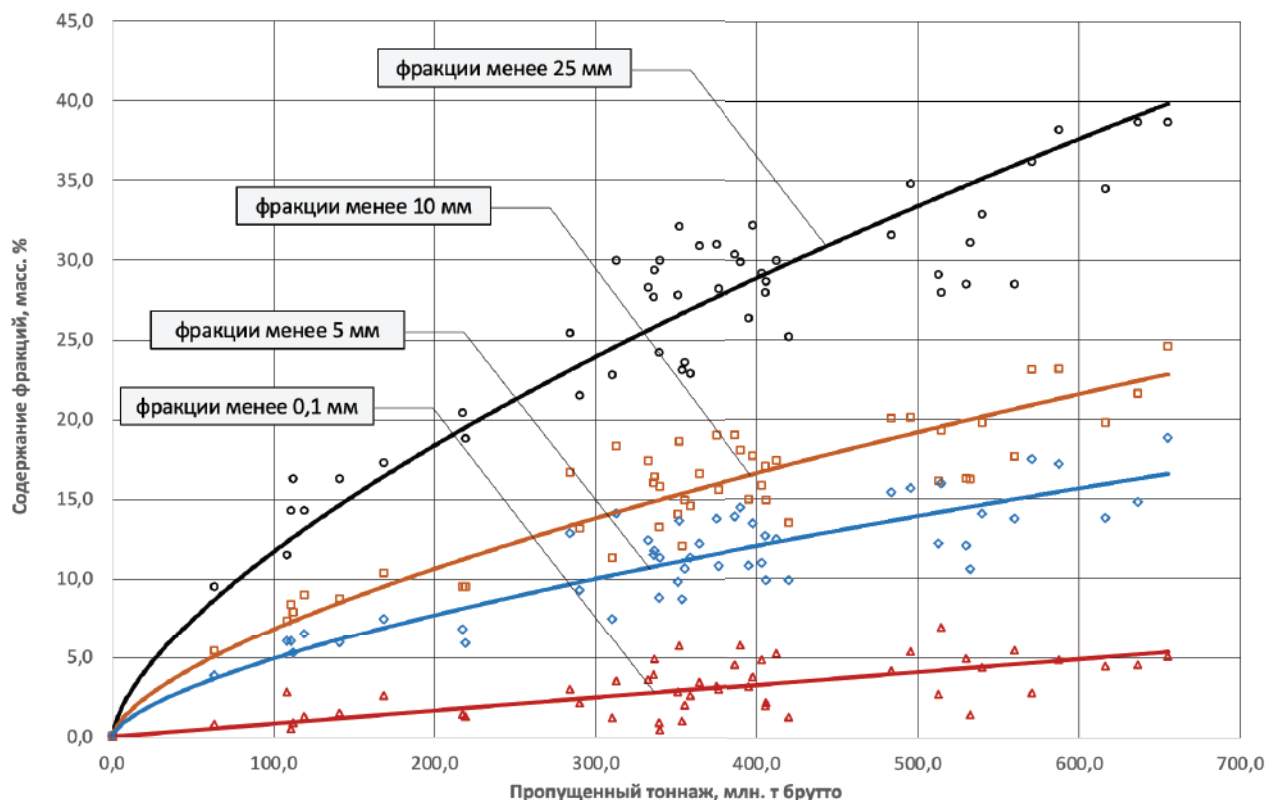


Рис. 4. Накопление различных фракций в щебеночном балласте при наработке тоннажа на грузовых участках железных дорог Октябрьской дирекции инфраструктуры направлений Волховстрой — Кошта и Волховстрой — Мурманск

ход предложен в работах С. Н. Попова [10, 23], В. П. Сычева, А. Ю. Абдурашитова [24]. В работах [5, 6, 25] для оценки загрязнения и засорения балластного слоя используется степенная зависимость, однако относительно фракций менее 5 мм и менее 0,1 мм процесс загрязнения и засорения щебня идет примерно с одинаковой интенсивностью. Для уточнения процесса загрязнения щебня внешними загрязнителями проведены обширные исследования по выявлению процесса накопления фракций менее 25 мм в балластном слое железнодорожного пути по мере наработки тоннажа. Экспериментальные данные были получены путем рассева проб щебня, отобранных с глубины 20–40 см под подошвой шпалы на участках железнодорожных путей Октябрьской дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» (рис. 4).

Анализ представленных зависимостей показывает, что наблюдается практически прямопропорциональная зависимость между пропущенным тоннажем и содержанием фракции менее 0,1 мм по массе в балластном слое железнодорожных путей. В то же время накопление фракций менее 5 мм не подчиняется закону прямой линии, а имеет два периода.

В течение первого периода процесс загрязнения щебня имеет нелинейный характер и подчиняется степенной зависимости. При этом такая зависимость наблюдается до момента накопления в щебеночном балласте около 10–12 % внешних загрязнителей по массе. В дальнейшем процесс загрязнения происходит практически с постоянной интенсивностью и подчиняется закону прямой линии. Как показали результаты опытных

данных, хорошо согласующихся с результатами других авторов [7, 10, 12, 17, 19, 26], причиной такой ситуации является интенсивное загрязнение верхней части балластной призмы, в особенности в пределах первых 10–15 см под подошвой шпалы.

Аккумулятивная способность балластного слоя (способность накапливать засорители и загрязнители), как следует из логики размышлений, равна его пористости (пустотности). В первый период работы, когда в пути уложен чистый щебеночный балласт, его пористость в среднем составляет 35–40 % и проникновение мелких фракций от внешнего загрязнения происходит весьма интенсивно и быстро. С течением времени в верхнем слое балластной призмы происходит аккумуляция внешних загрязнителей и, следовательно, пористость щебня в верхнем слое постепенно снижается. Поэтому, как только загрязнение верхней зоны балластного слоя будет приближаться к 30–35 %, процесс загрязнения всей балластной призмы существенно замедляется (примерно в 4 раза), поскольку дальнейшее загрязнение возможно только после просыпания мелких частиц внутрь балластного слоя.

Таким образом, процесс загрязнения балластного слоя внешними загрязнителями происходит в две стадии. Первая стадия характеризуется интенсивным загрязнением балласта. При этом в целях упрощения дальнейших расчетов с приемлемой для инженерных целей точностью можно принять зависимость накопления внешних загрязнителей на этой стадии, близкой к прямо пропорциональной. Учитывая собственные результаты исследований и предложения Г. М. Шахунянца [7, 17], примем, что загрязнение щебня внешними загрязнителями на первой стадии имеет интенсивность d_1 , а сам процесс загрязнения происходит до тех пор, пока общее загрязнение щебеночного балласта внешними загрязнителями не составит 10 % по массе. Вторая стадия характеризуется значительно мень-

шей интенсивностью загрязнения d_2 , которую в среднем можно принять $d_2 = 0,25 \cdot d_1$ (рис. 4).

Учитывая вышеизложенное уравнение, отражающее процесс накопления внешних загрязнителей в балластном слое в зависимости отработки тоннажа, можно представить в виде:

$$C = \alpha(T) + 0,25 \cdot \xi \cdot \beta(T); \quad (5)$$

$$\alpha(T) = \begin{cases} c \cdot T, & \text{если } c \cdot T \leq 10 \% \\ 10 \%, & \text{если } c \cdot T > 10 \% \end{cases} \quad (6)$$

$$\beta(T) = \begin{cases} 0, & \text{если } c \cdot T \leq 10 \% \\ (c \cdot T - 10 \%), & \text{если } c \cdot T > 10 \% \end{cases} \quad (7)$$

где C — количество внешних загрязнителей в балластном слое, масс.%;

c — интенсивность загрязнения щебеночного балласта внешними загрязнителями на первой стадии загрязнения, % по массе на 1 млн т брутто пропущенного груза, определяемая по [10];

T — пропущенный тоннаж, млн т груза брутто; 10 % — предельное загрязнение балластного слоя внешними загрязнителями, до наступления которого загрязнение идет с постоянной интенсивностью c ;

ξ — коэффициент зональности, по рекомендациям Г. М. Шахунянца [7, 17, 19, 27] принимается 0,96 — при звеньевом пути и 0,92 — при бесстыковом пути.

Математическая модель засорения и загрязнения щебеночного балласта

Выполненные исследования позволяют установить накопление внутренних и внешних загрязнителей и засорителей балластного слоя железнодорожного пути в зависимости отработки тоннажа при разных условиях эксплуатации, системах технического обслуживания железнодорожного пути, а также в зависимости

от исходных прочностных свойств щебня. При этом будем учитывать, что внутреннее и внешнее загрязнение и засорение балласта происходит одновременно. В связи с этим общая загрязненность щебеночного балласта, Q будет выражаться функциональной зависимостью:

$$Q(T) = A(T) + B(T) + C(T) + Q_0, \quad (8)$$

где $A(T)$ — содержание внутренних засорителей и загрязнителей, образующихся в щебеночном балласте за счет собственного дробления и истирания зерен под поездной нагрузкой при наработке тоннажа T , масс.%;
 $B(T)$ — содержание внутренних засорителей, образующихся в щебеночном балласте вследствие дробления зерен под воздействием рабочих органов балластоуплотнительных путевых машин при наработке тоннажа T , масс.%;

$C(T)$ — содержание внешних засорителей и загрязнителей, накапливающихся в щебеночном балласте при наработке тоннажа T , масс.%;

Q_0 — начальное загрязнение балласта по массе перед его укладкой в путь, масс.%.

На рис. 5 приведены результаты расчетов процесса загрязнения и засорения щебеночного балласта по формуле (8). На этом же рисунке для сравнения приведены аналогичные зависимости, построенные на основе опытных данных. При выполнении расчетов условно принято, что фактическое и расчетное начальное загрязнение щебеночного балласта $Q_0 = 0,0$ масс.%.

Анализ опытных и расчетных данных, приведенных на рис. 5, показывает их хорошую сходимость. Наибольшее расхождение наблюдается при наработке тоннажа до 50 млн т брутто, что связано с недостаточным количеством опытных данных. В то же время в диапазоне от 200 до 500 млн т брутто это различие несущественно. При этом именно в этом диапазоне наработки

тоннажа исчерпывается ресурс работы щебеночного балласта. Таким образом, исходя из представленных результатов исследования следует признать математическую модель, выраженную зависимостью (8), адекватной, а результаты расчетов достоверными с приемлемой погрешностью для практических целей.

Срок службы щебеночного балласта по условию его предельного износа

Срок службы щебеночного балласта принято исчислять периодом времени между его смежными очистками либо между укладкой нового щебня в путь и ближайшей очисткой, либо между последней очисткой и полной заменой щебеночного балласта на новый. Известно [20], что одним из главных критериев назначения среднего ремонта пути, основной целью которого является восстановление дренирующих и прочностных свойств щебеночного балласта и обеспечения равноупругости подрельсового основания, является его загрязненность. Таким образом, используя зависимость (8), представляется возможным для заданных условий эксплуатации определить предельный (допускаемый) пропущенный тоннаж, при наработке которого щебеночный балласт либо должен быть подвергнут очистке, либо заменен на новый. При таком подходе важнейшей задачей является определение предельного (допускаемого) загрязнения щебеночного балласта, при котором последний снижает свои дренирующие, прочностные и деформативные свойства настолько, что в ходе дальнейшей эксплуатации железнодорожного пути интенсифицируются процессы накопления остаточных деформаций, приводящие к росту затрат на текущее содержание. В соответствии с представлениями Г. М. Шахунянца [7] и других авторов [10, 12, 24, 26, 28, 29] такое предельное загрязнение балласта называется его аккумулятивной способностью $Q_{\text{доп}}$ и определяется количеством загрязнителей,

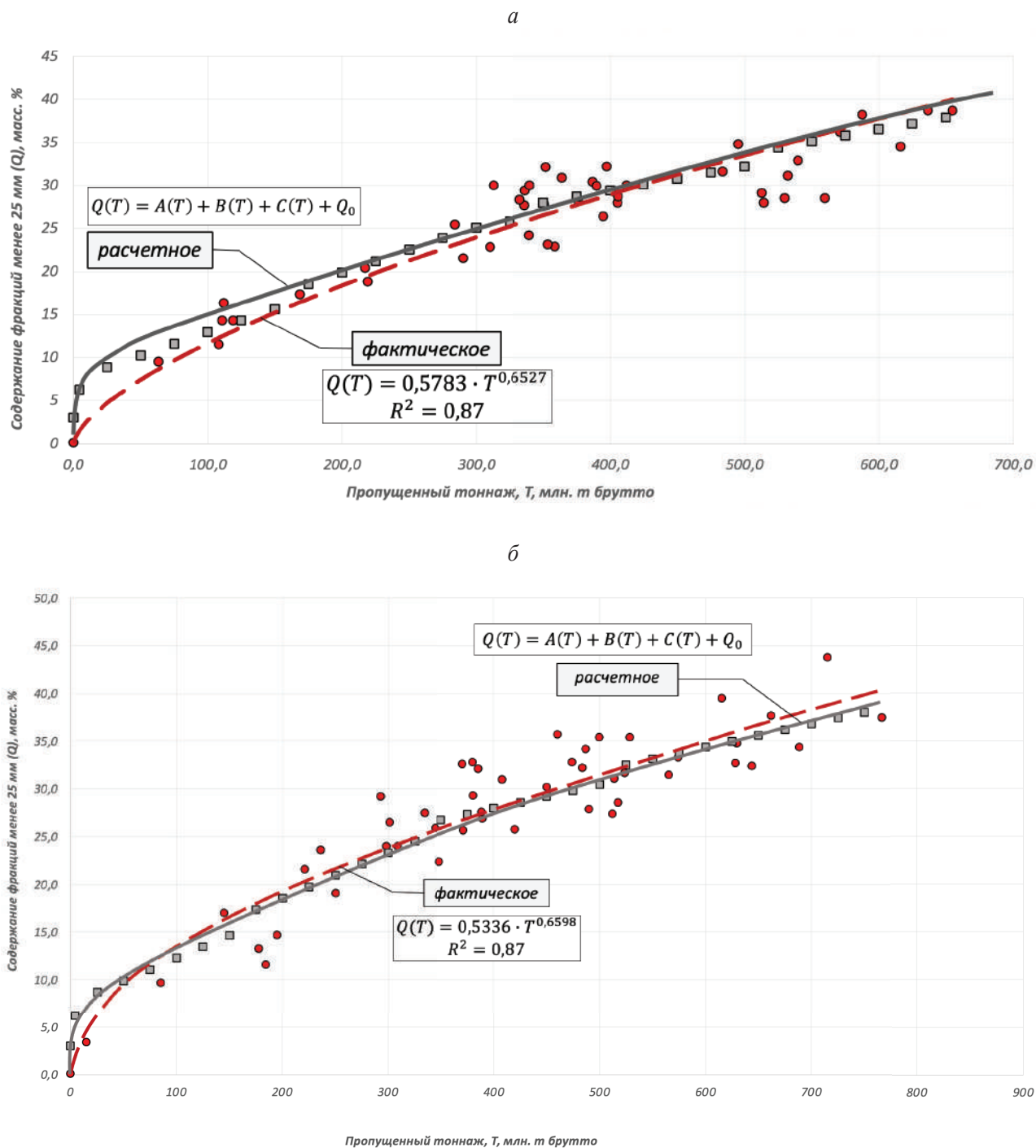


Рис. 5. Накопление в щебеночном балласте мелких фракций в зависимости от наработки тоннажа: *фактическое* — по данным обследования балластного слоя железнодорожного пути; *расчетное* — на основании разработанной математической модели вида (8);
 а — для участков с перевозкой преимущественно сыпучих пылящих грузов;
 б — для участков с перевозкой преимущественно непылящих грузов

которое может разместиться внутри балластного слоя без заметного ухудшения его работы. Таким образом, уравнение предельного (допускаемого) загрязнения щебеночного балласта можно представить следующим образом:

$$A(T_{\text{доп}}) + B(T_{\text{доп}}) + C(T_{\text{доп}}) + Q_0 = Q_{\text{доп}} \quad (9)$$

Принимая во внимание, что срок службы щебеночного балласта в большинстве случаев соответствует его загрязненности свыше 10 %, выражение (9) можно представить следующим образом:

$$0,0007 \cdot m \cdot T_{\text{доп}} \cdot e^{0,1272 \cdot I_{\text{мех}}} + m \cdot e_{\text{упл}} \cdot \varepsilon_{\text{упл}} + 10 \% + 0,25 \cdot \xi \cdot (c \cdot T_{\text{доп}} - 10 \%) = Q_{\text{доп}} - Q_0, \quad (10)$$

где $\varepsilon_{\text{упл}}$ — общее количество уплотнений щебеночного балласта рабочими органами путевых машин до ближайшей очистки или замены балласта, определяемое применяемыми технологическими процессами ремонта пути и системой его технического обслуживания.

Таким образом, срок службы щебеночного балласта через наработку тоннажа можно выразить как:

$$T_{\text{доп}} = \frac{Q_{\text{доп}} - Q_0 - m \cdot e_{\text{упл}} \cdot \varepsilon_{\text{упл}} - 10 \% + 2,5 \cdot \xi}{0,0007 \cdot m \cdot e^{0,1272 \cdot I_{\text{мех}}} + 0,25 \cdot \xi \cdot c} \quad (11)$$

Полученное выражение определяет предельную наработку тоннажа в млн т брутто пропущенного груза, при достижении которой щебеночный балласт с известными механическими свойствами в заданных условиях эксплуатации должен быть либо очищен, либо заменен на новый.

Заключение

Результаты выполненных исследований, приведенные в настоящей работе, позволяют обеспечить достоверное прогнозирование процессов

деградации щебеночного балласта и сроков его службы при эксплуатации железнодорожного пути в заданных условиях.

Однако, как следует из формулы (11), ключевым параметром в определении срока службы является аккумулятивная способность балласта $Q_{\text{доп}}$. Ее величина в соответствии с действующими в ОАО «РЖД» нормативными документами вне зависимости от категории щебня, его механических свойств, формы зерен, вида загрязнителя, влажности загрязнителя принимается для путей всех классов одинаковой и равной 30 % [20].

В то же время известно, что надежная и стабильная работа щебеночного балласта под поездной нагрузкой определяется несущей способностью и деформативностью балластной призмы железнодорожного пути, которые, в свою очередь, зависят от прочностных и деформативных свойств щебня. Следовательно, особую значимость как для науки, так и для практических целей, приобретает также вопрос дальнейшего исследования аккумулятивной способности щебеночного балласта, характеризующегося различными физико-механическими свойствами.

Библиографический список

1. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути // Утв. Распор. ОАО «РЖД» от 14 ноября 2016 г. № 2288/р. — М.: ОАО «РЖД», 2016. — 286 с.
2. ГОСТ 7392—2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2015. — 32 с.
3. Ionescu D. Evaluation of the engineering behaviour of railway ballast / D. Ionescu // PhD thesis, Wollongong: University of Wollongong, 2004. — 440 p.
4. Pires J. Railway ballast degradation / J. Pires, A. Dumont // 15th Swiss Transport Research Conference, April 15–17, Monte Verità, 2015.
5. Величко Д. В. Оценка состояния балластного слоя в условиях пропуска сверхнормативного тоннажа / Д. В. Величко // Политранспортные системы: материалы

IX Международной научно-технической конференции. — Новосибирск: СГУПС, 2017. — С. 153–158.

6. Величко Д. В. Анализ загрязненности щебеночного балласта / Д. В. Величко, Н. А. Толстикова // Известия Трансиба. — Омск, 2016. — № 3(27). — С. 110–117.

7. Шахунянец Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахунянец. — М.: Транспорт, 1969. — 536 с.

8. McDowell G. R. The fractal crushing of granular materials / G. R. McDowell, M. D. Bolton, D. Robertson // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. — 1996. — Vol. 44. — № 12. — Pp. 2079–2101.

9. Paderno C. Ballast behavior under action of tamping and railway traffic / C. Paderno // PhD Thesis. Bern: EPFL, Switzerland, 2010. — 186 p.

10. Попов С. Н. Балластный слой железнодорожного пути / С. Н. Попов. — М.: Транспорт, 1965. — 183 с.

11. Ефремов Ю. В. Исследования по продлению срока службы путевого балласта / Ю. В. Ефремов // Повышение надежности и эффективности пути и сооружений: межвуз. сб. научн. трудов. — Самара: СамИИТ, 1995. — Вып. 11. — С. 4–6.

12. Туровский И. Я. Определение сроков службы балластного слоя / И. Я. Туровский, М. Б. Смирнова. — М.: МИИТ, 1966.

13. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности // Утв. Распор. ОАО «РЖД» от 22 декабря 2017 г. № 2706/р. — М.: ОАО «РЖД», 2017. — 97 с.

14. Asadzadeh S. M. The Effects of Renewal and Tamping on Ballast and Track Geometry in Turnouts / S. M. Asadzadeh // Intelligent Quality Assessment of Railway Switches and Crossings. — 2011. — Pp. 229–245.

15. Bhanitiz A. A Laboratory Study of Railway Ballast Behaviour under Traffic Loading and Tamping Maintenance / A. Bhanitiz // Thesis submitted to The University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. — Nottingham: The University of Nottingham, 2007. — 234 p.

16. Chrismer S. Track Surfacing with Conventional Tamping and Stone Injection / S. Chrismer. — 1990. — Vol. 91.

17. Шахунянец Г. М. Расчеты верхнего строения пути / Г. М. Шахунянец. — М.: Трансжелдориздат, 1959. — 264 с.

18. Neuhold J. Analysis of railway ballast pollution in regard to traffic load and mechanical impacts / J. Neuhold, M. Landgraf. — 2020. — № 11. — Pp. 24–28.

19. Проектирование железнодорожного пути: учебное пособие / Под ред. Г. М. Шахунянца. — М.: Транспорт, 1972. — 320 с.

20. Технические условия на работы по ремонту железнодорожного пути // Утверждены Распоряжением ОАО «РЖД» от 18 января 2013 г. № 75р. — М.: ОАО «РЖД», 2013.

21. Комонов С. В. Ветровая эрозия и пылеподавление: учебное пособие / С. В. Комонов, Е. Н. Комонова. — Красноярск: СФУ ПИ, 2008. — 191 с.

22. РД 153-34.0-02.106—98. Методика оценки ветровой эрозии и пыления угольного штабеля ТЭС. — Екатеринбург: ОАО «УралОРГРЭС», 1998. — 32 с.

23. Попов С. Н. О допускаемых напряжениях на балласт / С. Н. Попов // Взаимодействие пути и подвижного состава и вопросы расчетов пути: сб. научных трудов. — М.: Трансжелдориздат, 1955. — Вып. 97. — С. 353–384.

24. Сычев В. П. Расчет ресурса железобетонных шпал и балласта железнодорожного пути на основе моделирования / В. П. Сычев и др. // Наука и техника транспорта. — 2020. — № 4. — С. 37–44.

25. Бодяков А. Н. Анализ засорителей и загрязнителей щебеночного балласта / А. Н. Бодяков // Образование. Наука. Производство: IX Международный молодежный форум. — Белгород: БГТУ им В. Г. Шухова, 2017. — С. 931–933.

26. Яковлева Т. Г. Определение сроков между прочистками балластного слоя / Т. Г. Яковлева, Г. В. Лидерс // Техничко-экономические расчеты верхнего строения пути. — М.: МИИТ, 1962.

27. Шахунянец Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахунянец. — М.: Транспорт, 1987. — 479 с.

28. Чему Ж. Исследование работы железнодорожного балластного слоя и разработка рекомендаций по уве-

личению срока его службы: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ж. Чему / СПб.: ПГУПС, 1997. — 30 с.

29. Nurmikolu A. Degradation and frost susceptibility of crushed rock aggregates used in the structural layers of railway track / A. Nurmikolu // PhD Thesis. Tampere: Tampere University of Technology, 2005. — 325 p.

Дата поступления: 01.08.2022

Решение о публикации: 19.08.2022

Контактная информация:

КОЛОС Алексей Федорович — канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительство дорог транспортного комплекса»; kolos2004@inbox.ru

Clogging and Pollution of Broken Stone Ballast During Railway Track Exploitation

A. F. Kolos

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

For citation: Kolos A. F. Clogging and Pollution of Broken Stone Ballast During Railway Track Exploitation // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 558–575. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-558-575

Summary

Purpose: Determination of legitimacies of clogging, pollution for broken stone ballast, perceiving vibrodynamic load from a rolling stock, as well as of the ballast life. **Methods:** Theoretical and empirical research methods are used in the study. Theoretical methods are based on the analysis of known models describing broken stone degradation processes during railway track exploitation, and empirical methods — on the pursued experiments and trials. The identification of the legitimacies for pollutants and clogs accumulation in broken stone ballast was based on the results of dynamic bench tests and laboratory determination of broken stone grain composition removed from ballast layer of exploited railway track with various tonnage workout. The methods of statistical processing of test results and regression analysis were used in the study. **Results:** According to the statistical processing of test results and laboratory determinations of broken stone grain composition, functional dependencies were established for the accumulation in broken stone ballast of the products of own crushing, abrasive wear as well as of external pollution, depending on broken stone initial physical and mechanical properties, railway track exploitation conditions and the system of its maintenance. Mathematical model for the prediction of broken stone ballast life depending on railway track section exploitation conditions was developed in the study. **Practical significance:** The results of the study make it possible to prognose broken stone ballast life from the condition of its maximally acceptable pollution and clogging and also to plan reasonably railway track maintenance work.

Keywords: Railway track, broken stone ballast, ballast layer, clogging of broken stone ballast, pollution of broken stone ballast, broken stone ballast life.

References

1. *Instruktsiya po tekushchemu sodержaniyu zheleznodorozhnogo puti. Utv. raspор. OAO “RZhD” № 2288/r ot 14.11.2016* [Instructions for the current maintenance of the railway track. Approved. thrust. OJSC

Russian Railways No. 2288/r dated 11/14/2016]. Moscow: “RZhD” Publ., 2016. 286 p. (In Russian)

2. *GOST 7392—2014 Shcheben’ iz plotnykh gornykh porod dlya ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puti. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 7392—2014 Crushed stone

from dense rocks for the ballast layer of the railway track. Specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2015. 32 p. (In Russian)

3. Ionescu D. Evaluation of the engineering behaviour of railway ballast. PhD thesis, Wollongong: University of Wollongong, 2004. 440 p.

4. Pires J., Dumont A. Railway ballast degradation. 15 th Swiss Transport Research Conference April 15–17, Monte Verità, 2015.

5. Velichko D. V. Otsenka sostoyaniya ballastnogo sloya v usloviyakh propuska sverkhnormativnogo tonnazha [Assessment of the state of the ballast layer in the conditions of passing excess tonnage]. *Politransportnye sistemy. Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Polytransport systems. Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference]. Novosibirsk: SGUPS Publ., 2017, pp. 153–158. (In Russian)

6. Velichko D. V., Tolstikova N. A. *Analiz zagryazennosti shchebenochnogo ballasta* [Analysis of the contamination of crushed stone ballast]. Omsk: Izvestiya Transiba Publ., 2016, I. 3 (27), pp. 110–117. (In Russian)

7. Shakhunyants G. M. *Zheleznodorozhnyy put'* [Railway way]. Moscow: Transport Publ., 1969. 536 p. (In Russian)

8. McDowell, G. R., Bolton, M. D., Robertson, D. The fractal crushing of granular materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1996, vol. 44, I. 12. pp. 2079–2101.

9. Paderno C. Ballast behavior under action of tamping and railway traffic. PhD Thesis. Bern: EPFL, Switzerland, 2010. 186 p.

10. Popov S. N. *Ballastnyy sloy zheleznodorozhnogo puti* [Ballast layer of the railway track]. Moscow: Transport Publ., 1965. 183 p. (In Russian)

11. Efremov Yu. V. Issledovaniya po prodleniyu sroka sluzhby putevogo ballasta [Research on extending the service life of track ballast]. *Mezhvuz. sb. nauchn. trudov, vyp. 11 «Povyshenie nadezhnosti i effektivnosti puti i sooruzheniy»* [Sat. scientific works, no. 11 “Improving the reliability and efficiency of the track and structures”]. Samara: SamIIT Publ., 1995, pp. 4–6. (In Russian)

12. Turovskiy I. Ya., Smirnova, M. B. *Opreделение сроков sluzhby ballastnogo sloya* [Determination of the service life of the ballast layer]. Moscow: MIIT Publ., 1966. (In Russian)

13. *Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya nadezhnosti. Utv. rasp. OAO “RZhD” № 2706/r ot 22.12.2017* [Methodology for assessing the impact of rolling stock on the track according to the conditions for ensuring reliability. Approved. thrust. OJSC Russian Railways No. 2706/r dated 12/22/2017]. Moscow: “RZhD” Publ., 2017. 97 p. (In Russian)

14. Asadzadeh S. M. The Effects of Renewal and Tamping on Ballast and Track Geometry in Turnouts. *Intelligent Quality Assessment of Railway Switches and Crossings*. 2011, pp. 229–245.

15. Bhanitiz A. A Laboratory Study of Railway Ballast Behaviour under Traffic Loading and Tamping Maintenance. Thesis submitted to The University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. Nottingham, The University of Nottingham, 2007. 234 p.

16. Chrismer S. Track Surfacing with Conventional Tamping and Stone Injection. 1990, vol. 91.

17. Shakhunyants G. M. *Raschety verkhnego stroeniya puti* [Calculations of the upper structure of the track]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1959. 264 p. (In Russian)

18. Neuhold J., Landgraf M. Analysis of railway ballast pollution in regard to traffic load and mechanical impacts. 2020, pp. 24–28.

19. *Proektirovanie zheleznodorozhnogo puti* [Designing a railway track]. Moscow: Transport Publ., 1972. 320 p. (In Russian)

20. *Tekhnicheskie usloviya na raboty po remontu zheleznodorozhnogo puti* [Specifications for work on the repair of the railway track]. *Utverzhdeny Rasporyazheniem OAO “RZhD” ot 18 yanvarya 2013 g. N 75r* [Approved by the Order of Russian Railways OJSC dated January 18, 2013 N 75r]. Moscow: «RZhD» Publ., 2013. (In Russian)

21. Komonov S. V., Komonova E. N. *Vetrovaya eroziya i pylepodavlenie* [Wind erosion and dust suppression]. Krasnoyarsk: SFU PI Publ., 2008. 191 p. (In Russian)

22. *RD 153-34.0-02.106-98 Metodika otsenki vetrovoy erozii i pyleniya ugol'nogo shtabelya TES* [RD 153-34.0-

02.106-98 Methodology for assessing wind erosion and dusting of the coal pile of TPP]. Ekaterinburg: “UralORGRES” Publ., 1998. 32 p. (In Russian)

23. Popov S. N. O dopuskaemykh napryazheniyakh na ballast [On the allowable stresses on the ballast]. *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava i voprosy raschetov puti* [Interaction of the track and rolling stock and issues of track calculations]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1955, pp. 353–384. (In Russian)

24. Sychev V. P. Raschet resursa zhelezobetonnykh shpal i ballasta zheleznodorozhnogo puti na osnove modelirovaniya [Calculation of the resource of reinforced concrete sleepers and railway track ballast based on modeling]. *Nauka i tekhnika transporta* [Transport Science and Technology]. 2020, vol. 4, pp. 37–44. (In Russian)

25. Bodyakov A. N. Analiz zasoriteley i zagryazniteley shchebenochnogo ballasta [Analysis of weeds and pollutants of crushed stone ballast]. «IX Mezhdunarodnyy molodezhnyy forum “Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo” [“IX International Youth Forum “Education. Science. Production”]. Belgorod: BGTU im V.G. Shukhova Publ., 2017, pp. 931–933. (In Russian)

26. Yakovleva T. G., Lidets, G. V. Opredelenie srokov mezhdru prochistkami ballastnogo sloya [Determining the time between cleanings of the ballast layer.]. “*Tekhniko-*

ekonomicheskie raschety verkhnego stroeniya puti” [“Technical and economic calculations of the upper structure of the track”]. Moscow: MIIT Publ., 1962.

27. Shakhunyants G. M. *Zheleznodorozhnyy put’* [Railway way]. Moscow: Transport Publ., 1987. 479 p. (In Russian)

28. Chemu Zh. *Issledovanie raboty zheleznodorozhnogo ballastnogo sloya i razrabotka rekomendatsiy po uvelicheniyu sroka ego sluzhby. Kand. Diss* [Study of the operation of the railway ballast layer and the development of recommendations for increasing its service life. Cand. Diss]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 1997. 30 p. (In Russian)

29. Nurmikolu A. Degradation and frost susceptibility of crushed rock aggregates used in the structural layers of railway track. PhD Thesis. Tampere: Tampere University of Technology, 2005. 325 p.

Received: August 01, 2022

Accepted: August 19, 2022

Author’s information:

Aleksey F. KOLOS — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Construction of Routes in Transportation System;
kolos2004@inbox.ru

УДК 625.1

О прогнозировании пассажиропотоков для высокоскоростных магистралей с учетом конкуренции на рынке пассажирских перевозок

В. А. Анисимов, А. С. Григорьева

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

Для цитирования: Анисимов В. А., Григорьева А. С. О прогнозировании пассажиропотоков для высокоскоростных магистралей с учетом конкуренции на рынке пассажирских перевозок // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 576–589. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-576-589

Аннотация

Цель: Изучение проблемы прогнозирования пассажиропотоков для высокоскоростных железнодорожных магистралей с учетом особенностей регионального развития и конкуренции на рынке пассажирских перевозок в условиях Российской Федерации. Влияние большого количества различных факторов на формирование объема пассажирских перевозок является основной причиной сложности получения надежных прогнозов пассажиропотоков на долгосрочную перспективу. На основе анализа российских и зарубежных научных работ, посвященных исследуемой проблеме, из множества факторов были выделены наиболее значимые: численность населения, среднедушевой доход, валовой внутренний и региональный продукты. Анализ показал, что ученые неоднозначно оценивают влияние валового регионального продукта на размеры пассажиропотоков. Авторы исследовали зависимости между объемами пассажирских перевозок и валовым региональным продуктом на направлениях проектируемых высокоскоростных железнодорожных магистралей Москва — Санкт-Петербург и Москва — Казань. В результате были выявлены разделы валового регионального продукта с наибольшей степенью влияния на пассажиропоток. Также в современных условиях значительно возросла конкуренция на рынке пассажирских перевозок, которая в основном и определяет распределение пассажиропотока по видам транспорта. **Методы:** Системного анализа, корреляционно-регрессионного анализа, анализа временных рядов. **Результаты:** Полученные результаты показали, что в рыночных условиях из-за динамичности и неопределенности спроса населения на транспортные услуги, который обусловлен выбором пассажира способа перемещения в зависимости от времени в пути, стоимости и комфортности перевозки, возросла сложность прогнозирования пассажиропотоков. Предложены два варианта методики прогнозирования пассажиропотоков для высокоскоростных магистралей с учетом конкуренции на рынке пассажирских перевозок. **Практическая значимость:** Применение математической модели прогнозирования пассажиропотоков, учитывающей особенности развития регионов Российской Федерации и конкуренцию между разными видами пассажирского транспорта, позволит получить надежную оценку перспективных объемов пассажирских перевозок, что обеспечит снижение рисков инвестирования в строительство и эксплуатацию капиталоемких высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Ключевые слова: Пассажирские перевозки, прогнозирование, моделирование, пассажиропоток, валовой региональный продукт, конкурентоспособность, стоимость, скорость доставки, комфорт, индуцированный спрос, параметры пассажирских сообщений.

Введение

Протяженность высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ) в мире растет стремительными темпами. Наибольшее развитие высокоскоростных железнодорожных пассажирских перевозок наблюдается в развитых странах Европы и Юго-Восточной Азии. Китай достиг максимального в мире привлечения пассажиров на ВСМ, построив за десять с небольшим лет около 30 000 км высокоскоростных магистралей. Инвестиционные проекты ВСМ реализуются также в Индии, Индонезии, Малазии, Марокко, Саудовской Аравии, Таиланде и даже в таких странах, как Мьянма и Лаос [1].

Опыт эксплуатации ВСМ в странах Европы и Юго-Восточной Азии показал, что данный вид транспорта имеет ряд существенных преимуществ по экологичности, энергоэффективности, пропускной способности, долговечности и безопасности. Кроме этого, примеры из мировой практики [1] подтверждают, что при правильном стратегическом планировании развития городов, тяготеющих к ВСМ, высокоскоростные железнодорожные пассажирские перевозки способствуют созданию агломерационных эффектов, стимулируя деловую активность и инновационную деятельность населения, повышая эффективность производства и торговли, ускоряя социально-экономическое развитие регионов. Для не охваченных авиатранспортом средних и малых городов, через которые или вблизи которых пройдет ВСМ, появляются новые образовательные, трудовые, предпринимательские и рекреационные возможности, повышающие качество жизни проживающего в них населения [1].

Эффективность ВСМ складывается из операционной рентабельности, мультипликативных эффектов на этапе строительства магистрали, в первую очередь в таких отраслях экономики, как строительство и машиностроение, и косвенных социально-экономических эффектов.

К косвенным эффектам можно отнести агломерационные эффекты (повышение мобильности населения, его деловой активности, расширение рынков труда, товаров, услуг и т. п.), о которых кратко упомянуто в предыдущем абзаце, а также индуцированный спрос на пассажирские высокоскоростные перевозки, который определяется новыми транспортными возможностями и конкурентоспособностью ВСМ по показателям стоимости, скорости доставки и комфорта.

Операционная рентабельность ВСМ зависит от численности и плотности населения, его пространственного распределения [2]. Развитую сеть ВСМ имеют страны с высокой численностью и плотностью населения и значительными техническими и финансовыми ресурсами для реализации дорогих и сложных инфраструктурных проектов. Во многих странах существуют районы, уровень развития и размещение населения которых позволяют реализовать экономически эффективные проекты ВСМ [3]. В странах, где основным собственником инфраструктуры высокоскоростного транспорта и инвестором в ее развитие является государство, использование высокоскоростного транспорта обеспечивает существенный экономический результат за счет косвенных эффектов, возникающих на территориях, по которым проходит ВСМ [4]. Например, в результате появления для потенциальных потребителей транспортных услуг нового сообщения, позволяющего добраться до места назначения существенно быстрее, возникает индуцированный спрос для ВСМ. И если для пассажира стоимость поездки будет дешевле или сопоставима с его затратами на поездку по маршруту, включающему в себя авиaperевозку, то в этом случае ВСМ будет иметь перед пассажирским авиатранспортом серьезное конкурентное преимущество, которое позволит не только создать индуцированный спрос, но и переключить на себя значительную часть пассажиропотоков.

В России продолжительное время обсуждается развитие высокоскоростного транспорта [1]. В Транспортной стратегии Российской Федерации [5] одним из основных направлений развития транспортного комплекса страны обозначено создание сети высокоскоростного железнодорожного сообщения. Уже давно анонсированы проекты ВСМ Москва — Санкт-Петербург и Москва — Казань. В актуализированной «Программе организации скоростного и высокоскоростного железнодорожного сообщения в Российской Федерации» заявлены проекты ВСМ «Евразия»: Москва — Казань — Екатеринбург; Екатеринбург — Челябинск — граница с Казахстаном и Москва — Смоленск — граница с Белоруссией [1]. Также в различных информационно-аналитических документах упоминается ВСМ Москва — Тула — Воронеж — Ростов-на-Дону — Адлер [1, 6].

О проблеме прогнозирования пассажиропотоков

Высокоскоростная железнодорожная магистраль — это самый сложный комплекс инженерно-технических сооружений и высокотехнологичных систем, включающий в себя дорогостоящие объекты строительства. Одним из важных условий инвестиционной привлекательности проекта ВСМ и государственного участия в его реализации является обеспечение его операционной эффективности [1]. Для ее обоснования необходимо иметь надежную прогнозную оценку объемов перевозок на долгосрочную перспективу. Ошибки в прогнозах обходятся очень дорого.

На формирование объема пассажирских перевозок оказывает влияние большое количество различных факторов. Проанализировав работы российских и зарубежных ученых, посвященных исследуемой проблеме, из множества факторов были выделены наиболее значимые: численность населения, среднедушевой доход, валовой внутренний и региональный продукты (ВВП и ВРП) [7, 8].

При этом в отношении влияния ВРП на размеры пассажиропотоков среди ученых имеются неоднозначные оценки. Это связано, во-первых, со сложностью расчета ВРП из-за открытого характера экономик регионов, что затрудняет определение границ производства для оценки размеров добавленной стоимости, создаваемой в результате межрегиональной деятельности предприятий и корпораций. Кроме этого, при расчете ВРП не учитывают производство услуг потребления, оказываемых обществу в целом за счет средств федерального бюджета, а также экономические операции финансовых посредников, которые не ограничиваются рамками отдельных регионов. Во-вторых, не все виды экономической деятельности, включенные в структуру ВРП, влияют на размеры пассажиропотоков. ВРП является своеобразным экономическим срезом человеческой жизнедеятельности (ЧЖД). В результате ЧЖД у человека возникает потребность в физических пространственных перемещениях пешком или с помощью транспорта, который предоставляет населению соответствующие возможности для перевозок пассажиров.

Рассмотрим причинно-следственные связи между ЧЖД, пассажирскими перевозками и ВРП (см. рис. 1), используя принципы и методы системного анализа и метод корреляционно-регрессионного анализа.

Центральными процессами ЧЖД являются: 1) обучение (познание окружающего мира и своих возможностей), 2) работа, 3) рекреация (восстановление сил человеческого организма [9], потраченных на первые два процесса). Они генерируют основной спрос на пассажирские перевозки, связанный с деловой активностью населения (деловые поездки в командировки, от мест проживания до работы и обратно), обучением (поездки от мест проживания до образовательных учреждений и обратно) и рекреацией (поездки к местам отдыха, санаторно-курортного лечения и т. п., туристические поездки).

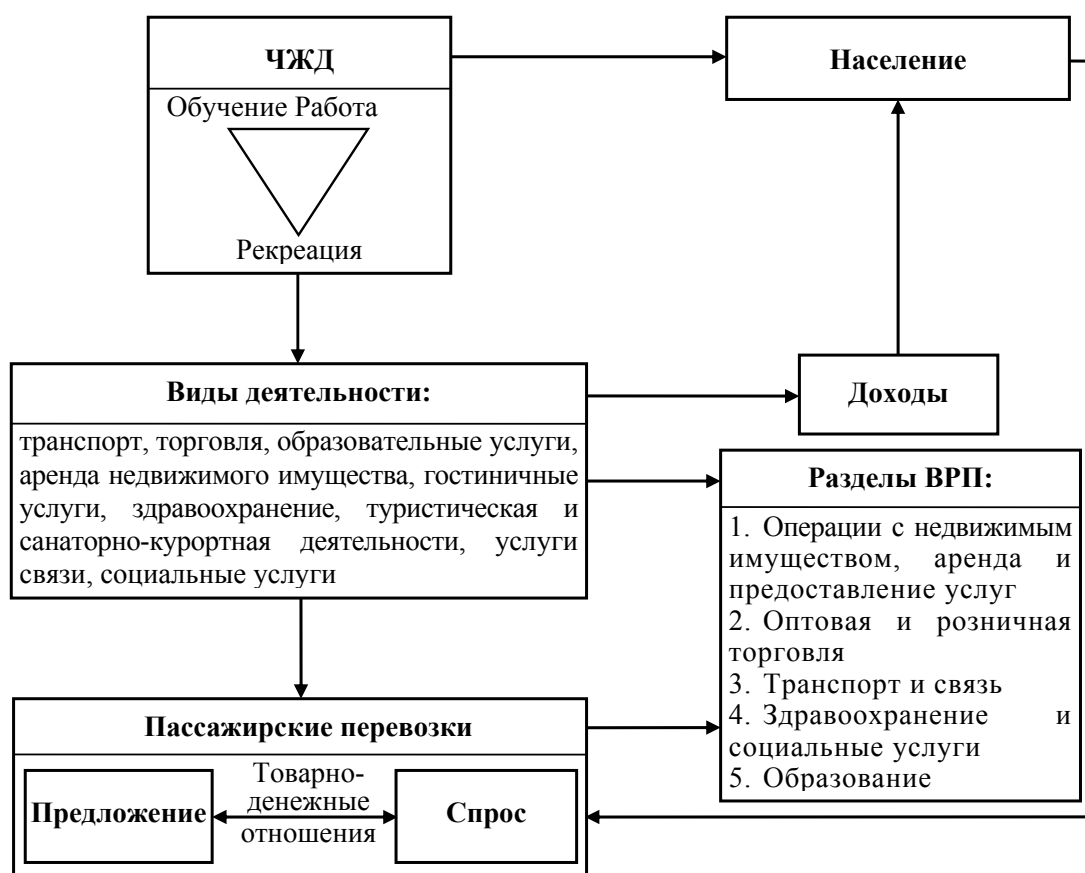


Рис. 1. Причинно-следственные связи между ЧЖД, пассажирскими перевозками и ВРП

Для дальнейшего анализа рассмотрим только региональные и межрегиональные пассажиропотоки [10], которые могут быть привлечены на ВСМ за счет ее конкурентных преимуществ. В данном случае следует учесть, что регулярное пассажирское железнодорожное сообщение со скоростями движения выше 250 км/ч может эффективно конкурировать с автомобильным и авиационным транспортом на направлениях с высоким пассажиропотоком при расстояниях от 200 до 800 км (максимальная конкурентоспособность может быть обеспечена на расстоянии 400–500 км) [2, 10–12].

Практически во всех регионах России для региональных и межрегиональных пассажирских перевозок наблюдается следующая внутригодовая динамика пассажиропотока [2, 10]. Мини-

мальная активность отмечается в феврале, с марта по июнь происходит плавный рост объемов пассажирских перевозок, в июле и августе наблюдаются их максимальные значения, и с сентября по февраль идет постепенное снижение пассажиропотока до минимального уровня. Такая динамика в большей степени объясняется, во-первых, сезонностью, которая определяет наиболее благоприятные периоды времени для рекреации (период массовых отпусков), во-вторых, завершением (июнь) и началом (сентябрь) учебного года в образовательных учреждениях. И здесь следует отметить, что основным фактором, от которого зависит минимальный уровень пассажиропотока, является деловая активность населения.

К видам региональной деятельности, от которых зависят объемы перевозок пассажиров и которые

Коэффициенты корреляции между разделами ВРП и размерами пассажиропотока на направлении Москва — Казань

Пассажиропоток, млн чел. в год	Разделы ВРП				
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Y_1 — железнодорожного транспорта	0,202	0,726	0,565	0,824	0,819
Y_2 — авиационного транспорта	-0,208	0,822	0,946	0,753	0,837
Y_3 — суммарный пассажиропоток	-0,005	0,868	0,849	0,884	0,929

определяют деловую активность населения, относятся [13]: транспортные услуги, торговля, аренда недвижимого имущества, гостиничные услуги, здравоохранение, туристическая и санаторно-курортная деятельности, услуги связи. Они же вместе со сферой социальных услуг обеспечивают рекреацию. В обучении же в основном востребованы образовательные услуги, транспорт, связь, аренда недвижимого имущества, гостиничные услуги.

Исходя из приведенного анализа, в структуре ВРП были выделены следующие разделы:

1. Операции с недвижимым имуществом, аренда и предоставление услуг.
2. Оптовая и розничная торговля; ремонт автотранспортных средств, мотоциклов, бытовых изделий и предметов личного пользования.
3. Транспорт и связь.
4. Здравоохранение и предоставление социальных услуг.
5. Образование.

Зависимости между данными разделами ВРП и объемами пассажирских перевозок железнодорожного и авиационного транспорта были исследованы на направлениях проектируемых высокоскоростных железнодорожных магистралей Москва — Санкт-Петербург и Москва — Казань [7, 8]. Учитывая достоинства и недостатки методов прогнозирования [7], количество и качество статистических данных, для исследования был применен метод корреляционно-регрессионного анализа в связи с простотой его вычислительных алгоритмов и наглядным представлением результатов.

Полученные для направления Москва — Санкт-Петербург значения коэффициентов кор-

реляции показали по используемым шкалам их оценки [14–16] сильную корреляционную связь между рассматриваемыми разделами ВРП и размерами суммарного пассажиропотока и пассажиропотоков, выделенных отдельно по железнодорожному и авиационному транспорту.

Значения коэффициентов корреляции (таблица), рассчитанные для направления Москва — Казань, показали:

- 1) очень слабую корреляционную связь между статистическими данными раздела ВРП X_1 — «Операции с недвижимым имуществом, аренда и предоставление услуг» и перевозками пассажиров;
- 2) сильную корреляционную связь между данными разделов ВРП X_2 , X_3 , X_4 и X_5 и размерами пассажиропотоков, кроме пары — раздел X_3 и пассажиропоток железнодорожного транспорта, где оценка связи средняя (0,565).

Кроме этого, коэффициенты корреляции для пассажиропотоков по железнодорожному транспорту оказались меньше значений коэффициентов, рассчитанных для суммарного пассажиропотока, а также для пассажиропотока по авиационному транспорту, кроме раздела ВРП X_4 . Такой результат, на наш взгляд, можно объяснить недостаточной конкурентоспособностью железнодорожных пассажирских перевозок на данном направлении в сравнении с направлением Москва — Санкт-Петербург, где высокоскоростные поезда «Сапсан» успешно конкурируют с авиационным транспортом [17] по стоимости, скорости доставки и комфорту.

Анализ стоимости железнодорожных и авиационных пассажирских перевозок и времени в пути

между Москвой и Казанью, выполненный авто-рами в [7], данное предположение подтвердил.

В современных рыночных условиях роль конкуренции в распределении пассажиропотока по видам транспорта значительно возросла. Исследования, выполненные в [10], показали, что на объем железнодорожных пассажирских перевозок существенное влияние оказывают конкурентные предложения авиационного и автомобильного транспорта. Авиационные перевозки имеют значительное преимущество в скорости на расстояниях от 800 км, а до 600 км стоимость проезда междугородным автобусом ниже цен на железнодорожные билеты.

Чтобы обеспечить конкурентоспособность железнодорожных пассажирских перевозок, они должны по потребительским характеристикам превосходить услуги авиационного и автомобильного транспорта. Когда пассажиру — потребителю транспортной услуги предлагаются варианты перемещения в пространстве, то он сравнивает их основные параметры (время в пути, комфортность и стоимость) и ищет компромисс, который заключается в следующем: чем быстрее и комфортнее, тем больше цена перевозки (транспортный тариф).

Тариф на перевозку для обеспечения конкурентоспособности перевозчика на рынке транспортных услуг устанавливается исходя из соотношения спроса и предложения на пассажирские перевозки с учетом цен конкурентов, при условии, что будет обеспечена его операционная эффективность. Общие затраты времени на перевозку, комфортность транспортного обслуживания в пунктах отправления, прибытия и в пути следования, удобное расписание отправления и прибытия, безопасность перемещения определяют качество транспортной услуги [18].

Общие затраты времени пассажира при междугородных автобусных, железнодорожных и авиационных перевозках делятся на время пере-

мещения до и от пункта отправления (вокзала или аэропорта) T_1 , время на ожидание отправления транспортного средства T_2 и время нахождения пассажира в автобусе, поезде или самолете T_3 . Пассажиры в основном предпочитают соотношение $T_2 \ll T_1 \ll T_3$, которое необходимо учитывать при повышении качества транспортной услуги.

Кроме этого, время как ресурс для большинства пассажиров оказывается существеннее дополнительной платы за высокую скорость и платежеспособный потребитель транспортных услуг готов платить больше за скорость перевозки.

Подводя итог нашим рассуждениям о конкуренции на рынке пассажирских перевозок, отметим, что цена и качество транспортной услуги оказывают решающее влияние на конкурентоспособность перевозчика [18], которая, в свою очередь, является очень значимым фактором, определяющим распределение пассажиропотоков между перевозчиками [19].

Для высокоскоростных железнодорожных пассажирских перевозок сокращение общих затрат времени пассажира на перевозку и повышение качества транспортной услуги должно сочетаться с разумной ценовой политикой, обеспечивающей конкурентоспособность и операционную эффективность перевозчика.

Методики прогнозирования пассажиропотоков для ВСМ

В настоящее время при решении задач прогнозирования пассажиропотоков широкое применение получили методы анализа временных рядов, машинного обучения, регрессионные, гравитационные и энтропийные модели [19–21].

К методам анализа временных рядов относятся корреляционный и спектральный анализ, методы сглаживания и фильтрации, модели авто-регрессии и скользящего среднего, модель Грея [19–21]. Они используются для математического

описания временных рядов данных и вычисления их прогнозных значений [22].

Методы машинного обучения применяются для прогностического моделирования функции преобразования входных переменных в целевую переменную, т. е. получения такой целевой функции $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, которая предсказывает выходные значения Y для входных значений X .

С помощью регрессионных моделей получают математические зависимости целевого показателя от влияющих на него факторов. Гравитационные и энтропийные модели применяют для распределения пассажиропотоков по маршрутам в виде матрицы транспортных корреспонденций.

В методиках прогнозирования пассажиропотоков на долгосрочную перспективу, как правило, используются несколько методов [19]. В обобщенном виде данные методики могут быть представлены тремя основными этапами:

1. Сбор, анализ и подготовка исходных данных (ретроспективные данные о размерах пассажирских перевозок, социально-экономических и демографических параметрах пунктов зарождения и погашения пассажиропотоков).

2. Прогноз общего пассажиропотока.

3. Распределение общего пассажиропотока по видам транспорта и маршрутам.

При обосновании новых видов и маршрутов пассажирских сообщений или изменения параметров существующих в отдельные этапы выделяют:

- прогнозирование переключений пассажиропотока между сообщениями;

- прогнозирование индуцированного спроса на пассажирские перевозки, вызванного новыми транспортными возможностями.

На данных этапах может быть применен метод баланса обобщенных транспортных издержек. В SNCF (Национальная компания французских железных дорог) с помощью данного метода прогнозируют переключения на вновь вводимые в эксплуатацию высокоскоростные магистрали [23].

В обобщенных транспортных издержках учитываются стоимости и время основной и вспомогательных поездок, а также стоимость времени пассажиров, для определения которой используются данные о доходах платежеспособной категории населения [19]. На новую ВСМ переключаются пассажиры, для которых она будет наиболее выгодным видом транспорта по критерию обобщенных издержек.

В методике прогнозирования пассажиропотоков, предложенной в [19], метод баланса обобщенных транспортных издержек используется для прогноза индуцированного спроса.

В [24] для прогноза переключения пассажиропотоков на скоростные поезда была применена модель дискретного выбора. Данная модель определяет долю переключаемых пассажиров в процессе ее обучения по ретроспективным изменениям пассажиропотока и параметров сообщения (времени в пути, стоимости проезда, частоте сообщения и комфортности) [19].

Обобщая результаты анализа научных работ и проведенных исследований [7, 8], рассмотрим два варианта методики прогнозирования пассажиропотоков для высокоскоростных магистралей с учетом конкуренции на рынке пассажирских перевозок.

Первый вариант методики представлен в виде блок-схемы на рис. 2. Его отличие от применяемых методик прогнозирования пассажиропотоков заключается в следующем:

- 1) в математической модели общего пассажиропотока $N_{п.пасс}$ вместо всего ВРП учитываются только те разделы, которые оказывают влияние на размеры пассажирских перевозок [7, 8];

- 2) индуцированный спрос определяется в зависимости от параметров конкурентоспособности ВСМ для уточнения прогноза общего пассажиропотока, который затем распределяется по видам и маршрутам пассажирских сообщений с учетом общих затрат пассажиров на перевозку и качества транспортных услуг.

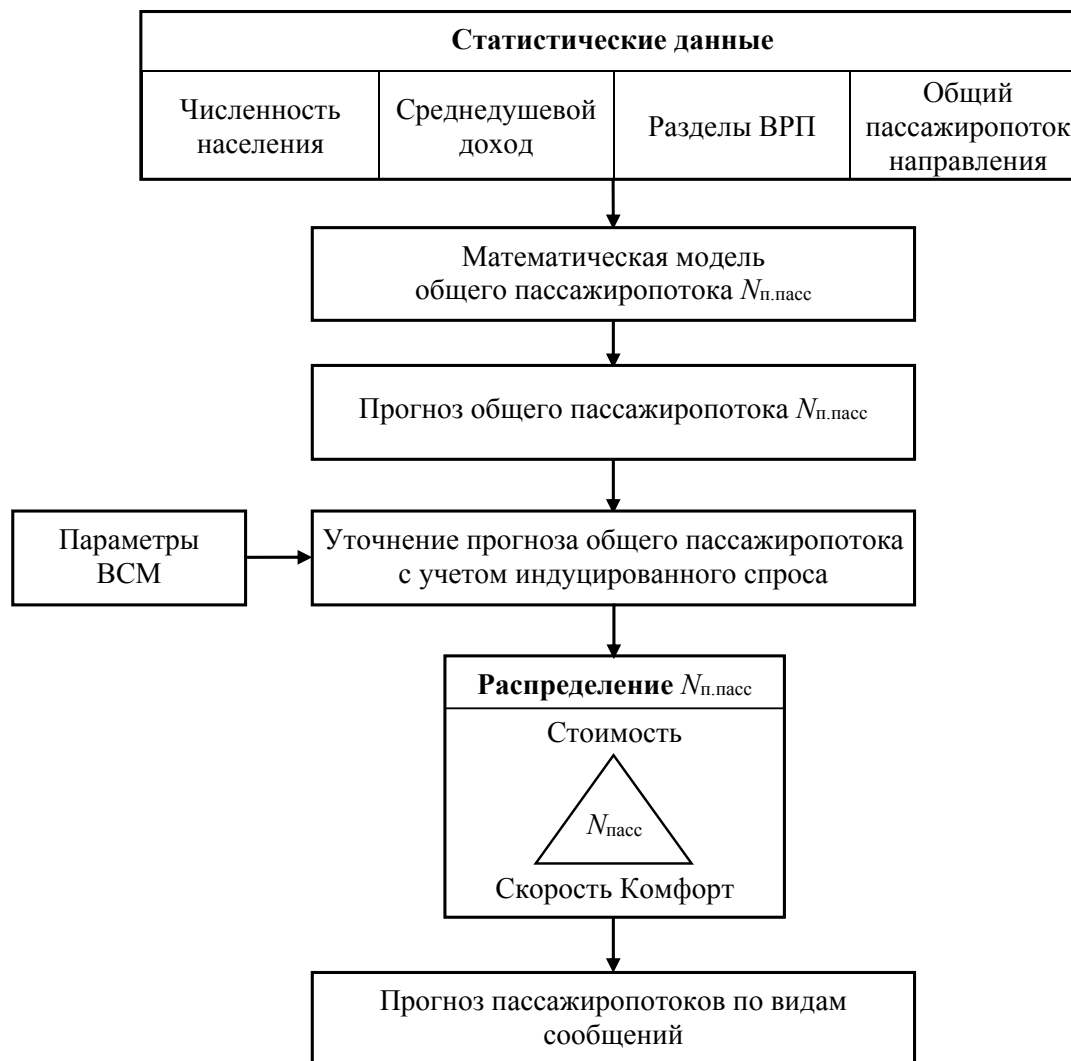


Рис. 2. Блок-схема методики прогнозирования пассажиропотоков с учетом индуцированного спроса

Во втором варианте методики (рис. 3) математическую зависимость общего пассажиропотока $N_{п.пасс}$ предлагается определять от трех основных факторов (численность населения, среднедушевой доход, разделы ВРП), а также следующих параметров пассажирских сообщений:

- суммарной провозной способности пассажирских сообщений — максимального возможного количества пассажиров в год, которое может быть пропущено по всем сообщениям;
- средневзвешенной скорости пассажира по всем сообщениям;

– средневзвешенных общих затрат пассажиров на перевозку между пунктами зарождения и погашения пассажиропотоков.

При расчетах средневзвешенной скорости и средневзвешенных общих затрат пассажира маршруты делятся на три участка:

- 1) от места отбытия пассажира до пункта отправления основного транспортного средства (поезд, самолет или междугородний автобус);
- 2) между пунктами отправления и прибытия основного транспортного средства (вокзалы,



Рис. 3. Блок-схема методики прогнозирования пассажиропотоков с учетом параметров пассажирских сообщений

аэропорты или транспортно-пересадочные узлы (ТПУ));

3) от пункта прибытия (вокзала, аэропорты или ТПУ) до конечного места прибытия пассажира.

По данным участкам определяются стоимость и время поездок пассажиров, которые используются для расчета по каждому маршруту средней скорости и общих затрат пассажира.

Во втором варианте методики математическая модель общего пассажиропотока $N_{п.пасс}$ позволит учесть соотношение спроса и предложения на транспортные услуги, включая индуцированный спрос на пассажирские перевозки.

Следует отметить, что под спросом на транспорте понимается платежеспособная потреб-

ность в транспортных услугах, а предложение транспорта характеризуется его производительной силой (провозной и пропускной способностью) [18].

Заключение

В современных условиях из-за возросшей конкуренции на рынке пассажирских перевозок, а также динамичности и неопределенности спроса населения на транспортные услуги, который обусловлен платежеспособностью пассажира и его выбором способа перемещения в зависимости от времени в пути, стоимости и комфортности перевозки, возросла сложность прогнозирования пассажиропотоков. Разработка методики прогнозирования пассажиропотоков для высокоско-

ростных магистралей с учетом конкуренции на рынке пассажирских перевозок требует дальнейших исследований. Авторами предлагаются два варианта методики, которые позволят учесть особенности развития регионов Российской Федерации и конкуренцию между разными видами пассажирского транспорта и получить надежную оценку перспективных объемов пассажирских перевозок, что обеспечит снижение рисков инвестирования в строительство и эксплуатацию капиталоемких высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Первый вариант представляет собой модернизацию применяемых методик прогнозирования пассажиропотоков, второй — новую экспериментальную методику, для разработки которой еще требуется исследовать математические зависимости общего пассажиропотока от параметров пассажирских сообщений, демографических и социально-экономических факторов, определяющих соотношение спроса и предложения на транспортные услуги в условиях конкуренции на рынке пассажирских перевозок.

Библиографический список

1. Высокоскоростные магистрали // Эксперт. — 2019. — № 23(1122). — С. 32–57.
2. Мартыненко А. В. Влияние особенностей размещения населения на развитие ВСМ в Европе / А. В. Мартыненко, М. Б. Петров // Мир транспорта. — 2018. — № 1(74). — С. 118–135. — ISSN 1992-3252.
3. High speed lines in the world (Summary) // International Union of Railways. — URL: https://uic.org/IMG/pdf/20210601_high_speed_lines_in_the_world.pdf (дата обращения: 27.09.2021).
4. Мартыненко А. В. Макроанализ развития высокоскоростного транспорта в странах Западной Европы и Восточной Азии / А. В. Мартыненко, М. Б. Петров // Транспорт Урала. — 2018. — № 4(59). — С. 13–18. — ISSN 1815-9400.
5. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г.: Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р.
6. Интегрированная транспортная система / Центр экономики инфраструктуры. — М., 2018. — 278 с.
7. Арсенова А. С. О влиянии структуры валового регионального продукта на величину пассажиропотока / А. С. Арсенова, В. А. Анисимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2019. — Т. 63. — № 3. — С. 98–106. — DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).98-106.
8. Григорьева А. С. О проблемах математического моделирования прогнозирования пассажиропотоков для высокоскоростных магистралей / А. С. Григорьева, В. А. Анисимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2020. — № 4(68). — С. 230–239. — DOI: 10.26731/1813-9108.2020.4(68).230-239.
9. Райзберг Б. А. Современный экономический словарь / Б. А. Райзберг, Л. Ш. Лозовский, Е. Б. Стародубцева. — 2-е изд., испр. — М.: ИНФРА-М, 1999. — 479 с.
10. Муктепавел С. В. Экономическое обоснование способов освоения железнодорожных пассажирских перевозок в регионах: дис. ... канд. техн. наук / С. В. Муктепавел. — М., 2018. — 212 с.
11. Поликарпов А. А. О конкуренции железнодорожного транспорта с авиацией и автобусами / А. А. Поликарпов // Экономика железных дорог. — М.: Прометей, 2015. — № 9. — С. 15–17.
12. Шульман Д. О. Обоснование этапности формирования перспективной сети ВСМ: дисс. канд. техн. наук / Д. О. Шульман. — СПб., 2015. — 147 с.
13. Широкова Д. А. Оценка деловой активности в регионе / Д. А. Широкова, М. Н. Лисогор, Н. Ю. Лукьянова // Вопросы экономики и управления. — 2016. — № 3.1(5.1). — С. 49–52.
14. Баврина А. П. Современные правила применения корреляционного анализа / А. П. Баврина, И. Б. Борисов // Медицинский альманах. — 2021. — № 3(68). — С. 70–79.

15. Унгурияну Т. Н. Корреляционный анализ с использованием пакета статистических программ STATA / Т. Н. Унгурияну, А. М. Гржибовский // Экология человека. — 2014. — № 9. — С. 60–64.
16. Котеров А. Н. Сила связи. Сообщение 2. Градации величины корреляции / А. Н. Котеров, Л. Н. Ушенкова, Э. С. Зубенкова и др. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. — 2019. — Т. 64. — № 6. — С. 12–24.
17. Бушуев Н. С. Анализ динамики пассажиропотока поездов «Сапсан» и авиационного транспорта на линии «Москва — Санкт-Петербург» до 2025 г. / Н. С. Бушуев, Д. О. Шульман, К. М. Сагайдак // Бюллетень результатов научных исследований. — 2019. — № 1. — С. 5–14.
18. Управление маркетинговой деятельностью на транспорте: монография / Под ред. В. Г. Галабурды и Ю. И. Соколова. — М.: РУТ (МИИТ), 2018. — 300 с.
19. Макуцкий Н. А. Сравнение методик прогнозирования междугородних пассажиропотоков на различных видах транспорта / Н. А. Макуцкий, М. С. Фадеев, П. А. Чистяков // Мир транспорта. — 2020. — № 18(1). — С. 74–92. — DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-74-92.
20. Butyrkin A. Y. Models for predicting passenger traffic in rail and air transport / A. Y. Butyrkin et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 918. — № 1. — P. 012057.
21. Тарникова Е. Актуальные методы прогнозирования пассажиропотоков / Е. Тарникова // Развитие транспортных систем. — URL: <https://irts.su/2022/02/16/current-forecasting-methods/> (дата обращения: 11.08.2022).
22. Дегтярева Н. А. Модели анализа и прогнозирования на основе временных рядов: монография / Н. А. Дегтярева. — Челябинск: Изд-во ЗАО «Библиотека А. Миллера», 2018. — 160 с.
23. Бонсалл П. У. Моделирование пассажиропотоков в транспортной системе / П. У. Бонсалл, А. Ф. Чемперноун, А. К. Мейсон и др.; пер. с англ. Е. М. Шлафштейна. — М.: Транспорт, 1982. — 207 с.
24. Янков К. В. Опыт прогнозирования пассажиропотоков и социально-экономических эффектов при ускорении железнодорожного сообщения в Самаро-Тольяттинской агломерации / К. В. Янков, П. А. Лавриненко, М. С. Фадеев // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. — 2016. — № 1. — С. 622–647.

Дата поступления: 04.08.2022

Решение о публикации: 29.08.2022

Контактная информация:

АНИСИМОВ Владимир Александрович — д-р техн. наук, доц.; anisvl@mail.ru

ГРИГОРЬЕВА Александра Сергеевна — аспирант; alexandra.arsyonova@yandex.ru

On Passenger Traffic Forecasting for High-Speed Highways Given Competition in Passenger Transportation Market

V. A. Anisimov, A. S. Grigorieva

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

For citation: Anisimov V. A., Grigorieva A. S. On Passenger Traffic Forecasting for High-Speed Highways Given Competition in the Passenger Transportation Market // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 576–589. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-576-589

Summary

Purpose: The study of the problem of passenger traffic forecasting for high-speed railways given peculiarities of regional development and competition in passenger transportation market in Russian Federation conditions. The influence of a large number of different factors on passenger traffic volume formation is the main reason for the difficulty of obtaining reliable forecasts of passenger traffic in the long term. Based on the analysis of Russian and foreign scientific papers, devoted to the problem under study, the most significant factors were identified from ones' variety: population, per capita income, gross domestic and regional products. The analysis showed that scientists ambiguously assess the impact of gross regional product on passenger traffic volume. The authors investigated the relationship between the volumes of passenger traffic and gross regional product on directions of being projected high-speed railways Moscow - St. Petersburg and Moscow — Kazan. As a result, the sections of gross regional product with the greatest degree of influence on passenger traffic were identified. Also, in modern conditions, concurrence in passenger transportation market has significantly increased which mainly determines the distribution of passenger traffic by transport kinds. **Methods:** System analysis, correlation and regression analysis, time series analysis. **Results:** The obtained results showed that in market conditions, because of the dynamism and uncertainty of population's demand for transport services which is caused by a passenger's choice of traffic method depending on transportation travel time, cost and comfort; the complexity of forecasting passenger traffic has increased. Two variants of passenger traffic forecasting methodology for high-speed highways are proposed in view of competition in the passenger transportation market. **Practical significance:** The application of a mathematical model for forecasting passenger traffic, taking into account the peculiarities of Russian Federation regions development and the competition between different kinds of passenger transport, will allow to obtain a reliable estimate for promising passenger traffic volumes that will provide for the reduction of investment risks in the construction and operation of capital-intensive high-speed railways.

Keywords: Passenger transportation, forecasting, modeling, passenger traffic, gross regional product, competitiveness, cost, speed of delivery, comfort, induced demand, parameters of passenger communications.

References

1. Vysokoskorostnye magistrali [High-speed highways]. *Ekspert* [Expert]. 2019, I. 23 (1122), pp. 32–57. (In Russian)

2. Martynenko A. V., Petrov M. B. Vliyaniye osobennostey razmeshcheniya naseleniya na razvitiye VSM v Evrope [Influence of peculiarities of population distribution on the

development of high-speed lines in Europe]. *Mir transporta* [World of transport]. 2018, I. 1 (74), pp. 118–135. ISSN 1992-3252. (In Russian)

3. High speed lines in the world (Summary). International Union of Railways. Available at: https://uic.org/IMG/pdf/20210601_high_speed_lines_in_the_world.pdf (accessed: September 27, 2021).

4. Martynenko A. V., Petrov M. B. Makroanaliz razvitiya vysokoskorostnogo transporta v stranakh Zapadnoy Evropy i Vostochnoy Azii [Macroanalysis of the development of high-speed transport in the countries of Western Europe and East Asia]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. I. 4 (59), 2018, pp. 13–18. ISSN 1815-9400. (In Russian)
5. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda: Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 27 noyabrya 2021 g. № 3363-r* [Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast for the period up to 2035: Approved by the order of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 No. 3363-r.]. (In Russian)
6. Integrirovannaya transportnaya Sistema [Integrated Transport System]. *Tsentr ekonomiki infrastruktury* [Center for Infrastructure Economics]. Moscow, 2018. 278 p. (In Russian)
7. Arsenova A. S. O vliyaniy struktury valovogo regional'nogo produkta na velichinu passazhiropotoka [On the influence of the structure of the gross regional product on the value of passenger traffic]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling.]. 2019, vol. 63, I. 3, pp. 98–106. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).98–106. (In Russian)
8. Grigor'eva A. S. O problemakh matematicheskogo modelirovaniya prognozirovaniya passazhiropotokov dlya vysokoskorostnykh magistralei [On the problems of mathematical modeling of forecasting passenger traffic for high-speed highways]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling.]. 2020, I. 4 (68), pp. 230–239. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.4(68).230-239. (In Russian)
9. Rayzberg B. A., Lozovskiy L. Sh., Starodubtseva E. B. *Sovremennyy ekonomicheskyy slovar'* [Modern economic dictionary]. Moscow: INFRA-M Publ., 1999. 479 p. (In Russian)
10. Muktepavel S. V. *Ekonomicheskoe obosnovanie sposobov osvoeniya zheleznodorozhnykh passazhirskikh perevozok v regionakh. Kand. Diss* [Economic substantiation of methods for developing railway passenger transportation in the regions. Cand. Diss]. Moscow, 2018. 212 p. (In Russian)
11. Polikarpov A. A. O konkurentsii zheleznodorozhnogo transporta s aviatsiyey i avtobusami [On the competition of railway transport with aviation and buses]. *Ekonomika zheleznikh dorog* [Economics of Railways]. Moscow: Prometey Publ., 2015, pp. 15–17. (In Russian)
12. Shul'man D. O. *Obosnovanie etapnosti formirovaniya perspektivnoy seti VSM. Kand. Diss* [Justification of the stages of formation of a promising high-speed network. Cand. Diss]. Sankt-Peterburg, 2015. 147 p. (In Russian)
13. Shirokova D. A. Otsenka delovoy aktivnosti v regione [Evaluation of business activity in the region]. *Voprosy ekonomiki i upravleniya* [Issues of economics and management]. 2016, I. 3.1 (5.1), pp. 49–52. (In Russian)
14. Bavrina A. P. Sovremennye pravila primeneniya korrelyatsionnogo analiza [Modern rules for the application of correlation analysis]. *Medsinskiy al'manakh* [Medical Almanac]. 2021, I. 3(68), pp. 70–79. (In Russian)
15. Unguryanu T. N., Grzhibovskiy A. M. Korrelyatsionnyy analiz s ispol'zovaniem paketa statisticheskikh programm STATA [Correlation analysis using the STATA statistical software package]. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2014, I. 9, pp. 60–64. (In Russian)
16. Koterov A. N. Sila svyazi. Soobshchenie 2. Gradatsii velichiny [The strength of connection. Message 2. Gradations of the correlation value]. *Medsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'* [Medical radiology and radiation safety]. 2019, Vol. 64, I. 6, pp. 12–24. (In Russian)
17. Bushuev N. S. Analiz dinamiki passazhiropotoka poezdov "Sapsan" i aviatsionnogo transporta na linii "Moskva – Sankt-Peterburg" do 2025 g [Analysis of the dynamics of the passenger traffic of trains "Sapsan" and air transport on the line "Moscow – St. Petersburg" until 2025]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2019, I. 1, pp. 5–14. (In Russian)
18. *Upravlenie marketingovoy deyatel'nost'yu na transporte* [Management of marketing activities in transport]. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2018. 300 p. (In Russian)
19. Makutskiy N. A. Sravnenie metodik prognozirovaniya mezhdugorodnykh passazhiropotokov na razlichnykh vidakh

transporta [Comparison of methods for forecasting long-distance passenger traffic on various modes of transport]. *Mir transporta* [The world of transport]. 2020, I. 18(1), pp. 74–92. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-74-92>. (In Russian)

20. Butyrkin A. Y. et al. Models for predicting passenger traffic in rail and air transport. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2020, vol. 918, I. 1, pp. 012–057.

21. Tarnikova E. Aktual'nye metody prognozirovaniya passazhiropotokov [Actual methods of forecasting passenger traffic]. *Institut razvitiya transportnykh sistem* [Institute for the Development of Transport Systems]. Available at: <https://irts.su/2022/02/16/current-forecasting-methods/> (accessed 11 August 2022). (In Russian)

22. Degtyareva N. A. *Modeli analiza i prognozirovaniya na osnove vremennykh ryadov* [Models of analysis and forecasting based on time series]. Chelyabinsk: Biblioteka A. Millera Publ., 2018. 160 p. (In Russian)

23. Bonsall P. U., Chempourn A. F., Meyson A. K. *Modelirovanie passazhiropotokov v transportnoy sisteme*

[Modeling of passenger traffic in the transport system]. Moscow: Transport Publ., 1982. 207 p. (In Russian)

24. Yankov K. V., Lavrinenko P. A., Fadeev M. S. Opyt prognozirovaniya passazhiropotokov i sotsial'no-ekonomicheskikh effektov pri uskorenii zheleznodorozhnogo soobshcheniya v Samaro-Tol'yattinskoy aglomeratsii [Experience in predicting passenger traffic and socio-economic effects in the acceleration of railway communication in the Samara-Togliatti agglomeration]. *Nauchnye trudy: Institut narodnokhozyaystvennogo prognozirovaniya RAN* [Scientific works: Institute of Economic Forecasting RAS.]. 2016, I. 1, pp. 622–647. (In Russian)

Received: August 04, 2022

Accepted: August 29, 2022

Author's information:

Vladimir A. ANISIMOV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; anisvl@mail.ru

Aleksandra S. GRIGORIEVA — Postgraduate Student; alexandra.arsyonova@yandex.ru

УДК 621.336.7

К вопросу снижения негативного эффекта воздействия аэроупругого взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами тоннельных сооружений

А. А. Воробьев, Я. С. Ватулин, А. С. Ватаев, Д. Д. Каримов, К. А. Сотников

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

Для цитирования: Воробьев А. А., Ватулин Я. С., Ватаев А. С., Каримов Д. Д., Сотников К. А. К вопросу снижения негативного эффекта воздействия аэроупругого взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами тоннельных сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 590–599. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-590-599

Аннотация

Цель: Разработка рекомендаций по повышению энергоэффективности и безопасности процесса грузовых и пассажирских перевозок на основе анализа процессов аэродинамического взаимодействия движущегося подвижного состава и искусственных сооружений тоннельного типа. Изучение воздействия воздушного потока на ЭПС и локомотивную бригаду с использованием программы Solid Works, модуль Flow Simulation. **Методы:** Исследование принципа формирования структуры воздушной среды в районе порталной части тоннельного сооружения стандартного типа и оборудованного средствами нивелирования колебания воздушного давления путем моделирования движения воздушных масс методом «заторможенного ротора». **Результаты:** Разработана конструкция порталной части тоннеля, и проведено численное исследование в среде Solid Works Flow Simulation. При входе и выходе из тоннеля можно несколько раз уменьшить скорость воздушного потока, воздействующего на ЭПС и тоннельные сооружения, а также стабилизировать давление воздушных масс и приблизить к нормальному атмосферное давление. **Практическая значимость:** Предлагаемая конструкция позволяет улучшить качество грузопассажирских перевозок, а именно снизить негативное давление и скорость воздушного потока, воздействующего на локомотивные бригады, пассажиров и тоннельные сооружения, а также уменьшить энергопотребления электроподвижного состава.

Ключевые слова: Аэродинамический эффект, искусственные сооружения тоннельного типа, лобовое воздушное сопротивление, конфузор, диффузор, метод конечных элементов, статическое давление, численное моделирование.

В настоящее время основные исследовательские усилия в области проектирования высокоскоростных транспортных средств направлены на преодоление аэродинамических эффектов,

влияющих на безопасность и показатели эксплуатационных энергозатрат.

Особенно значимо данные аэродинамические эффекты проявляются негативным образом

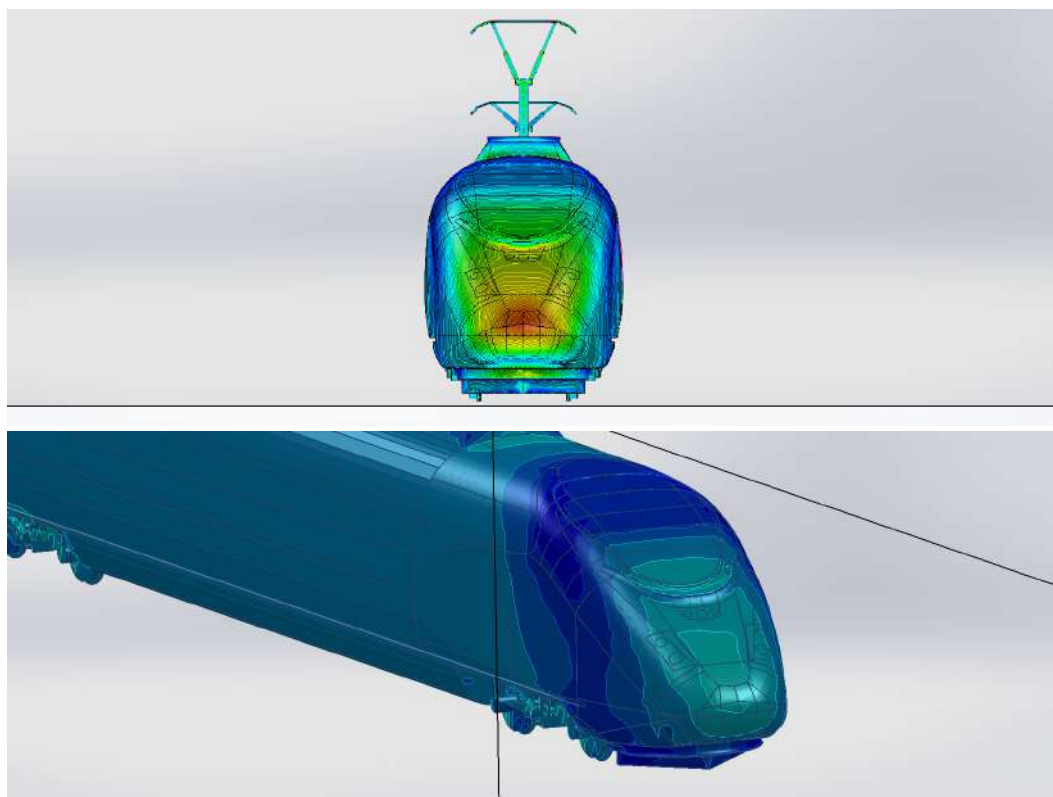


Рис. 1. Эпюры давления воздушной среды на поверхностях головной и хвостовой части модели состава объекта — профиль Siemens VelaroRUS «Сапсан»

при прохождении транспортным средством тоннельных сооружений, когда движущийся корпус подвижного состава образует с тоннелем последовательно расположенные области стесненного движения воздушных масс в виде диффузоров и конфузоров.

Максимальную амплитуду давления имеет знакопеременный импульс, образующийся в районе головного обтекателя поезда (рис. 1). Область разрежения, формирующаяся на хвостовом обтекателе состава, по амплитуде значительно меньше головного импульса, характеризуется высокой турбулентностью, с образованием струйно-отрывных течений воздушной среды.

Резкий перепад статического давления окружающей среды более чем на 1 мм рт. ст. за час вызывает ухудшение самочувствия человека, сонливость, снижение трудоспособности, вялость в конечностях. Крайне негативным для человека

считается перепад в 6,7 мм рт. ст. Увлечение движущимся поездом значительных объемов воздушных масс формируют также тоннельные волны и волны микродавления, образующиеся в результате сложных процессов под воздействием поршневого эффекта подвижного состава [1].

Существуют международные нормы [2–4], по которым максимальные перепады давления в тоннеле не должны превышать 10 кПа (так называемый критерий здоровья). Например, в Германии максимальный перепад давления не должен превышать 500 Па за 1 с, 800 Па за 3 с, 1000 Па за 10 с. Изменение давления определяется структурой воздушной среды, формирующейся в процессе аэроупругого взаимодействия высокоскоростного состава и сооружениями тоннеля.

Одним из способов исследования аэродинамических процессов является численное моделирование. Современные компьютерные программы,

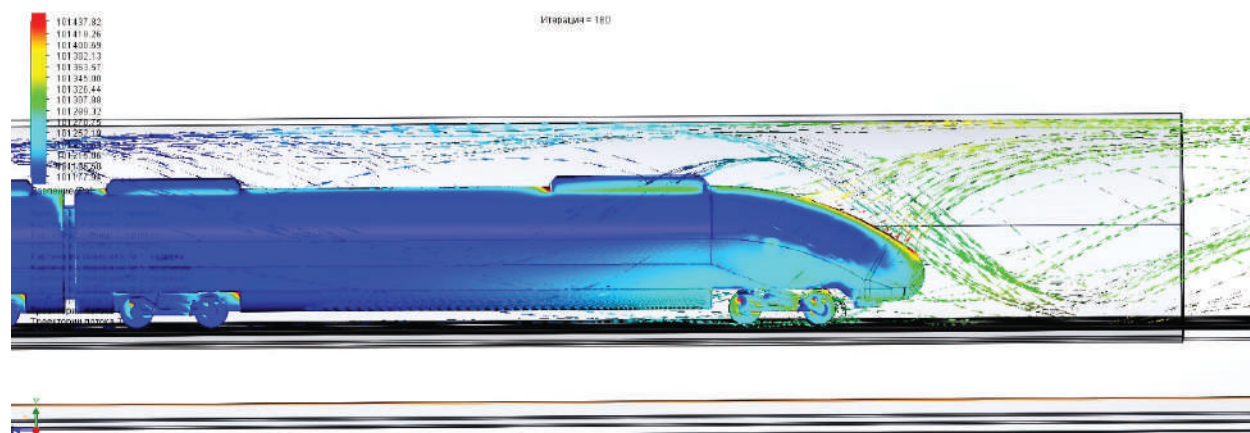


Рис. 2. Эпюра траекторий движения воздушных потоков с учетом поршневого действия поезда (при выходе)

использующие данный метод, позволяют решать широкий круг задач, связанных с взаимосвязанными стационарными и нестационарными тепловыми и аэродинамическими полями и процессами в тоннельных сооружениях при движении подвижного состава [5–9]. Данный способ оказывается более предпочтительным ввиду более низких затрат по сравнению с натурными экспериментами. Кроме того, численные эксперименты отличаются универсальностью, высоким быстродействием и возможностью выполнения исследований на стадии проектирования.

В качестве примера рассмотрим процесс выхода из тоннеля типовой конструкции [10, 11] ЭПС типа «Сапсан», движущегося со скоростью 200 км/ч (рис. 2), температура окружающей среды — 293 К, давление окружающей среды — 101 395 Па, число Рейнольдса — $0,49e + 5$.

Наибольший интерес представляет участок выхода из тоннеля: значение скорости текучей среды на этом участке практически постоянно и составляет 14–15 м/с, независимо от текущего местоположения поезда в тоннеле, что объясняется действием «поршневого» эффекта состава в ограниченном пространстве тоннеля [12].

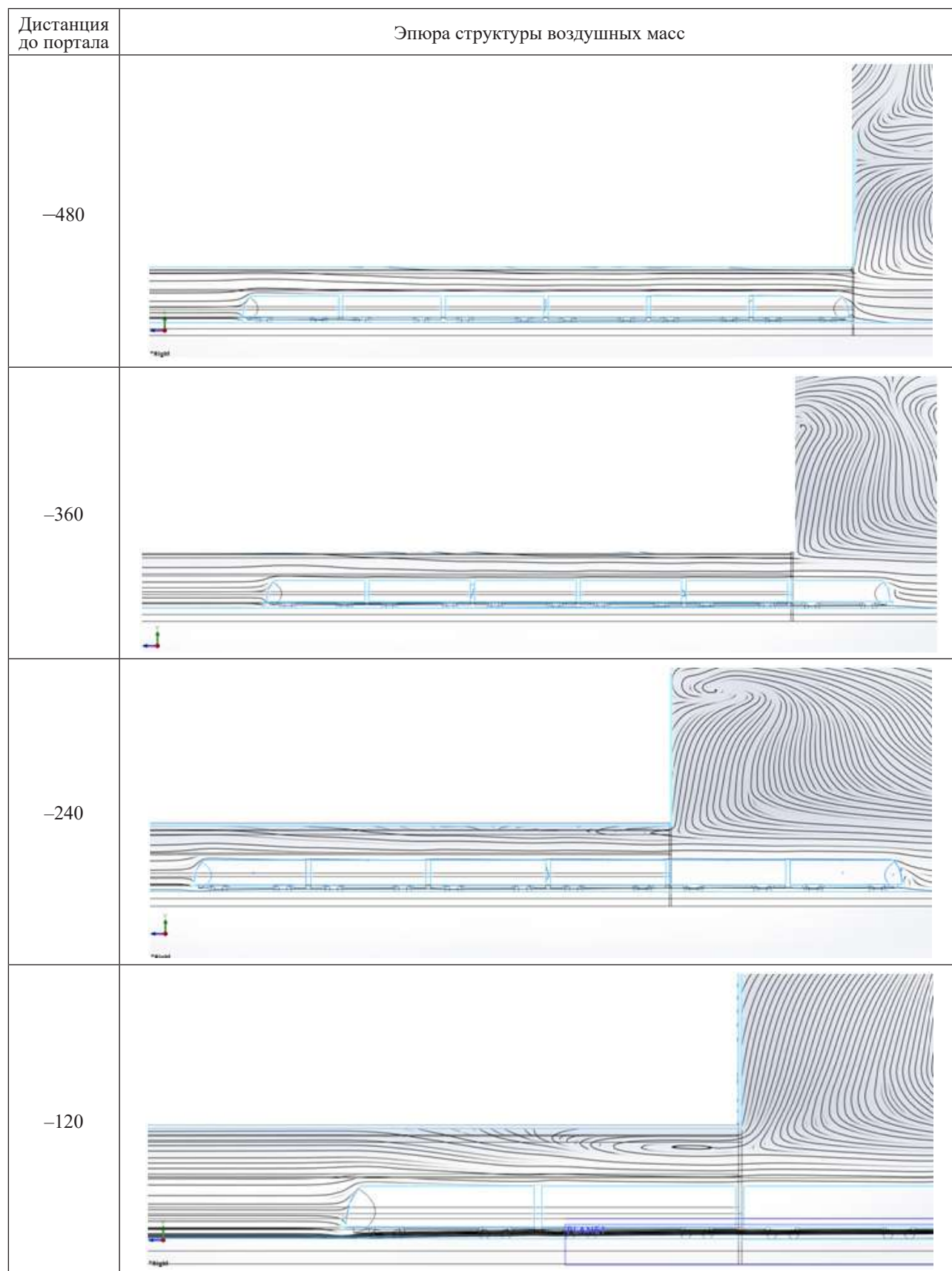
В среде модуля Flow Simulation программного продукта Solid Works проведен ряд исследова-

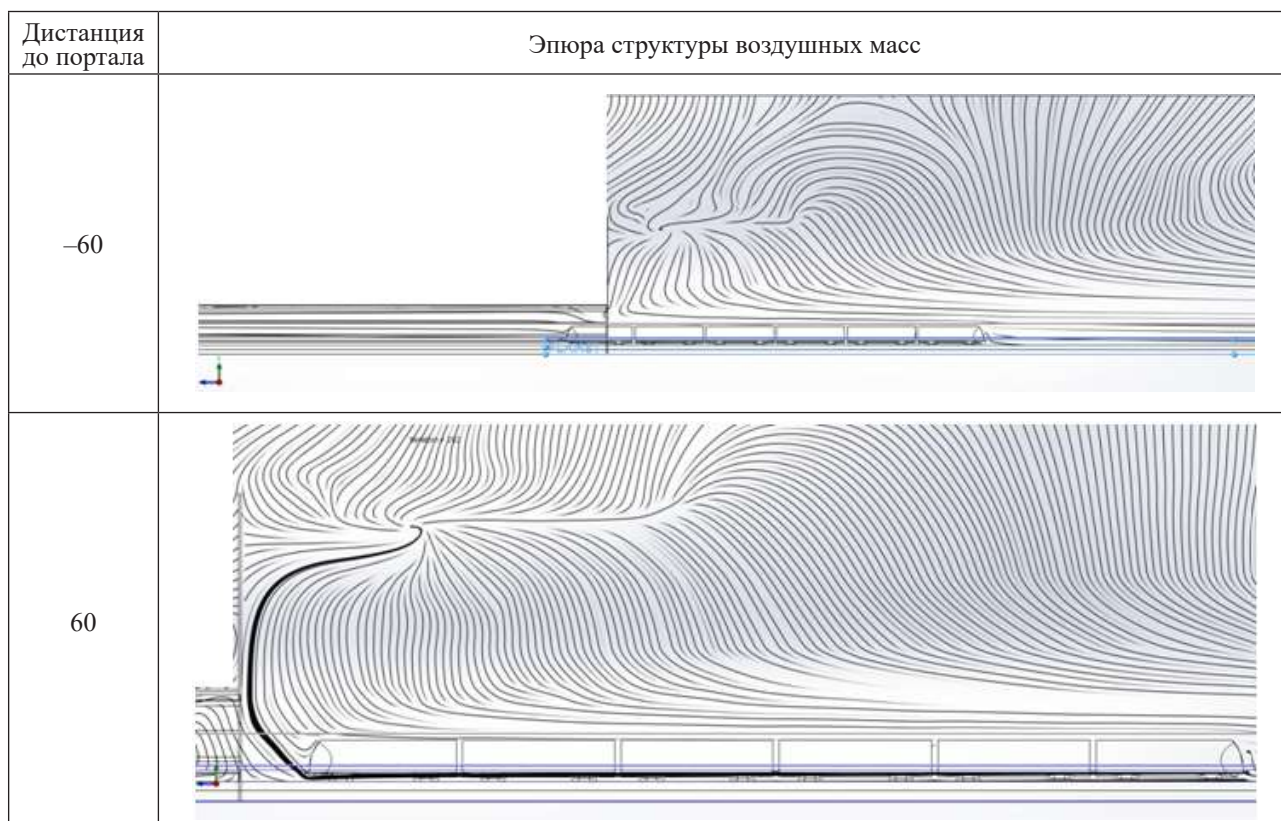
ний процесса входа и выхода из тоннеля высокоскоростного электропоезда. За прототип модели подвижного состава принят профиль Siemens VelaroRUS «Сапсан». На модели установлены граничные условия, имитирующие взаимодействие газа с движущимися поверхностями поезда и неподвижными стенками тоннеля. В качестве технологического подхода применен метод «заторможенного ротора» [13, 14], при котором рассматривается возмущенная структура окружающей текучей среды в состоянии «стопкадра» процесса движения состава по замкнутому кольцевому маршруту. С целью получения достаточной точности решения рассматривается модель тоннеля и подвижного состава в реальном масштабе, замеры определяются на уровне контактного провода.

Значительные изменения структуры текучей среды происходят на дистанции 240–120 м до порталной части тоннеля (таблица), что связано с явлением затекания (засасывания) объемов внешних воздушных масс в зону низкого давления полости тоннеля непосредственно за хвостовым вагоном состава.

При входе подвижного состава в тоннель наблюдается формирование поршневого эффекта, которое сопровождается появлением потоков

Эпюра структуры воздушных масс в зоне портала





воздуха, направленных навстречу подвижному составу, а также формирование локальных зон сжатия и расширения воздуха вблизи портальной части и потолка тоннеля в области тоннеля, занятой подвижным составом. При выходе из тоннеля со стороны хвостовой части подвижного состава образуется область разрежения и начинается интенсивное всасывание воздушных масс в портальной части тоннеля. Указанные явления имеют зависимость от скорости подвижного состава, коэффициента блокирования, соотношения длины части поезда, находящейся в тоннеле, к общей длине поезда. Данные процессы формируют вихреобразование воздушных масс, которое создает сопротивление тяговой силе подвижного состава.

С целью решения проблемы снижения негативного эффекта от вихреобразования воздушных масс и стабилизации давления при выходе ЭПС из тоннеля была разработана конструкция

портальной части, позволяющая сгладить пульсации давления (рис. 4). Увеличивая коэффициент блокировки, можно избежать возникновения вихреобразующих воздушных масс, облегчить всасывание воздуха в тоннеле, стабилизировать давление воздуха на выходе тоннеля, снизить скорость и температуру воздуха, а также уменьшить энергозатраты ЭПС.

С целью повышения эффективности процесса обработки результатов исследования была разработана схема формализации представления кривой колебания давления в районе головного и хвостового обтекателя ЭПС (рис. 5) [15, 16].

По результатам численного исследования (рис. 6, а) установлено, что для тоннельных сооружений, не оборудованных специальными конструктивными средствами для выравнивания колебаний давления воздушной среды, при скорости подвижного состава 200 км/ч, скорость сжатого воздуха достигает 18 м/с, а амплитуда

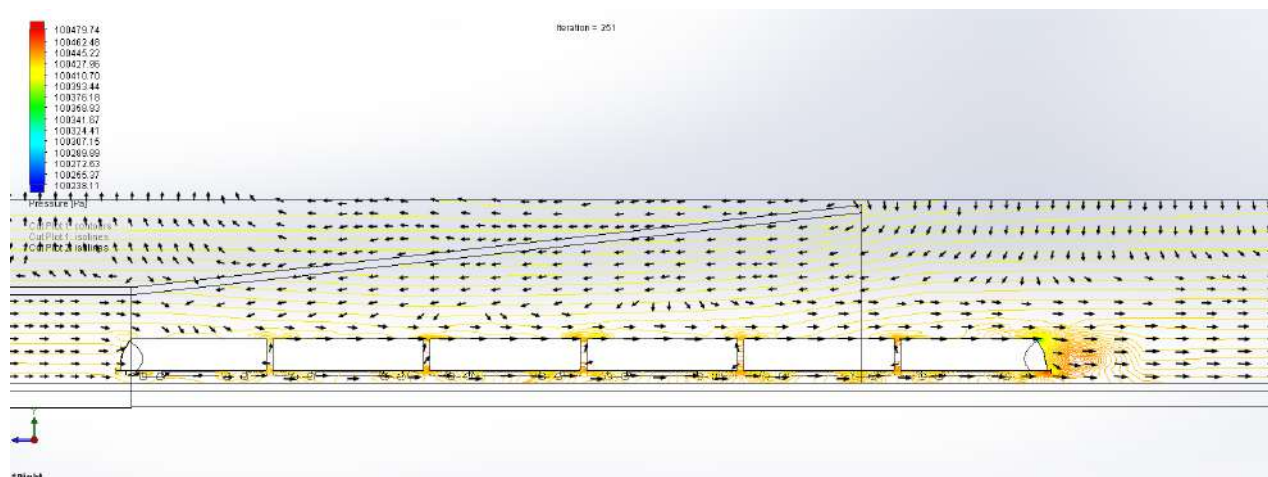


Рис. 4. Модель движения воздушных масс в процессе выхода электропоезда из тоннеля, оборудованного устройством стабилизации динамических характеристик движущихся воздушных масс

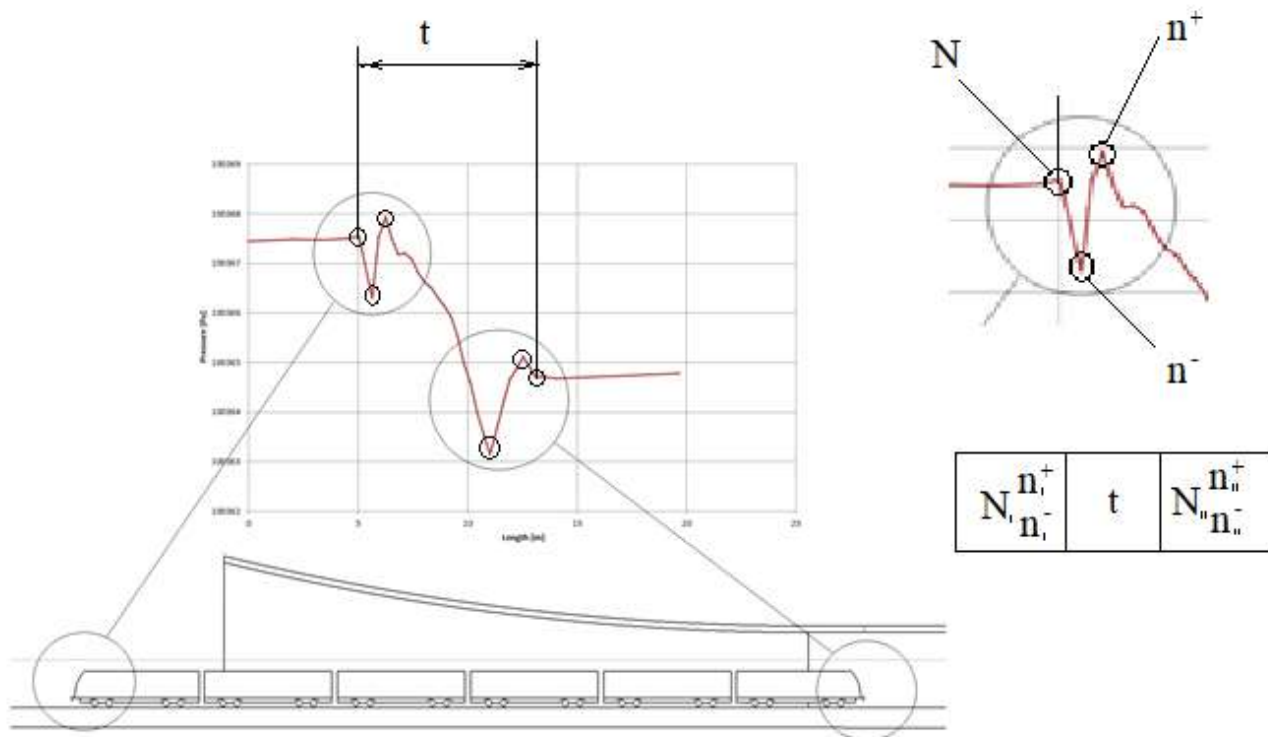


Рис. 5. Схема формализованного представления кривой колебания давления в области обтекателя головного и хвостового вагона ЭПС, при входе и выходе тоннеля

гармоники давления составляет 225 Па за период до 3 секунд.

Перепад давления при этом составляет более 2275 Па (относительно нормального

атмосферного), что превышает существующие международные нормы и негативно влияет на самочувствие локомотивной бригады и пассажиров.

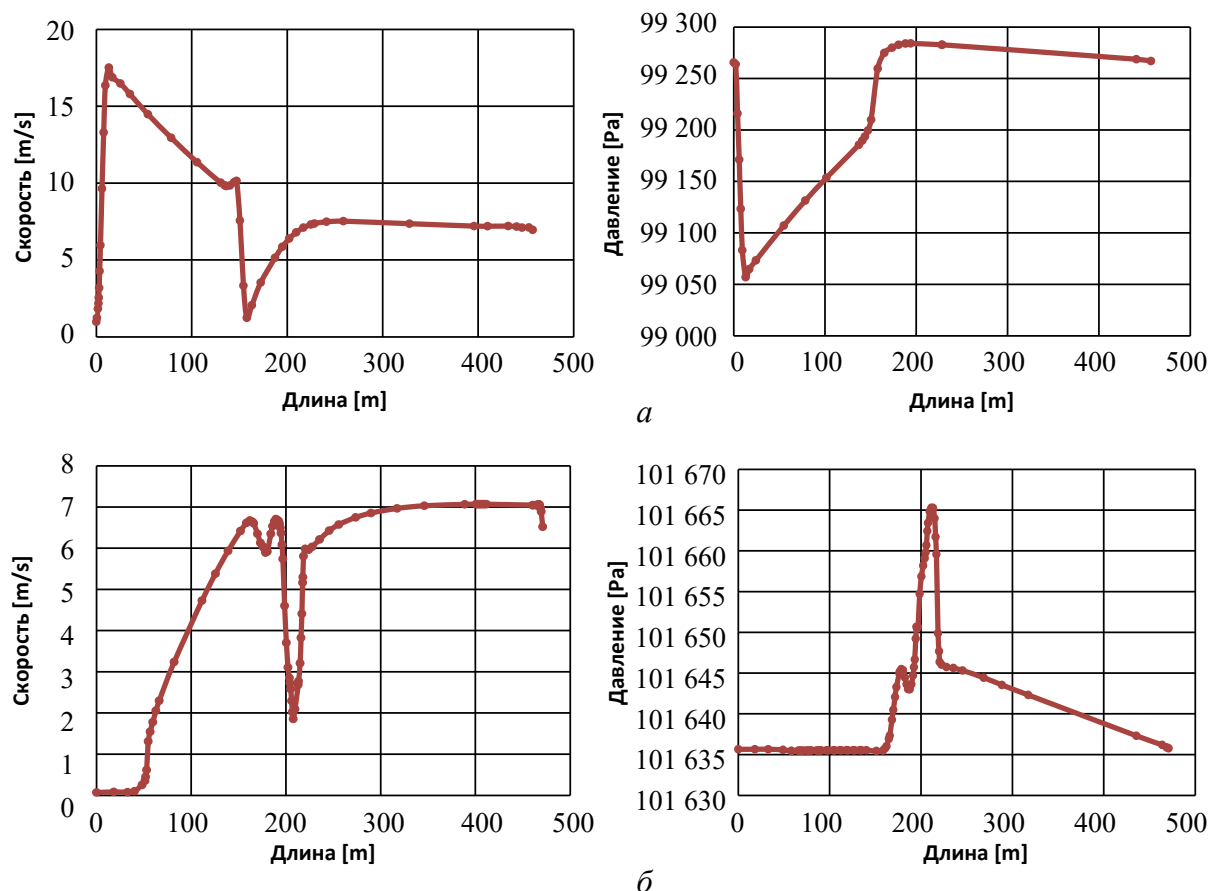


Рис. 6. Динамические характеристики движения воздушных масс в зоне порталного сооружения тоннеля:

а — не оборудованного специальными конструктивными средствами выравнивания колебаний давления воздушной среды; *б* — с использованием средств выравнивания колебаний давления

Использование средств выравнивания колебаний давления воздушной среды (рис. 6, *б*) позволяет примерно в 2 раза снизить амплитуду колебания скоростных характеристик воздушной среды в пространстве «ЭПС — тоннель», а также стабилизировать давление, приблизив его к атмосферному с показателями 30 Па за 2 секунды, что в 5 раз ниже показателя, полученного для тоннельных сооружений, не оборудованных специальными конструктивными средствами.

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

Библиографический список

1. Алферова Е. Л. Моделирование возмущений воздушного потока при движении поездов в двухпутном тоннеле метрополитена / Е. Л. Алферова, И. В. Лугин, Л. А. Кияница // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 6. — С. 5–14.
2. 779-11R. Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations.
3. СП 122.13330.2012. Тоннели железнодорожные и автодорожные.
4. Нормативные документы. Специальные технические условия. Свод правил. Сооружения искусственные высокоскоростных железнодорожных линий.
5. Джаббаров С. Т. Движение тонкого осесимметрического тела в полупространстве, занятом занятом сжи-

маемым газом / С. Т. Джаббаров // Проблемы механики. — 2016. — Вып. 1. — С. 12–17.

6. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorksSimulation / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 464 с.

7. CFD simulation of train aerodynamics: traininduced wind conditions at an underground railroad passenger platform / A. Khayrullina, B. Blocken, W. Janssen, J. Straathof // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2015. — Vol. 139. — Pp. 100–110. DOI: 10.1016/j.jweia.2015.01.19.

8. Кравец В. В. Аэродинамика высокоскоростных поездов. Ч. 2 / В. В. Кравец, Е. В. Кравец // Залізн. трансп. України. 9. Трудоношин В. А. Введение в метод конечных элементов / В. А. Трудоношин, М. Ю. Уваров. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 9 с.

10. Проектная документация. Строительство нового Байкальского тоннеля на перегоне Дельбичинда — Дабан Восточно-Сибирской железной дороги. Раздел 3. Технологические и конструктивные решения линейного объекта. Искусственные сооружения. ОАО «СтройТрест». — 2014.

11. Бамтоннельпроект. Объекты. — URL: <http://www.btpnsk.ru/objects>.

12. Лазаренко Ю. М. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на пассажиров на платформах и на встречные поезда при скрещении / Ю. М. Лазаренко, А. Н. Капускин // Вестн. ВНИИЖТа. — 2012. — № 4. — С. 11–14.

13. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, мето-

ды, рекомендации / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2015. — 562 с.

14. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorksSimulation / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2019. — 464 с.

15. Бараз В. Р. Использование MS Excel для анализа статистических данных: учеб. пособие / В. Р. Бараз, В. Ф. Пегашкин; М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУим. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. техн. ин-т (филиал). — 2-е изд., перераб. и доп. — Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2014 — 181 с.

16. Бурнаева Э. Г. Статистический пакет анализа данных в Excel 2013: учебное пособие / Э. Г. Бурнаева, С. Н. Леора. — СПб.: СПбГУ, 2020. — 40 с.

Дата поступления: 27.05.2022

Решение о публикации: 01.08.2022

Контактная информация:

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

ВАТУЛИН Ян Семенович — канд. техн. наук, доц.; yan-roos@yandex.ru

ВАТАЕВ Андрей Сергеевич — канд. техн. наук, доц.; avataev@yandex.ru

КАРИМОВ Дастонбек Давронбой угли — аспирант; dostonkarimov325@gmail.com

СОТНИКОВ Кирилл Андреевич — аспирант; k-sotnikov@yandex.ru

On the Issue of Negative Effect Reduction of Aeroelastic Interaction Between High-Speed Rolling Stock and Tunnel Structure Elements

A. A. Vorob'ev, Ya. S. Vatulin, A. S. Vatayev, D. D. Karimov, K. A. Sotnikov

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

For citation: Vorob'ev A. A., Vatulin Y. S., Vatayev A. S., Karimov D. D., Sotnikov K. A. On the Issue of Negative Effect Reduction of Aeroelastic Interaction Between High-Speed Rolling Stock and Tunnel Structure Elements // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 590–599. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-590-599

Summary

Purpose: The development of recommendations on the improvement of energy efficiency and safety of freight and passenger transportation process on the basis of the analysis of aerodynamic interaction processes between moving rolling stock and tunnel-type artificial structures. To study the effect of air flow on electric rolling stock (ERS) and locomotive crew using SolidWorks program, Flow Simulation module. **Methods:** Investigation of the principle of formation of air environment structure in the portal part area of standard type tunnel structure that's equipped with means for leveling air pressure fluctuations by air mass movement modeling by “braked rotor” method. **Results:** The design of tunnel portal part was developed and numerical study in the SolidWorks Flow Simulation environment was carried out. At tunnel entrance and exit, it is possible to reduce several times air flow velocity, affecting ERS and tunnel structures, as well as to stabilize air mass pressure and to bring atmospheric pressure closer to normal one. **Practical significance:** The proposed design allows to improve cargo and passenger transportation quality and namely to reduce negative pressure and velocity of air flow, affecting locomotive crews, passengers and tunnel structures as well as to lower electric rolling stock power consumption.

Keywords: Aerodynamic effect, artificial tunnel-type structures, frontal air drag, confuser, diffuser, finite element method, static pressure, numerical simulation.

References

1. Alferova E. L., Lugin I. V., Kiyanitsa L. A. *Moderivanie vozmushcheniy vozdushnogo potoka pri dvizhenii poezdov v dvukhputnom tonnele metropolitena* [Modeling of airflow disturbances during train movement in a double-track subway tunnel]. (In Russian)
2. 779-11R. Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations.
3. *Normativnye dokumenty. SP 122.13330.2012 «Tonneli zheleznodorozhnye i avtodorozhnye»* [Regulatory documents. SP 122.13330.2012 “Railway and road tunnels”]. (In Russian)
4. *Normativnye dokumenty. Spetsial'nye tekhnicheskie usloviya Svod pravil «Sooruzheniya iskusstvennye vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh liniy»* [Regulatory documents. Special technical conditions Code of rules “Artificial structures of high-speed railway lines”]. (In Russian)
5. Dzhabbarov S. T. Dvizhenie tonkogo osesimmetricheskogo tela v poluprostranstve, zanyatom zanyatom szhimaemym gazom [Movement of a thin axisymmetric body in a half-space occupied by a compressible gas]. *Problemy mekhaniki* [Problems of Mechanics]. 2016, I. 1, pp. 12–17. (In Russian)
6. Alyamovskiy A. A. *Inzhenernye raschety v Solid-WorksSimulation* [Engineering calculations in Solid-WorksSimulation]. Moscow: DMK Press Publ., 2010. 464 p. (In Russian)

7. Khayrullina A., Blocken B., Janssen W., Straathof J. CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform. *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2015, vol. 139, pp. 100–110. DOI: 10.1016/j.jweia.2015.01.19.
8. Kravets V. V. *Aerodinamika vysokoskorostnykh poezdov* [Introduction to the finite element method]. 2005, I. 3, pp. 16–20. (In Russian)
9. Trudonoshin V. A., Uvarov M. Yu. *Vvedenie v metod konechnykh elementov* [Aerodynamic impact of the Sapsan high-speed electric train on passengers on platforms and on oncoming trains during crossing]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana Publ. 9 p. (In Russian)
10. *Proektnaya dokumentatsiya. Stroitel'stvo novogo Baykal'skogo tonnylya na peregone Del'bichinda – Daban Vostochno-Sibirskoy zheleznoy dorogi. Razdel 3. Tekhnologicheskie i konstruktivnye resheniya lineynogo ob'ekta. Iskusstvennye sooruzheniya. OAO «StroyTrest»* [Project documentation. Construction of a new Baikal tunnel on the Delbichinda-Daban section of the East Siberian Railway. Section 3. Technological and design solutions for a linear facility. Artificial constructions. OAO “StroyTrest”]. 2014. (In Russian)
11. *Bamtonnel'proekt. Ob'ekty* [Bamtunnel project. Objects]. Available at: <http://www.btpnsk.ru/objects>. (In Russian)
12. Lazarenko, Yu. M. Aerodinamicheskoe vozdeystvie vysokoskorostnogo elektropoezda «Sapsan» na passazhirov na platformakh i na vstrechnye poezda pri skreshchenii [Project documentation. Construction of a new Baikal tunnel on the Delbichinda-Daban section of the East Siberian Railway. Section 3. Technological and design solutions for a linear facility]. *Vestn. VNIIZhTa* [Artificial constructions. OAO “StroyTrest”]. 2012, I. 4, pp. 11–14. (In Russian)
13. 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)
14. Alyamovskiy A. A. *Inzhenernye raschety v SolidWorksSimulation* [Engineering calculations in SolidWorksSimulation]. Moscow: DMK Press Publ., 2019. 464 p. (In Russian)
15. Baraz V. R. *Ispol'zovanie MS Excel dlya analiza statisticheskikh dannykh* [Statistical Data Analysis Package in Excel]. *M-vo obrazovaniya i nauki RF; FGAOU VPO «UrFUim. pervogo Prezidenta Rossii B.N.El'tsina», Nizhnetagil. tekhn. in-t (filial)* [Ministry of Education and Science of the Russian Federation; FGAOU VPO “UrFUim. the first President of Russia B.N. Yeltsin, Nizhny Tagil. tech. in-t (branch)]. Nizhniy Tagil: NTI (filial) UrFU Publ., 2014. 181 p. (In Russian)
16. Burnaeva E. G., Leora S. N. *Statisticheskii paket analiza dannykh v Excel 2013* [Statistical Data Analysis Package in Excel 2013]. St. Petersburg: SPbGU Publ., 2020. 40 p. (In Russian)

Received: May 27, 2022

Accepted: August 01, 2022

Author's information:

Aleksandr A. VOROB'EV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; 79219751198@yandex.ru

Yan S. VATULIN — PhD in Engineering, Associate Professor; yan-roos@yandex.ru

Andrey S. VATAEV — PhD in Engineering, Associate Professor; avataev@yandex.ru

Dostonbek D. KRIMOV — Postgraduate Student; dostonkarimov325@gmail.com

Kirill A. SOTNIKOV — Postgraduate Student; k-sotnikov@yandex.ru



УДК 551.510.535

Учет неоднородностей подсеточного масштаба в рамках численной модели глобального распределения электрических полей в ионосфере Земли

В. М. Уваров

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

Для цитирования: Уваров В. М. Учет неоднородностей подсеточного масштаба в рамках численной модели глобального распределения электрических полей в ионосфере Земли // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 600–608. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-600-608

Аннотация

Цель: Создание глобальной численной модели ионосферных электрических полей с возможностью более детального описания их мелкомасштабных особенностей в некоторых ограниченных подобластях. **Методы:** Постановка краевой задачи с учетом выделенной подобласти для описания особенностей подсеточного масштаба и ее решение современным численным методом. **Результаты:** Проведена апробация модели. В частности, получено устойчивое численное решение для случая мелкомасштабного локализованного усиления проводимости, обусловленного дополнительной ионизацией ионосферы авроральным лучом. **Практическая значимость:** Модель дает возможность уточнить картину глобального распределения ионосферных электрических полей в тех ограниченных подобластях, для которых имеется более полный набор экспериментальных данных по распределению проводимостей и продольных токов.

Ключевые слова: Ионосфера, электрические поля, электрический потенциал, ионосферная проводимость, продольные токи, численное моделирование, подсеточный масштаб, вариационно-разностный метод.

Введение

В статье 1981 г. [1] был изложен новый подход к моделированию ионосферных электрических полей. Главной отличительной чертой этого подхода был учет электродинамического взаимодействия ионосфер противоположных полушарий. Специфика этого взаимодействия такова, что ее можно учесть только в рамках описания

электрических полей на всей сферической ионосферной оболочке с выделением подобластей в виде северной и южной полярных шапок. Соответствующая краевая задача оказалась весьма сложной. Поэтому первые результаты были получены аналитически, путем задания достаточно простых моделей параметров задачи. Но даже в этом случае удалось рассмотреть весьма интерес-

ный случай межполушарной асимметрии, когда при отсутствии источников в данном полушарии электрические поля тем не менее возбуждались источниками, локализованными в противоположном полушарии [2].

Разработанные позднее две численные модели, детально описанные в [3], позволили рассчитывать распределение потенциала для реальных условий. Более того, из этих двух моделей более поздняя, модифицированная версия [4], дает устойчивое численное решение даже при наличии сильных разрывов в самих проводимостях, когда терпят разрыв коэффициенты при вторых производных потенциала в эллиптических уравнениях системы [5]. Такие разрывы могут наблюдаться, например, на границах полярных сияний.

Следует отметить, что с полярными сияниями различных типов и различных пространственных масштабов связаны вполне определенные картины распределения ионосферных проводимостей и продольных токов. Характерный пространственный масштаб неоднородностей этих параметров может быть существенно меньше пространственных шагов численной глобальной модели распределения электрического потенциала.

Ниже описана модификация численной модели [4], на основе которой исследуется влияние неоднородностей проводимости и продольных токов подсеточного масштаба, локализованных в некоторой ограниченной подобласти.

Постановка задачи и метод решения

Проблема учета неоднородностей подсеточного масштаба, локализованных в ограниченной подобласти, решена следующим образом. На сетке глобальной численной модели выбрана подобласть, где предполагается сгустить сетку с целью адекватного описания мелкомасштабных неоднородностей в распределении проводимостей и продольных токов. Очевидно, что если в

выделенной подобласти пространственные шаги совпадают с шагами глобальной модели, то нет никакой необходимости в задании каких-либо граничных условий на границе такой подобласти. В случае измельчения шагов в подобласти очевидными граничными условиями являются условия сшивки по потенциалу и нормальной компоненте тока.

Система уравнений и граничные условия глобальной модели подробно описаны в [1, 3, 4]:

$$\operatorname{div}_{\theta,\varphi} J_1 = j_{1r}'' \text{ для } \Omega_1(\theta \leq \theta_1); \quad (1)$$

$$\operatorname{div}_{\theta,\varphi} J_2 = j_{2r}'' \text{ для } \Omega_2(\pi - \theta_1 \leq \theta \leq \pi); \quad (2)$$

$$\operatorname{div}_{\theta,\varphi} J_3 = j_{3r}'' \text{ для } \Omega_3^N(\theta_1 \leq \theta \leq \theta_3); \quad (3)$$

$$U_1(\theta_1, \varphi) = U_3(\theta_1, \varphi) = U_2(\theta_2, \varphi); \quad (4)$$

$$J_{1\theta}(\theta_1, \varphi) - J_{3\theta}(\theta_1, \varphi) = J_{2\theta}(\theta_2, \varphi); \quad (5)$$

$$J_{3\theta}(\theta_3, \varphi) = 0, \quad (6)$$

где U_α, J_α ($\alpha = 1, 2, 3$) — потенциалы и токи в соответствующих областях, связанные законом Ома:

$$J_\alpha = \sum_\alpha (-\operatorname{grad} U_\alpha), \quad (7)$$

где \sum — тензор интегральной проводимости:

$$\sum = \begin{bmatrix} \sum_{\theta\theta} & \sum_{\theta\varphi} \\ \sum_{\varphi\theta} & \sum_{\varphi\varphi} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $\sum_{\theta\theta} = \sum_p / \sin^2 \chi$; $\sum_{\theta\varphi} = -\sum_{\varphi\theta} = \sum_H / \sin \chi$; $\sum_{\varphi\varphi} = \sum_p$; $\sin \chi = 2 \cdot \cos \theta / (1 + 3 \cdot \cos^2 \theta)^{1/2}$; χ — магнитное склонение; $\operatorname{div}_{\theta,\varphi}$ — угловая часть оператора дивергенции в сферических координатах θ, φ ; $j_{\alpha r}''$ — источники в виде радиальной составляющей продольных токов; \sum_p и \sum_H зависят от θ и φ .

Уравнения (1) — (3) описывают распределение потенциала в областях северной полярной

шапки, южной полярной шапки и области средних и низких широт соответственно. Условие (4) означает отсутствие скачка потенциала поперек границы данной шапки и между границами противоположных шапок в каждой точке границ. Условие (5) следует из неразрывности общей токовой цепи и означает, что возможные разрывы нормальной компоненты горизонтальных токов на границах северной и южной шапок взаимно компенсируют друг друга за счет продольных токов перетекания на этих границах. Условие (6) — это однородное граничное условие на нормальную компоненту тока. Оно соответствует непротеканию тока через экватор и является единственно физически обоснованным [3].

Краевая задача (1) — (6) для эллиптической системы уравнений в частных производных имеет следующие специфические особенности: а) разделение сферы на три подобласти, на границе которых ставятся краевые условия нелокального характера; б) несамосопряженность; в) вырожденность краевой задачи. Под нелокальным характером граничных условий (4) и (5) понимается наличие в них потенциалов и токов, относящихся к разным полушариям. Особенность (б) обусловлена наличием в тензоре проводимости (8) ненулевой и неоднородной внедиагональной компоненты, определяемой проводимостью Холла. Особенность (в) отражает тот факт, что при отсутствии источников задача (1) — (6) имеет нетривиальное решение $U = \text{const}$.

Параметр θ_1 , определяющий размер и границы шапок, в расчетах принимался равным 27° . Экваториальная граница выбиралась несколько выше экватора, $\theta_3 = 72^\circ$, с целью избежать особенностей в тензоре проводимости (8) ($\sin \chi = 0$ при $\theta_3 = 90^\circ$).

Мелкомасштабные неоднородности в распределении параметров задачи, характерная протяженность которых порядка или менее сеточных шагов глобальной модели, могут быть учтены различными методами.

Например, для решения данной задачи можно было бы использовать единую сетку для всей сферы, но со сгущением ее в области локализации мелкомасштабной неоднородности. Однако вне этой области покрывающая всю сферу единая сетка будет, очевидно, неравномерной, что понизит степень аппроксимации соответствующих разностных уравнений.

Ниже выбран другой метод. Выделяется содержащая мелкомасштабную неоднородность подобласть $\omega = [\theta_{\omega 1}, \theta_{\omega 2}] \cdot [\varphi_{\omega 1}, \varphi_{\omega 2}]$ (т. е. подобласть, локализованная в интервале коширот $\theta_{\omega 1} \leq \theta \leq \theta_{\omega 2}$ и интервале долгот $\varphi_{\omega 1} \leq \varphi \leq \varphi_{\omega 2}$), для которой используется отдельная равномерная сетка с шагами в 5–7 раз более мелкими по сравнению с исходной равномерной глобальной сеткой. Границу области ω обозначим Γ_ω . Ниже предполагается, что подобласть ω целиком находится в области Ω_1 (северная полярная шапка). Для подобласти ω решается свое уравнение для потенциала U_ω :

$$\text{div}_{\theta, \varphi} J_\omega = j_{\omega r}^* \text{ для } \omega = [\theta_{\omega 1}, \theta_{\omega 2}] \cdot [\varphi_{\omega 1}, \varphi_{\omega 2}], \quad (9)$$

совпадающее по структуре с уравнениями (1) — (3). На границе Γ_ω задаются классические условия сшивки решений U_ω и U_1 по потенциалу и нормальной к границе компоненте тока $J_{\omega n}$ и J_{1n} :

$$U_\omega |_{\Gamma_\omega} = U_1 |_{\Gamma_\omega}. \quad (10)$$

$$J_{\omega n} |_{\Gamma_\omega} = J_{1n} |_{\Gamma_\omega}. \quad (11)$$

Таким образом, краевая задача о глобальном распределении потенциала в ионосфере Земли с выделением подобласти для учета мелкомасштабных неоднородностей проводимости и продольного тока описывается системой уравнений для потенциала (1) — (3), (9) и системой граничных условий (4) — (6), (10), (11). Впервые такая задача была сформулирована в [6].

Для решения этой задачи система сеточных уравнений строилась следующим образом. Подо-

область ω выбирается таким образом, чтобы ее граница проходила между узлами сетки глобальной задачи. Сетка для ω строится со сдвигом на полшага, чтобы граница областей находилась между узлами более частой сетки. После решения глобальной задачи становится возможным задать граничное условие Дирихле для «подобласти возмущений» по известным значениям потенциала U в узлах крупной сетки. Значения граничного условия для мелкой сетки получаем с помощью линейной интерполяции, после чего решается соответствующая краевая задача для подобласти ω . После этого вычисляется значение нормальной компоненты электрического тока в ω , задается граничное условие на нормальную компоненту для глобальной задачи и решается глобальная задача со скорректированными граничными условиями. В итоге получается классическая схема «Дирихле — Нейман» решения разностной задачи методом декомпозиции областей.

Результаты численных расчетов

Численное решение обсуждаемой краевой задачи изображено на рис. 1, где дано двумерное распределение потенциала (в киловольтах) в интервале геомагнитных коширот от 0 до 30 градусов для северной полярной шапки (дневной меридиан сверху).

В качестве источников электрических полей выбирались продольные токи двух систем — *DPY*-системы и трехслойной *MTS*-системы [7, 8]. Обе системы наблюдаются в экстремально спокойных геомагнитных условиях. Продольные токи *DPY*-системы локализованы между дневным каспом и геомагнитным полюсом [9]. Трехслойная *MTS*-система локализована вблизи ночного меридиана [7, 8]. В Северном полушарии, для отрицательной азимутальной компоненты межпланетного магнитного поля (ММП), они локализованы в послеполуночные часы с вытекающим продольным током в центральном слое и с втекающими про-

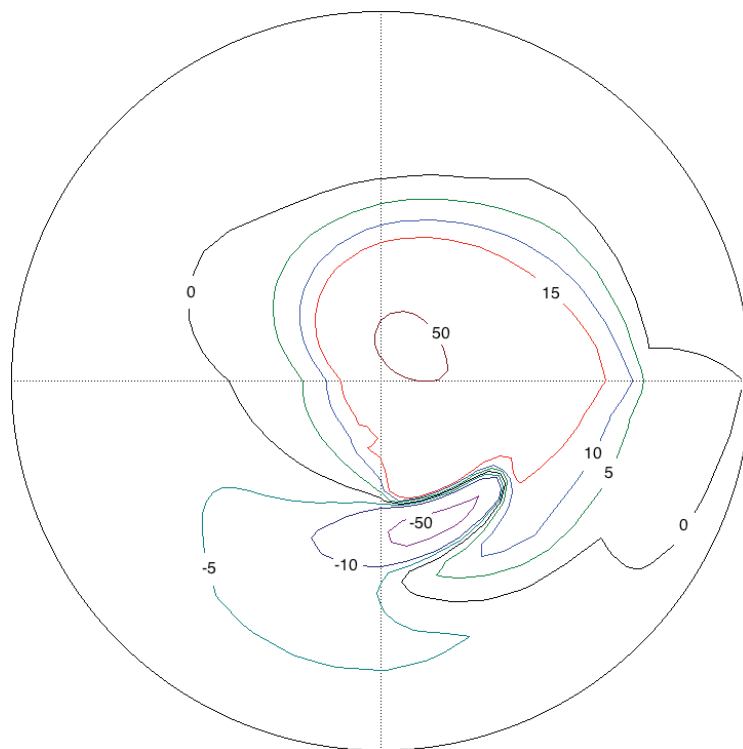


Рис. 1. Изолинии потенциала (в киловольтах) для северной полярной шапки

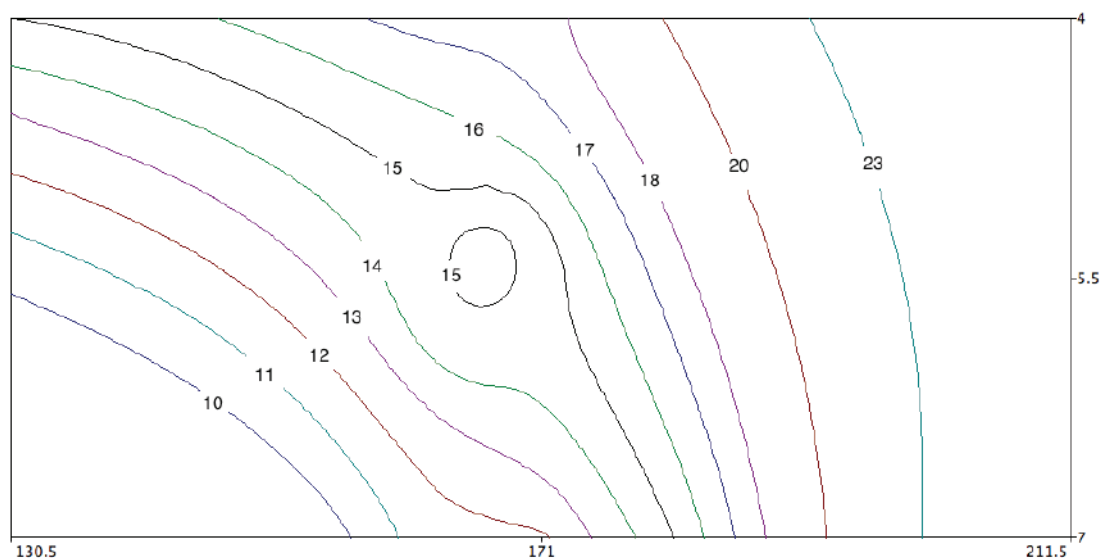


Рис. 2. Изолинии потенциала в выделенной подобласти.
Случай локального усиления проводимости

дольными токами на периферии, а для положительной азимутальной компоненты — в послеполуночные часы с обратным направлением токов во всех трех слоях. В Южном полушарии распределение *MTS* — продольных токов повторяет распределение в Северном полушарии, но для противоположного знака азимутальной компоненты.

Расчеты проведены для случая равноденствия. Рассмотрен случай отрицательной азимутальной компоненты ММП. Вклад в интегральную проводимость прямого УФ-излучения учитывалось по модели [10], электронных высыпаний — по модели [11], рассеянного УФ-излучения и звездного света — аналогично [12]. В качестве входных параметров для моделей [10, 11] выбирались низкая геомагнитная активность и средняя солнечная активность.

На рис. 1 ярко выражен излом эквипотенциалей на утренне-вечернем меридиане. Последний совпадает с границей тени, на которой происходит разрыв первой производной от холловской проводимости, что приводит к разрыву коэффициентов при первой производной от потенциала в двумерных эллиптических уравнениях (1) — (3).

На рис. 1 видно также, что эквипотенциаль 15 кВ вблизи ночного меридиана обнаруживает заметный

излом. Он обусловлен выделением здесь специальной подобласти, в которой было задано усиление проводимости в небольшом круге, ассоциируемое с дополнительной ионизацией ионосферы потоком заряженных частиц в виде аврорального луча (один из типов полярных сияний). Отмеченная выше особенность в распределении потенциала более выпукло прорисовывается на рис. 2, где дана картина эквипотенциалей в выделенной подобласти коширот от 4 до 7 градусов и азимутальных углов от 130,5 до 211,5 градусов (азимутальный угол отсчитывается от дневного меридиана против часовой стрелки). По сравнению с основными шагами глобальной модели (0,5 градуса по кошироте и 4,5 градуса по долготе) коширотный и долготный шаги в выделенной подобласти были кратно уменьшены (в ходе вычислительных экспериментов удалось достичь указанного уменьшения в 51 раз).

На рис. 3 дано распределение потенциала, аналогичное рис. 2, но для случая, когда в выделенной подобласти никаких искажений фоновой проводимости не допускалось. Соответственно, никаких искажений в картине эквипотенциалей на рис. 3 нет. Это свидетельствует в пользу успешного тестирования разработанной численной модели.

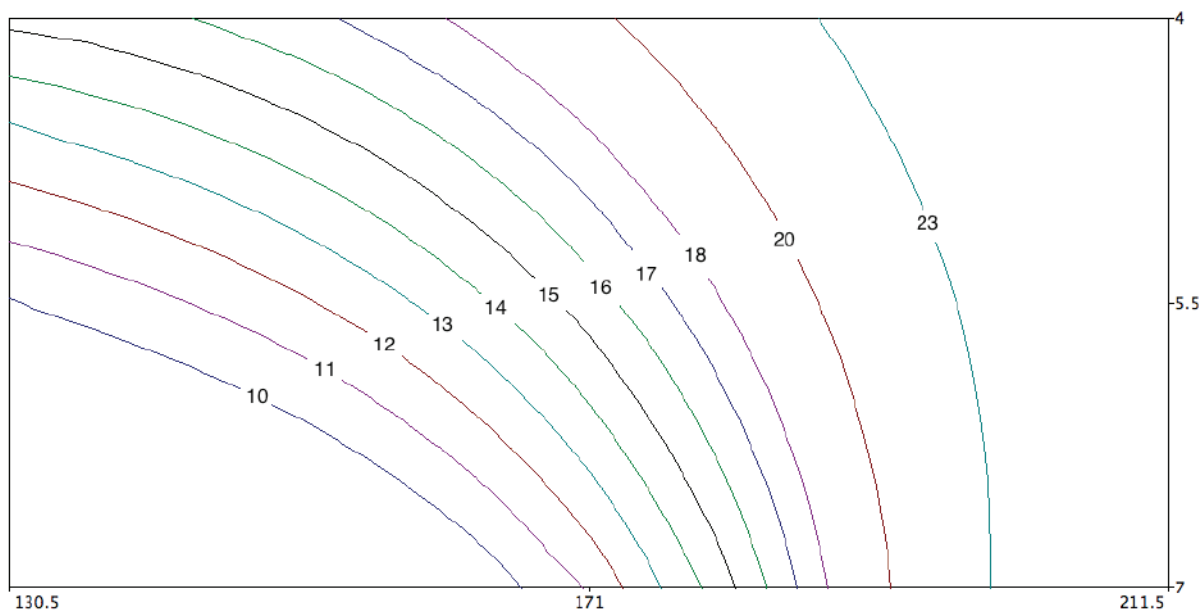


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но без искажения фоновой проводимости

Для тестирования модели особый интерес представляет случай, когда возбуждающий электрический ток (правая часть уравнения (9)) локализован исключительно в выделенной подобласти ω . Было выбрано модельное распределение плотности продольного тока, характерное для окрестности аврорального луча с разным направлением вектора плотности тока в центре луча и на периферии. При этом выполняется естественное условие компенсации (равенство полных втекающих и вытекающих токов). Устойчивое решение было получено и в данном случае. Возбуждаемые электрические поля были локализованы преимущественно в выделенной подобласти, не выходя за ее границы, что было вполне ожидаемо для заданной структуры распределения скомпенсированных продольных токов.

Заключение

Представленная в настоящей статье численная модель является развитием модели [4], в основе которой лежит постановка краевой задачи [1] о глобальном распределении электрических полей в ионосфере Земли с учетом специфики электро-

динамического взаимодействия токонесущих ионосферных оболочек противоположных полушарий. Большие вычислительные трудности при создании модели [4], обусловленные нестандартностью указанной краевой задачи, удалось преодолеть во многом благодаря многолетнему сотрудничеству с Б. А. Самокишем, известным специалистом в области вычислительной математики. Об этих трудностях красноречиво свидетельствует тот факт, что на сегодняшний день так и не появились конкурирующие модели.

Использование в модели [4] вариационно-разностного метода, основанного на концепции обобщенного решения, позволило рассчитывать глобальные распределения потенциала даже для случаев очень сильных разрывов в распределении ионосферных проводимостей [5], адекватно воспроизводя поведение полей даже в непосредственной окрестности таких разрывов. Разрывы могут возникать, например, на границах каналов проводимости, создаваемых полярными сияниями.

Отличительной особенностью модели, изложенной в настоящей статье, является возмож-

ность выделить специальную пространственную подобласть для более детального учета мелкомасштабных особенностей в распределении входных параметров модели (проводимостей и продольных токов) и адекватного воспроизведения в расчетах соответствующих особенностей в распределении электрических полей.

Своевременность разработки такой модели определяется перспективой появления экспериментальных полигонов с достаточно плотной сетью установок для измерения ионосферных параметров и электрических полей. Сопоставление результатов численного моделирования и данных измерений поможет ответить на целый ряд актуальных вопросов. Например, на вопрос о роли механизма ионосферного динамо в распределении электрических полей в окрестности различных типов полярных сияний.

Библиографический список

1. Уваров В. М. Возможный подход к проблеме возбуждения электрических полей и токов, обусловленных V_y -компонентой ММП / В. М. Уваров // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1981. — Т. 21. — № 1. — С. 114–120.
2. Уваров В. М. О распределении электрических полей, обусловленных северной компонентой ММП при отсутствии продольных токов в зимней полярной шапке / В. М. Уваров // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1984. — Т. 24. — № 1. — С. 1025–1027.
3. Уваров В. М. Электрические поля в ионосфере Земли. Численные модели / В. М. Уваров, Б. А. Самокиш. — СПб.: ПГУПС, 2009. — 63 с.
4. Кондаков А. Б. Модифицированная численная модель глобального распределения электрического потенциала. UT-эффект обращения ионосферной конвекции / А. Б. Кондаков, Б. А. Самокиш, В. М. Уваров // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1999. — Т. 39. — № 6. — С. 50–55.
5. Кондаков А. Б. Моделирование глобального распределения электрических полей в ионосфере Земли с учетом разрывов в распределении проводимости / А. Б. Кондаков // Известия петербургского университета путей сообщения. — 2013. — Вып. 4(37). — С. 123–128.
6. Уваров В. М. «Вычислительный микроскоп» для численной модели глобального распределения электрических полей в ионосфере Земли. Постановка задачи / В. М. Уваров, А. Б. Кондаков // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке: сборник трудов XII Санкт-Петербургского конгресса. 12–13 ноября 2018 г. — СПб. — С. 247–248.
7. Taguchi S. By-controlled field-aligned currents near midnight auroral oval during northward interplanetary magnetic field / S. Taguchi // J. Geophys. Res. — 1992. — Vol. 97. — № A8. — Pp. 12231–12243.
8. Taguchi S. By-controlled convection and field-aligned currents near midnight auroral oval for northward interplanetary magnetic field / S. Taguchi, M. Sugiura, T. Iemori et al. // J. Geophys. Res. — 1994. — Vol. 99. — № A4. — Pp. 6027–6044.
9. Araki T. The interplanetary magnetic field By-dependent field-aligned current in the dayside polar cap under quiet conditions / T. Araki, M. Yamauchi // J. Geophys. Res. — 1989. — Vol. 94. — № A3. — Pp. 2684–2690.
10. Robinson R. M. Measurements of E region ionization and conductivity produced by solar illumination at high latitudes / R. M. Robinson, R. R. Vondrak // J. Geophys. Res. — 1984. — Vol. A89. — № A6. — Pp. 3951–3956.
11. Hardy D. A. Statistical and Functional representation of the pattern of auroral energy flux, number flux and conductivity / D. A. Hardy, M. S. Gussenhoven, R. Raistrick, W. J. McNeil // J. Geophys. Res. — 1987. — Vol. A92. — № 11. — Pp. 12275–12294.
12. Rasmussen C. E. Ionospheric convection driven by NBZ currents / C. E. Rasmussen, R. W. Shunk // J. Geophys. Res. — 1987. — Vol. A92. — № 5. — Pp. 4491–4504.

Дата поступления: 20.04.2022

Решение о публикации: 28.05.2022

Контактная информация:

УВАРОВ Вячеслав Михайлович — д-р физ.-мат. наук, проф.; vmuvarov@mail.ru

Accounting for Subgrid Scale Heterogeneity in the Frames of Numerical Model for Global Distribution of Electric Fields in the Earth Ionosphere

V. M. Uvarov

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

For citation: Uvarov V. M. Accounting for Subgrid Scale Heterogeneity in the Frames of Numerical Model for Global Distribution of Electric Fields in the Earth Ionosphere // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 600–608. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-600-608

Summary

Purpose: Creation of a global numerical model of ionospheric electric fields with the possibility of more detailed description of their small-scale features in some limited subareas. **Methods:** Formulation of a boundary value task with accounting for underlined subdomain for to describe subgrid scale features and the task solution by modern numerical method. **Results:** Model testing was conducted. In particular, stable numerical solution was obtained for the case of small-scale localized conductivity increase due to additional ionization of the ionosphere by an auroral ray. **Practical significance:** The model will make it possible to qualify the picture of ionospheric electric field global distribution in those limited subareas which for, there is fuller set of experimental data on the distribution of conductivity and field-aligned currents.

Keywords: Ionosphere, electric fields, electric potential, ionospheric conductivity, field-aligned currents, subgrid scale, numerical modeling, variation-difference method.

References

1. Uvarov V. M. Vozmozhnyy podkhod k probleme vzbuzhdeniya elektricheskikh poley i tokov, obuslovlennykh By-komponentoy MMP [A possible approach to the problem of excitation of electric fields and currents due to the By-component of the IMF]. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and aeronomy]. 1981, vol. 21, I. 1, pp. 114–120. (In Russian)
2. Uvarov V. M. O raspredelenii elektricheskikh poley, obuslovlennykh severnoy komponentoy MMP pri otsutstvii prodol'nykh tokov v zimney polyarnoy shapke [On the distribution of electric fields due to the northern component of the IMF in the absence of field-aligned currents in the winter polar cap]. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and aeronomy]. 1984, vol. 24, I. 1, pp. 1025–1027. (In Russian)
3. Uvarov V. M., Samokish B. A. *Elektricheskie polya v ionosfere Zemli. Chislennyye modeli* [Electric fields in the Earth's ionosphere. Numerical models]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2009, 63 p. (In Russian)
4. Kondakov A. B., Samokish B. A., Uvarov V. M. Modifitsirovannaya chislennaya model' global'nogo raspredeleniya elektricheskogo potentsiala. UT-effekt obrashcheniya ionosfernoy konveksii [Modified Numerical Model of the Global Distribution of Electric Potential. UT-effect of reversal of ionospheric convection]. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and aeronomy]. 1999, vol. 39, I. 6, pp. 50–55. (In Russian)
5. Kondakov A. B. Modelirovanie global'nogo raspredeleniya elektricheskikh poley v ionosfere Zemli s uchetom razryvov v raspredelenii provodimosti [Modeling the global distribution of electric fields in the Earth's ionosphere, taking into account discontinuities in the distribution of conductivity]. *Izvestiya peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the

St. Petersburg University of Communications]. 2013, I. 4(37), pp. 123–128. (In Russian)

6. Uvarov V. M., Kondakov A. B. «Vychislitel'nyy mikroskop» dlya chislennoy modeli global'nogo raspredeleniya elektricheskikh poley v ionosfere Zemli. Postanovka zadachi [“Computational microscope” for the numerical model of the global distribution of electric fields in the Earth’s ionosphere. Formulation of the problem]. *Professional'noe obrazovanie, nauk i innovatsii v XXI veke. Sbornik trudov XII Sankt – Peterburgskogo kongressa. 12–13 noyabrya 2018 goda* [Professional education, sciences and innovations in the XXI century. Collection of Proceedings of the XII St. Petersburg Congress. November 12–13, 2018]. St. Petersburg, pp. 247–248. (In Russian)

7. Taguchi S., Sugiura M., Iemori T. By-controlled convection and field-aligned currents near midnight auroral oval for northward interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.* 1994, vol. 99, I. A4, pp. 6027–6044.

8. Taguchi S. By-controlled field-aligned currents near midnight auroral oval during northward interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.* 1992, vol. 97, I. A8, pp. 12231–12243.

9. Araki T., Yamauchi M. The interplanetary magnetic field By-dependent field-aligned current in the dayside polar cap under quiet conditions. *J. Geophys. Res.* 1989, vol. 94, I. A3, pp. 2684–2690.

10. Robinson R. M., Vondrak R. R. Measurements of E region ionization and conductivity produced by solar illumination at high latitudes. *J. Geophys. Res.* 1984, vol. A89, I. A6, pp. 3951–3956.

11. Hardy D. A., Gussenhoven M. S., Raistric R., McNeil W.J. Statistical and Functional representation of the pattern of auroral energy flux, number flux and conductivity. *J. Geophys. Res.* 1987, vol. A92, I. 11, pp. 12275–12294.

12. Rasmussen C. E., Shunk R. W. Ionospheric convection driven by NBZ currents. *J. Geophys. Res.* 1987, vol. A92, I. 5, pp. 4491–4504.

Received: April 20, 2022

Accepted: May 28, 2022

Author’s information:

Vyacheslav M. UVAROV — Dr. Sci. in Physical-Mathematical Sciences; vmuvarov@mail.ru

УДК 519.816

Моделирование восстановления железнодорожных объектов, разрушенных в результате ЧС регионального масштаба

А. И. Дергачев¹, О. Н. Куранова¹, О. А. Степанская¹, А. К. Черных²

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

²Санкт-Петербургский военный ордена Жукова институт войск национальной гвардии, Российская Федерация, 198206, Санкт-Петербург, ул. Летчика Пилютова, 1

Для цитирования: Дергачев А. И., Куранова О. Н., Степанская О. А., Черных А. К. Моделирование восстановления железнодорожных объектов, разрушенных в результате ЧС регионального масштаба // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 609–617. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-609-617

Аннотация

Цель: Получение аналитических зависимостей для распределения оптимальным образом ресурсов восстановительных поездов различных видов в целях восстановления в минимально возможные сроки железнодорожных объектов, разрушенных в результате ЧС регионального масштаба. **Методы:** Применяется эвристический метод оптимального распределения ресурсов восстановительных поездов различных видов по железнодорожным объектам, разрушенным в результате ЧС регионального масштаба. Приведено доказательство оптимальности предложенного эвристического метода. **Результаты:** В рамках предложенного метода выведены новые аналитические зависимости для распределения ресурсов восстановительных поездов различных видов по железнодорожным объектам, разрушенным в результате ЧС регионального масштаба. Приведены математическая постановка, базирующаяся на постановке нелинейной модели теории исследования операций, а также алгоритм решения задачи распределения ресурса восстановительных поездов по железнодорожным объектам, разрушенным в результате ЧС регионального масштаба. **Практическая значимость:** На основе рассмотренных зависимостей возможно повышение оперативности расчетов, позволяющих осуществить обоснованное распределение восстановительных поездов различных видов для восстановления железнодорожных объектов, разрушенных в результате ЧС регионального масштаба. Результаты исследования могут быть применены при создании информационно-расчетных систем, оперативно реализующих предложенные аналитические зависимости для более эффективного восстановления железнодорожных объектов, разрушенных в результате ЧС регионального масштаба.

Ключевые слова: Ресурсы восстановительных поездов различных видов, модель распределения ресурсов восстановительных поездов различных видов, алгоритм распределения ресурсов, динамика прибытия восстановительных поездов, технологии выполнения работ на железнодорожных объектах.

Введение

В статье представлена модель распределения ресурса восстановительных поездов (ВП) по железнодорожным объектам, разрушенным в результате ЧС, являющаяся основой предлагаемого метода.

Указанная модель (задача) реализует распределение (оптимальным образом) ресурсов различных видов [1–9].

В отличие от имеющихся решений указанной задачи, как правило, имеющих экспоненциальную трудоемкость, предлагаемое решение учитывает как динамику прибытия ВП, так и технологии выполнения ими необходимых работ на железнодорожных объектах [10, 11], разрушенных в результате ЧС (в дальнейшем объектов).

Математическая постановка модели

Авторами предлагается следующая математическая постановка модели распределения ресурса восстановительных поездов по разрушенным объектам:

$$\sum_{j \in J} PS_j (d_{\text{п}} - t_j^B) \rightarrow \max, \quad (1)$$

при ограничениях:

$$t_j^B \leq t_j^{\text{дирп}} \text{ при } \forall j \in J, \quad (2)$$

$$t_j^B = \max_{k \in M_{\text{п}j}} t_{kj}^B \text{ при } \forall j \in J, \quad (3)$$

$$t_{kj}^B = \max_{r \in R_{rkj}} t_{rkj}^B \text{ при } \forall k \in M_{\text{п}j}, \forall j \in J, \quad (4)$$

$$t_{rkj}^B(x_{rkj}) \leq t_j^B \text{ при } \forall r \in R_{rkj}, \forall k \in M_{\text{п}j}, \forall j \in J, \quad (5)$$

$$x_{rkj} \leq E_{rkj} \text{ при } \forall r \in R_{rkj}, \forall k \in M_{\text{п}j}, \forall j \in J, \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in M_{\text{п}j}} x_{rkj} \leq Q_r \text{ при } \forall r \in R_{rkj}, \quad (7)$$

$$t_{rkj}^H \geq t_{rsq}^H + \tau_{rsk} \text{ при } \forall r \in R_{rkj}, \forall j, q \in J, \forall k, s \in M_{\text{п}j}, \quad (8)$$

где $J = \{j = \overline{1, |J|}\}$, где $|J|$ — мощность множества} — множество коммуникаций;

PS_j — пропускная способность j -й коммуникации после восстановления, п. п./сут;

$d_{\text{п}}$ — порядковый номер, определяемый директивно, последних суток восстановления разрушенных объектов, сутки;

t_j^B — срок восстановления прерванного движения по j -й коммуникации, сутки;

$t_j^{\text{дирп}}$ — директивный срок восстановления прерванного движения по j -й коммуникации, сутки;

t_{kj}^B — срок восстановления прерванного движения через k -й объект j -й коммуникации, сутки;

$M_{\text{п}j}$ — множество разрушенных в d -е сутки ЧС объектов j -й коммуникации;

$R_{rkj} = \{\text{земляные } (r=1), \text{путевые } (r=2), \text{мостовые } (r=3)\}$ — множество видов восстановительных работ, на k -м объекте j -й коммуникации;

t_{rkj}^B — срок окончания восстановительных работ r -го вида на k -м объекте j -й коммуникации, сутки;

x_{rkj} — количество ВП r -го вида, закрепленных за k -м объектом j -й коммуникации, единиц;

E_{rkj} — фронт восстановительных работ на k -м объекте j -й коммуникации r -го вида, единиц;

Q_r — ресурс восстановительных поездов r -го вида;

$t_{rkj}^H(t_{rsq}^H)$ — срок начала восстановительных работ r -го вида на k -м (s -м) объекте j -й (q -й) коммуникации, сутки;

τ_{rsk} — продолжительность выполнения восстановительных работ r -го вида на s -м объекте q -й коммуникации восстановительными поездами и маневра их на k -й объект j -й коммуникации, сутки.

Алгоритм реализации модели

Приведем предлагаемый в статье алгоритм модели распределения ресурса восстановительных поездов по разрушенным объектам сети железных дорог произвольной конфигурации.

Шаг 1. Выбор k -го объекта j -й коммуникации разрушенного в d_m -е сутки ЧС — O_{kj} , за которым закреплены, т. е. выделены на объект, восстановительные поезда. Обозначив через M_{zr} — множество восстановительных поездов, закрепленных за указанным объектом и выполняющих на нем восстановительные работы r -го вида.

Тогда для восстановительных работ r -го вида срок окончания этого вида восстановительных работ (ВР) на O_{kj} — t_{rkj}^{op} :

$$t_{rkj}^{op} = \frac{V_{rkj} + \sum_{l \in M_{zr}} \Pi_{rl} \cdot t_{nrp}^{lrkj}}{\sum_{l \in M_{zr}} \Pi_{rl}}, \quad (9)$$

где V_{rkj} — объем восстановительных работ r -го вида на разрушенном k -м объекте j -й коммуникации (км, м, тыс. м³);

Π_{rl} — суточные возможности 1-го восстановительного поезда по r -у виду работ (км, м, тыс. м³);
 t_{nrp}^{lrkj} — срок начала r -го вида работ l -го ВП на k -м объекте j -й коммуникации, число.

Формула для расчета восстановительных работ t_{nrp}^{lrkj} имеет вид:

$$t_{nrp}^{lrkj} = \begin{cases} t_{nrp}^{lrkj} + t_{pz}^r & \text{для земляных,} \\ d_m & \text{для мостовых,} \\ t_{nz}^{lkj} + \tau_{пф} & \text{для путевых,} \end{cases} \quad (10)$$

где t_{nrp}^{lrkj} — срок прибытия 1-го восстановительного поезда, для выполнения r -го вида ВР на O_{kj} , число;

t_{pz}^r — продолжительность подготовки восстановительного поезда к выполнению восстановительных работ r -го вида, число;

t_{nz}^{lkj} — срок начала ЗВР 1-го ВП на O_{kj} , число;

$\tau_{пф}$ — продолжительность подготовки фронта работ для выполнения ПВР, число.

Заключительным расчетом для O_{kj} является определение срока восстановления движения через

объект: $t_{kj}^B = \max_{r \in R_{rkj}} t_{rkj}^{op}$.

Подобные расчеты необходимо провести для всех объектов, входящих в множество $M_{пj}$ ($j \in J, J$ — множество железных дорог (в дальнейшем коммуникаций), $M_{пj}$ — множество разрушенных в d -е сутки ЧС объектов j -й коммуникации), после чего для каждой j -й коммуникации определяется предварительное значение срока восстановления движения по ней $t_{kj}^B = \max_{r \in R_{rkj}} t_{rkj}^{op}$.

Замечание. В качестве исходных данных в формуле (9) используются объемы мостовых, путевых и земляных работ при восстановлении объектов сети железных дорог. Однако в модели в качестве исходных данных можно использовать и трудоемкости этих работ.

Шаг 2. Проведение анализа, существуют ли в множестве разрушенных в d_m -е сутки ЧС объектов $M_\Gamma = \bigcup_{j \in J} M_{\Gamma j}$ таких, ВП на которые не выделены (не закреплены). Для случая $M_\Gamma = \emptyset$ необходимо перейти на 4 шаг алгоритма, при $M_\Gamma = \emptyset$ необходимо перейти на 3 шаг алгоритма.

Шаг 3. В рамках этого шага осуществляется итерационное предварительное закрепление того восстановительного поезда r -го вида за выбранным по указанному ниже правилу объектом, срок окончания ВР для которого минимален.

Первым (очередным) выбирается объект O_{kj} , за которым на данной итерации может быть закреплено ВП r -го вида, удовлетворяющий критерию:

$$t_{rkj}^{op} = \max_{O_{kj} \in M} \max_{r \in R_\Gamma} t_{mst}^{op}. \quad (11)$$

Замечание. Расчет t_{mst}^{op} выполняется с использованием формулы (9). В этой формуле значение t_{nrp}^{lrkj} будет определено далее по тексту. Следует также отметить, что при $M_{zr} = \emptyset$ значение t_{mst}^{op} будем определять по формуле $t_{mst}^{op} = V_{mst} / A$, где A , например 0,1 — малое число.

Закрепление 1-го ВП за O_{kj} осуществляется при выполнении следующих условий (табл. 1).

Если в множестве M_Γ отсутствуют объекты, которые удовлетворяют условиям 1–4 (табл. 1),

ТАБЛИЦА 1. Условия закрепления ВП за объектами

№ п/п	Формула условия	Значения показателей
1	$t_{rkj}^{\text{оп}} > \max \left\{ t_{пj}^{\text{В}}, \max_{O_{sy} \in M_{\Gamma P}} t_{ms}^{\text{оп}} \right\}$	$M_{\Gamma P}$ — объекты из множества M_{Γ} , с предварительно закрепленными на уже проведенных операциях ВП
2	$N_{rkj} + 1 \leq E_{rkj}$	N_{rkj} — число закрепленных предварительно, на проведенных итерациях, за O_{kj} ВП r -го вида, штук
3	$t_{rkj}^{\text{оп}} - t_{нр}^{kj} \geq \tau_r$	τ_r — минимально допустимая продолжительность выполнения ВР r -го вида на объекте восстановительным поездом 1-го типа, сутки
4	$S_{lkj} \leq S_r^M$	S_{lkj} — расстояние 1-го ВП до O_{kj} , км; S_r^M — суточные возможности по выдвигению к разрушенному объекту ВП r -го вида, км

то итерационное распределение ВП по объектам этого множества завершается.

Последними расчетами, выполняемыми в рамках шага 4, должны быть расчеты для каждой j -й коммуникации ($j \in J$) срока восстановления движения (сутки):

$$t_j^{\text{В}} = \max \left\{ t_{пj}^{\text{В}}, \max_{O_{\tilde{j}} \in M} \max_{r, \text{вп} \in R} t_{msj}^{\text{В}} \right\}. \quad (12)$$

Введем необходимые для дальнейших расчетов обозначения.

Под множеством M_r будем понимать множество восстановительных поездов r -го вида, которые будут закрепляться за определенными выше объектами из множества M_{Γ} . При этом M_r состоит из двух подмножеств:

M_r^1 — подмножество ВП r -го вида, прибывших в d_m -е сутки ЧС, причем предполагаем, что каждое из этих ВП прибывает на выбранный в рамках данного шага объект;

M_r^2 — подмножество ВП r -го вида, которые завершили восстановление разрушенных объектов.

Для придания динамики распределению ВП по разрушенным объектам определяем для l -го ВП ($l \in M_r^2$) продолжительность его маневра на какой-либо O_{kj} — t_{lrkj}^M :

$$t_{lrkj}^M = t_{св}^r + (S_{lkj} / V_r) / 24 + t_{рз}^r, \quad (13)$$

где $t_{св}^r$ — продолжительность свертывания ВП после выполнения r -го вида работ, сутки;

S_{lkj} — расстояние от l -го ВП до O_{kj} , км. В дальнейшем будем предполагать, что l -е ВП осуществляют маневр на объект O_{kj} с объекта $O_{р\gamma}$;

V_r — скорость передвижения ВП r -го вида, км/час.

Введенные выше обозначения позволяют определить $t_{нр}^{lrkj}$ для O_{kj} по формуле:

$$t_{нр}^{lrkj} = \begin{cases} d_m + t_{lrkj}^M & \text{для } \forall l \in M_r^2, r \in \{\text{МВР}, \text{ЗВР}\}, \\ t_{нр}^{lrkj} + t_{рз}^r & \text{для } \forall l \in M_r^1, r = \text{ЗВР}, \\ t_{нр}^{lrkj} + t_{рз}^r & \text{для } \forall l \in M_r^1, r = \text{МВР}, \\ t_{р\gamma}^{\text{оп}} + t_{lrkj}^M & \text{для } \forall l \in M_r^2, r \in \{\text{МВР}, \text{ЗВР}\}. \end{cases} \quad (14)$$

Замечание. Для ПВР по-прежнему учитываем значение величины $t_{пф}$.

Шаг 4. Определение в множестве J γ -й коммуникации такой, что $V_{\gamma}^{\text{СТ}} = \max_{j \in J} (d_{п} - t_j^{\text{В}}) PS_j$, т. е. такой, пропускная способность которой после восстановления будет максимальной.

Шаг 5. Определение в множестве J s -й коммуникации такой, что $V_s^{CT} = \max_{i \in J, i \neq \Gamma} (d_{\Pi} - t_i^B) PS_i$.

Шаг 6. Выбор $O_{kj} \in M_{\Pi\gamma}$, где $M_{\Pi\gamma}$ — множество разрушенных в d_m -е сутки ЧС объектов γ -й коммуникации, для которого $t_{kj}^B = \max_{O_{m\gamma} \in M_{\Pi\gamma}} t_{m\gamma}^B$ и с предварительно закрепленными в рамках шага 3 за ним ВП.

Шаг 7. Выбор $O_{ps} \in M_{\Pi s}$, где $M_{\Pi s}$ — множество разрушенных в d_m -е сутки ЧС объектов s -й коммуникации, для которого $t_{ps}^B = \max_{O_{ms} \in M_{\Pi s}} t_{ms}^B$ и с предварительно закрепленными в рамках шага 3 за ним ВП.

Шаг 8. В случае наличия общих ВП среди тех ВП, которые были предварительно закреплены за O_{kj} и O_{ps} переходим на шаг 9, в случае отсутствия общих ВП переходим на шаг 10.

Шаг 9. Выполняем замену по указанному ниже условию, общих ВП на объектах O_{kj} и O_{ps} на ВП из множества M_r .

Выберем объект, на котором необходимо осуществить замену общего ВП. Кандидатом на замену этого общего восстановительного поезда r -го вида будет l -й восстановительный поезд, который удовлетворяет условиям 1–4 (табл. 1) шага 3, из множества M_r , возможности которого максимальны, т. е. $VZ_{rlkj} = \max_{m \in M_r} \Pi_{rm} (t_{rkj}^{op} - t_{nr}^{mrkj})$.

После замены общего ВП в множестве M_{zr} на l -й восстановительный поезд проведем расчет t_{rkj}^{op} (формула (9)) и значения $\bar{t}_r^B = \max\{t_r^B, t_{rkj}^{op}\}$ и $V_{\Pi}^{нов} = (d - \bar{t}^B) PS$. Аналогично выполним замену рассматриваемого общего восстановительного поезда на O_{ps} .

При выполнении условия $(V_{\gamma}^{CT} - V_{\gamma}^{нов}) \geq (V_s^{CT} - V_s^{нов})$ замена общего восстановительного поезда необходимо выполнить на O_{ps} , для $(V_{\gamma}^{CT} - V_{\gamma}^{нов}) < (V_s^{CT} - V_s^{нов})$ — на O_{kj} , при этом закрепление нового (l -го) ВП выполняется также предварительно. В рамках данного шага анало-

гичным образом выполняется замена всех имеющих общих ВП для объектов O_{kj} и O_{ps} .

Шаг 10. Если $M_{\Pi s} = \emptyset$ (для s -й коммуникации, объекты, рассмотренные на шаге 7 закончились), то переходим к выполнению операций шага 11, при $M_{\Pi s} \neq \emptyset$ продолжаем в рамках шага 7 обработку объектов этого множества.

Шаг 11. Если $M_{\Pi\gamma} = \emptyset$ (для γ -й коммуникации, объекты, рассмотренные на шаге 6 закончились), то переходим к выполнению операций шага 12, при $M_{\Pi\gamma} \neq \emptyset$ продолжаем в рамках шага 6 обработку объектов этого множества.

Шаг 12. При рассмотрении всех s -х ($s \neq \gamma$) коммуникаций переходим к выполнению операций шага 13, иначе, в рамках шага 5 выбираем следующую коммуникацию, удовлетворяющую условию шага 5.

Шаг 13. Охарактеризуем результаты реализации алгоритма, предшествующие началу выполнения операций данного шага алгоритма.

1. ВП предварительно закреплены за объектами, которые разрушены в течение d_m -х суток ЧС.

2. Общая пропускная (провозная) способность сети железных дорог, в результате этого предварительного закрепления ВП за указанными объектами максимальна.

3. ВП, предварительно закрепленные за объектами $M_{\Pi\gamma}$, закреплены только за этими объектами.

В рамках данного шага:

- закрепляем (выделяем) ВП, указанные в п. 3 этого шага, за объектами (на объекты) множества $M_{\Pi\gamma}$;

- исключаем эти выделенные на объекты $M_{\Pi\gamma}$ ВП из процесса закрепления;

- в дальнейшем γ -ю коммуникацию на шагах 4–12 не рассматриваем.

Шаг 14. Если все коммуникации множества J просмотрены (выделение ВП проведено), алгоритм заканчивает работу (шаг 15), иначе продолжаем выполнение операций шагов 4–14.

Шаг 15. Останов.

Доказательство оптимальности предложенного метода

Для доказательства оптимальности предложенного метода распределения ВП для восстановления разрушенных в результате ЧС регионального масштаба железнодорожных объектов необходимо использовать достаточно простые рассуждения.

Действительно, в рамках каждой из итераций предложенного метода необходимо использовать нижеприведенную итерационную зависимость, корректирующую целевую функцию (1):

$$\begin{aligned} \sum_{j \in J} PS_j(d_{\Pi} - t_j^B) &:= \sum_{j \in J} PS_j(d_{\Pi} - t_j^B) - = \\ &= -\min\{[PS_g(d_{\Pi} - t_g^B) - PS_g(d_{\Pi} - \bar{t}_g^B)], \\ &[PS_s(d_{\Pi} - t_s^B) - PS_s(d_{\Pi} - \bar{t}_s^B)]\}. \end{aligned}$$

Сепарабельность [12] этой формулы позволяет сделать вывод — проводя в рамках каждой итерации, оптимальное распределения ВП для восстановления объектов, которые были разрушены в результате ЧС регионального масштаба, на основе принципа оптимальности Беллмана [13], получим справедливость утверждения: распределение ВП для восстановления объектов, реализуемое предложенным алгоритмом, оптимально в целом.

Как уже было сказано выше, для реализации модели распределения ресурса ВП по железнодорожным объектам, разрушенным в результате ЧС, существует широкий спектр математических методов, основными среди которых для решения задач подобного типа являются методы динамического программирования и ветвей и границ [6, 9].

Однако анализ возможности применения алгоритма ветвей и границ для решения задачи распределения ресурса ВП по железнодорожным объектам, разрушенным в результате ЧС, показал его неэффективность, что связано со значитель-

ной трудоемкостью алгоритма, оцениваемой как $O(4^s)$, где s — размерность задачи, которая определяется по формуле:

$$s = n \cdot z \sum_{j \in M} \sum_{p \in R_{r, kj}} b_{jr},$$

где $M = \{O_j : j = \overline{1, n}\}$ — множество разрушенных в рамках ряда последовательных разрушений железнодорожных объектов, на которые необходимо выделить ВП;

n — число объектов множества M , число;

z — число последовательных разрушений сети железных дорог региона, число;

b_{jr} — фронт восстановительных работ r -го вида на j -м объекте, число.

На основании анализа, проведенного для метода динамического программирования, было установлено, что даже для указанной модели распределения ВП средней размерности ($k = 300-400$) критичность метода к количеству ограничений этой модели, составляющих в среднем 6000–8000 штук, не позволяет использовать в рамках реального масштаба времени деятельности должностных лиц, руководящих восстановлением разрушенных объектов, метод динамического программирования [9].

Несомненный интерес представляет математическая постановка указанной модели, основывающаяся на классической транспортной задаче [9], трудоемкость алгоритма которой определяется как $O(mn^2(\lg(\max_{i,j} \{a_{ri}, b_{rj}\}) + 1))$ [9], где m — количество «поставщиков» ВП, n — количество «потребителей» ВП, a_{ri} — ресурс ВП i -го поставщика r -го вида, b_{rj} — потребность в ВП r -го вида j -го «потребителя» (фронт восстановительных работ r -го вида на j -м объекте). Однако в качестве исходных данных здесь должны использоваться требуемые объемы (интенсивности) пассажирских и грузовых перевозок. Возможность получения такого вида информации для модели

ТАБЛИЦА 2. Сравнительная характеристика методов, реализующих распределение ВП по разрушенным железнодорожным объектам

Размерность задачи (k)	Продолжительность расчетов, мин.		
	Метод ветвей и границ [8]	Метод, основанный на классической транспортной задаче [9]	Предлагаемый метод
135	10	0,5	0,7
189	149	0,8	0,95
270	600	1,4	1,5
405	—	4,2	2,3
540	—	10,1	4,6
674	—	14,9	5,3

данного иерархического уровня является проблематичной.

Все указанные выше причины предопределили необходимость разработки метода моделирования распределения ресурса ВП по железнодорожным объектам, разрушенным в результате ЧС, трудоемкость которого оценивается приблизительно

как $O(n \cdot m \cdot \max_{j,r} b_{jr} + \sum_{j \in M} \sum_{p \in R_{r,kj}} b_{jr})$, что предпо-

читительнее, чем у указанных выше методов.

Результаты моделирования восстановления железнодорожных объектов, разрушенных в результате ЧС регионального масштаба, представлены в табл. 2.

Заключение

Предложен эвристический метод распределения ресурса восстановительных поездов в целях восстановления в минимально возможные сроки железнодорожных объектов, разрушенных в результате ЧС регионального масштаба.

Метод определяет вариант расстановки ВП на разрушенные объекты, реализующий оптимальную величину пропускной (провозной) способности сети железных дорог.

Новизна метода заключается в том, что он, в отличие от существующих методов, за счет предложенной оптимальной схемы выбора объектов,

за которыми должны закрепляться восстановительные поезда, обладает гораздо меньшей трудоемкостью, а следовательно, повышает оперативность принятия решения на восстановление разрушенных объектов.

Библиографический список

1. Vilkov V. B. The choice of an optimal methodology for the retraining organization of psychologists based on the use of mathematical methods / V. B. Vilkov, O. I. Shcherbakova, A. K. Chernykh et al. // *Espacios*. — 2018. — Vol. 39. — № 20. — P. 16.
2. Вилков В. Б. Задачи на графах с нечетко заданными весами: монография / В. Б. Вилков, А. К. Черных, А. В. Флегонтов. — СПб.: Изд. РГПУ им А. И. Герцена, 2018. — 160 с.
3. Черных А. К. Теоретические положения моделирования распределения сил и средств внутренних войск по служебно-боевым задачам / А. К. Черных // *Междисциплинарные исследования в сфере интеграции образования и науки. сборник научных трудов научно-педагогического состава Санкт-Петербургского военного института внутренних войск МВД России*. — СПб., 2014. — С. 151–155.
4. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях / Т. Ху. — М.: Мир, 1974. — 519 с.
5. Вагнер Г. Основы исследования операций / Г. Вагнер. — М.: Мир, 1972. — Т. 1. — 335 с.
6. Вагнер Г. Основы исследования операций / Г. Вагнер. — М.: Мир, 1972. — Т. 2. — 340 с.
7. Вилков В. Б. Применение методов оптимизации при выработке решений в обучении курсантов в образо-

вательных организациях силовых структур / В. Б. Вилков, Л. В. Большакова, А. К. Черных и др. // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. — 2017. — № 2(74). — С. 165–172.

8. Нечепуренко М. И. Алгоритмы и решения задач на графах и сетях / М. И. Нечепуренко, В. К. Попков; под ред. М. И. Нечепуренко. — М.: Наука, 1990. — 513 с.

9. Михалевич В. С. Методы последовательной оптимизации в дискретных сетевых задачах распределения ресурсов / В. С. Михалевич, А. И. Кукса. — М.: Наука, 1983. — 207 с.

10. Ложечников Г. А. Организация восстановления железных дорог: учебник / Г. А. Ложечников, А. С. Низов, Д. И. Попов. — СПб.: ВА МТО, 2014. — 302 с.

11. Григорьев Б. М. Организация восстановления мостов на железных дорогах: учебное пособие / Б. М. Григорьев. — СПб.: ВТУ ЖДВ, 2005. — Ч. 1. — 302 с.

12. Исследование операций: в 2 т. Т. 1 / Под ред. Д. Моудера, С. Элмаграби. — М.: Мир, 1981. — 712 с.

13. Беллман Р. Динамическое программирование и современная теория управления / Р. Беллман, Р. Калаба. — М.: Наука, 1969. — 120 с.

Дата поступления: 14.03.2022

Решение о публикации: 06.06.2022

Контактная информация:

ДЕРГАЧЕВ Алексей Иванович — канд. воен. наук, доц.; d_ader@mail.ru

КУРАНОВА Ольга Николаевна — канд. техн. наук; olga_kuranova@mail.ru

СТЕПАНСКАЯ Ольга Андреевна — канд. техн. наук; step_step@mail.ru

ЧЕРНЫХ Андрей Климентьевич — д-р техн. наук, доц.; nataliachernykh@mail.ru

Modeling the Restoration of Railway Facilities Destroyed As a Result of Emergences of a Regional Scale

A. I. Dergachev¹, O. N. Kuranova¹, A. K. Chernykh²

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

²Saint Petersburg Order of Zhukov Military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation, 1, Letchika Pilyutova str., St. Petersburg, 198206, Russian Federation

For citation: Dergachev A. I., Kuranova O. N., Chernykh A. K. Modeling the Restoration of Railway Facilities Destroyed As a Result of Emergences of a Regional Scale // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 609–617. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-609-617

Summary

Purpose: To obtain analytical dependencies for the optimal allocation of resources of various type recovery trains with the purpose to restore in the shortest possible timeframes of railway facilities destroyed as a result of regional emergences. **Methods:** A heuristic method of optimal resource allocation of various type recovery trains through railway facilities, destroyed as a result of a regional emergences, is applied. Proof of the optimality of the proposed heuristic method is given. **Results:** Within the proposed method frames, new analytical dependencies are derived for the distribution of resources of recovery trains of various types through railway facilities destroyed as a result of regional emergences. Mathematical formulation, based on the formulation of non-linear model of operations research theory, as well as solution algorithm of the task for the distribution of resources of recovery trains of various types through railway facilities destroyed as a result of emergences of a regional scale are given. **Practical significance:** On the basis of the considered dependencies, it is possible to increase the efficiency of calculation operativeness allowing to embody reasonable allocation of recovery trains of various types for the restoration of railway facilities destroyed as a result of regional emergences. The results of the study can be applied to the creation of informational-predicted systems that promptly implement the proposed analytical dependencies for more efficient restoration of railway facilities destroyed as a result of emergences of a regional importance.

Keywords: Resources of recovery trains of various types, model for resource allocation of recovery trains of various types, algorithm for resource allocation, dynamics of recovery train arrival, technologies for performing operation on railway facilities.

References

1. Vilkov V. B., Shcherbakova O. I., Chernykh A. K., Andreev V. P., Khudyakova T. L., Kazakova S. N. The choice of an optimal methodology for the retraining organization of psychologists based on the use of mathematical methods. *Espacios*. 2018, vol. 39, I. 20, p. 16.
2. Vilkov V. B., Chernykh A. K., Flegontov A. V. *Zadachi na grafakh s nechetko zadannymi vesami* [Problems on graphs with fuzzy weights]. St. Petersburg: RGPU im A. I. Gertsena Publ., 2018. 160 p. (In Russian)
3. Chernykh A. K. Teoreticheskie polozheniya modelirovaniya raspredeleniya sil i sredstv vnutrennikh voysk po sluzhebno-boevym zadacham [Theoretical positions of modeling the distribution of forces and means of internal troops for service and combat tasks]. *Mezhdistsiplinarnye issledovaniya v sfere integratsii obrazovaniya i nauki. sbornik nauchnykh trudov nauchno-pedagogicheskogo sostava Sankt-Peterburgskogo voennogo instituta vnutrennikh voysk MVD Rossii* [Interdisciplinary research in the field of integration of education and science. collection of scientific papers of the scientific and pedagogical staff of the St. Petersburg Military Institute of the Internal Troops of the Ministry of Internal Affairs of Russia]. St. Petersburg, 2014, pp. 151–155. (In Russian)
4. Khu T. *Tselochislennoe programmirovaniye i potoki v setyakh* [Integer programming and flows in networks]. Moscow: Mir Publ., 1974. 519 p. (In Russian)
5. Vagner G. *Osnovy issledovaniya operatsiy* [Fundamentals of operations research]. Moscow: Mir Publ., 1972, vol. 1, 335 p. (In Russian)
6. Vagner G. *Osnovy issledovaniya operatsiy* [Fundamentals of operations research]. Moscow: Mir Publ., 1972, vol. 2, 340 p. (In Russian)
7. Vilkov V. B., Bol'shakova L. V., Chernykh A. K., Yakovleva N. A. Primeneniye metodov optimizatsii pri vyrabotke resheniy v obuchenii kursantov v obrazovatel'nykh organizatsiyakh silovykh struktur [Application of optimization methods in the development of solutions in the training of cadets in educational organizations of power structures]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta MVD Rossii* [Bulletin of the St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia]. 2017, I. 2 (74), pp. 165-172. (In Russian)
8. Nechepurenko M. I., Popkov V. K. *Algoritmy i resheniya zadach na grafakh i setyakh* [Algorithms and problem solving on graphs and networks]. Moscow: Nauka Publ., 1990. 513 p. (In Russian)
9. Mikhalevich V. S., Kuksa A. I. *Metody posledovatel'noy optimizatsii v diskretnykh setevykh zadachakh raspredeleniya resursov* [Methods of sequential optimization in discrete network problems of resource allocation]. Moscow: Nauka Publ., 1983. 207 p. (In Russian)
10. Lozhechnikov G. A., Nizov A. S., Popov D. I. *Organizatsiya vosstanovleniya zheleznykh dorog* [Organization of the restoration of railways]. St. Petersburg: VA MTO Publ., 2014. 302 p. (In Russian)
11. Grigor'ev B. M. *Organizatsiya vosstanovleniya mostov na zheleznykh dorogakh* [Organization of the restoration of bridges on railways]. St. Petersburg: VTU ZhDV Publ., 2005. 302 p. (In Russian)
12. *Issledovanie operatsiy* [Operations research]. Moscow: Mir Publ., 1981. 712 p. (In Russian)
13. Bellman R., Kalaba R. *Dinamicheskoe programmirovaniye i sovremennaya teoriya upravleniya* [Dynamic programming and modern control theory]. Moscow: Nauka Publ., 1969. 120 p. (in Russian)

Received: March 14, 2022

Accepted: June 06, 2022

Author's information:

Aleksey I. DERGACHEV — PhD in Military Sciences, Associate Professor; d_ader@mail.ru

Olga N. KURANOVA — PhD in Engineering; olga_kuranova@mail.ru

Olga A. STEPANSKAYA — PhD in Engineering, Associate Professor; step_step@mail.ru

Andrey K. CHERNYKH — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; nataliachernykh@mail.ru

УДК 004.7

Методы оценки качества и проектирования веб-сайтов образовательных организаций

Е. В. Буняева¹, Е. В. Зверева², И. В. Кузнецов¹, А. А. Холодилов¹,
Ю. О. Савватеева²

¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 680021, Хабаровск, ул. Серышева, 47

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

Для цитирования: Буняева Е. В., Зверева Е. В., Кузнецов И. В., Холодилов А. А., Савватеева Ю. О. Методы оценки качества и проектирования веб-сайтов образовательных организаций // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 618–630. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-618-630

Аннотация

Цель: Систематизировать существующие методы оценки качества и проектирования веб-сайтов образовательных организаций. Провести обзор существующих критериев оценки качества веб-сайтов образовательных организаций, их рейтинги. Рассмотреть существующие ограничения при проектировании веб-сайтов образовательных организаций, средства их создания, методы организации их структуры. **Методы:** Анализ существующих рейтингов качества веб-сайтов образовательных организаций, требований к их проектированию со стороны законодательства, а также современных тенденций веб-разработки. Анализ методик организации структуры веб-сайтов. **Результаты:** Сделан вывод о важности качества сайта вуза со стороны содержания, структуры и качества работы в формировании имиджа образовательного учреждения. Предложено комбинирование фолксономического и таксономического подхода при проектировании структуры веб-сайта. Указывается важность использования современных средств разработки для получения возможности расширения функционала сайта. **Практическая значимость:** Предложенные шаги могут позволить на базе сайта создать целостную экосистему, предоставляющую большое число функций для удовлетворения потребностей участников образовательного процесса, а также более качественной доставки информации целевой аудитории.

Ключевые слова: Веб-разработка, образовательные организации, таксономия, фолксономия, рейтинг вуза, рейтинг веб-сайта.

Введение

Сайт, способный в доступной форме предоставить всю необходимую информацию потенциальному клиенту, является одним из важнейших способов представления организации целевой аудитории. Данное утверждение актуально и для высших учебных заведений. Это обуславливается как непосредственно доминированием веб-ресурсов в сфере доставки информации аудитории, так и обширной интеграцией информационных технологий в образовательный процесс.

В последние десятилетия наблюдается тенденция по трансформации сайта вуза в отдельную информационную экосистему, покрывающую множество потребностей студентов и сотрудников университетов. Применение веб-технологий в образовательном процессе показывает хорошие результаты в образовательном процессе, что отмечается в [1]. Цифровизация образовательного сайта позволяет использовать персонализированный подход при организации образовательного процесса, в частности при организации контрольных тестирований, а также при проведении самостоятельной работы студентов, что является важным этапом построения компетентного подхода в образовании [2].

Роль сайта вуза в формировании имиджа образовательной организации

В рамках исследований, представленных в [3–5], указывается, что сайт является важной имиджевой составляющей вуза, а это, в свою очередь, напрямую влияет на его развитие. Авторы [3], проводя сравнительный анализ сайтов вузов, утверждают, что сайт считается наиболее полным источником информации об образовательном учреждении, а также делают вывод о важности приведения сайта вуза к современным требованиям дизайна и структуры. Отмечается важность адаптивности сайта, инфографик для отображения значимой информации. Рассмотренные в

работе сайты являются похожими с точки зрения дизайна и способа отображения основной информации.

К схожим выводам приходят авторы [5], которые отмечают, что успешно функционирующий сайт позволяет университету решить целый комплекс задач — от создания дополнительного канала коммуникации и формирования визуального образа учебного заведения до предоставления информации и услуг. Авторы приводят пример сайта и описывают компоненты его структуры, такие как блок информации об университете, информации абитуриенту, блоки информации о магистратуре, научной деятельности, партнерах вуза и предоставляемых им дополнительных услугах, новостном блоке. Подобную структуру имеют многие сайты высших учебных заведений в мире, что обусловлено как требованиями законодательства стран, так и устоявшимися обычаями в среде образовательных организаций в вопросах разработки и поддержки своих веб-ресурсов.

Другим важным фактором влияния на имидж вуза является качество сайта как сервиса. Так, в работе [6] отмечается снижение уровня репутации сайта в поисковых системах, если он содержит большое количество недостоверных ссылок. Авторы [4] приводят в своем исследовании критерии качества сайтов вузов по версии компании «Интерфакс». К ним относятся: современный дизайн и технологии, 3D-модели, удобство навигации, наличие версий сайтов на иностранных языках и другие. В данной статье делается вывод о важности широкой доступности сайта для общественности.

Кроме того, значимым критерием формирования имиджа является и связь сайта образовательной организации с другими сетевыми ресурсами, в частности с социальными сетями. Так, авторы [7] на основе анкетирования 501 студента и 39 преподавателей указывают, что изучение цифровых следов

студентов на университетских платформах, дополненное изучением их активности в социальных сетях, позволяет разрабатывать образовательное моделирование, направленное на создание более адекватного набора компетенций и мягких навыков выпускника. Это вкпе с интеграцией образовательных организаций в цифровое пространство социальных сетей приводит к улучшению образа организации в глазах целевой аудитории.

Приведенные исследования показывают, что соответствие сайта современным требованиям является одним из важных критериев его привлекательности для целевой аудитории.

Влияние качества сайтов вузов на рейтинги университетов

Привлекательность вуза в глазах целевой аудитории определяется его положением среди других образовательных организаций. Эффективность деятельности вуза в различных областях отражается посредством ряда рейтингов, что отмечается в работах [4, 8]. Наиболее известными из них являются Academic Ranking of World Universities и Times Higher Education World University Rankings. При этом большинство рейтингов не включают в свои критерии качество информационных ресурсов университета.

Одним из рейтингов, освещающих качество сайтов университетов, является Webometrics [9]. Он оценивает качество присутствия вузов в интернете по следующим критериям:

– видимость — количество внешних источников, ссылающихся на страницы учреждения (нормализуется, а затем выбирается максимальное значение);

– прозрачность — количество цитирований для 210 наиболее цитируемых сотрудников университета (за исключением 20 наиболее цитируемых);

– превосходство — количество статей среди 10 % наиболее цитируемых в каждой из всех 27 дисциплин базы данных за пятилетний период.

Представленный рейтинг не отражает качество сайта университета как информационного сервиса, а лишь показывает то, насколько эффективно он представлен в сети. Схожую цель имеет и рейтинг эффективности работы российских вузов с официальными сайтами, представленный Министерством науки и образования Российской Федерации [10], учитывающий такие факторы, как совокупный отчетный трафик за месяц, совокупное время, которое пользователь проводит на сайте, а также количество получаемых отказов.

Авторы рейтинга [11] при оценке сайтов вузов делают больший акцент на их качество, проводя анализ по таким критериям, как скорость загрузки страницы, оптимизация, удобство использования и другие.

В рейтинге образовательных организаций Национального фонда поддержки инноваций в сфере образования [12] сайты вузов оцениваются с точки зрения соответствия требованиям законодательства [13, 14] и методических рекомендаций представления информации об образовательной организации высшего образования [15].

Заметим, что, несмотря на различие подходов к оцениванию сайтов, ряд вузов — НИУ ВШЭ, МГТУ им. Баумана, УрФУ, ТГУ — занимают высшие позиции во всех рейтингах. Это позволяет сделать вывод о том, что сайты вузов, являясь важным фактором их имиджа и бренда, тем не менее являются лишь частью этих комплексных понятий.

Эффективность сайтов вузов может быть оценена с помощью различных методик и критериев.

Критерии мониторинга и показатели оценивания эффективности сайта вуза

Авторы [16] в своей работе выделяют два вида мониторинга сайтов вузов — официальный и общественный: первый предназначен для контроля содержания сайтов с точки зрения требований действующего законодательства, второй

же призван отслеживать информативность сайта вкупе с привлекательностью, удобством, наличием мультимедиа-ресурсов и иных характеристик. Общественный мониторинг позволяет провести оценку не только контента сайта, но также и его оформления. Кроме указанных, авторы предлагают также проводить внутренний мониторинг для вузов с непривлекательным и плохо поддерживаемым сайтом. Такой мониторинг, с их точки зрения, может содержать следующие критерии:

- информационное содержание (полнота, качество и актуальность информации);
- популярность (индекс цитирования, видимость сайта в поисковых системах, средняя посещаемость);
- удобство использования (степень достижения пользователями своих целей при посещении сайта с должной эффективностью);
- дизайн сайта (графическое решение, обеспечивающее пользователя адекватными средствами достижения своих целей);
- техническое решение (группа критериев, отражающая корректность технологической реализации сайта, наличие системы мониторинга сообщений, борьбы со спамом и т. д.) [16].

Мониторинг на уровне образовательной организации призван решать комплекс задач по всем вышеперечисленным показателям, необходимым для клиентоориентированного подхода. Существуют различные подходы к проведению такого мониторинга.

Так, например, в работе [17] предложена методика оценки эффективности сайта вуза. Данная методика включает в себя такие критерии, как своевременность обновления информации на сайте, его дизайн, эргономичность с различной весомостью.

Авторы [18] выделяют такие ключевые показатели качества и эффективности сайта, как число уникальных пользователей, среднее количество просматриваемых посетителями страниц, дина-

мика изменений по соотношению между постоянными пользователями и новыми.

Данные показатели главным образом влияют на продвижение сайта в поисковых системах. Авторами [18] приводится многофакторная модель И. А. Дегтяренко и А. Б. Леонова [19] для оценки удовлетворенности пользователей сайта его наполнением. Для анализа как эмоционального аспекта, так и объективных факторов используются следующие оценочные шкалы:

- шкала эффективности;
- оценка уровня эмоциональной привлекательности ресурса;
- образ результата, который помогает идентифицировать степень полезности сайта;
- шкала оценки образа действий, направленная на определение простоты пользования сервисом;
- анализ взаимосвязей ряда оценочных факторов для определения целостности и полноты образа, выявление дефицитных сфер.

Данная модель помогает выделить сильные и слабые стороны проведенной оптимизации сайта. Еще одним важным пунктом оценки эффективности сайта является его простота и удобство в использовании. Для анализа данного критерия авторы [20] предлагают следующие методы:

- анализ обратной связи посетителей посредством применения таких элементов, как формы для голосования или предоставления отзывов;
- анализ удобства использования сайта с помощью оптимизаторов и фокус-групп;
- мониторинг активности пользователей на основе действий контрольных групп;
- проведение профессиональной экспертизы;
- анализ статистики.

Недостатком данных методов является их большая трудоемкость и высокая временная и материальная затратность. Кроме того, указанные процессы не гарантируют ожидаемого результата с однозначной оценкой. Авторами в качестве аль-

тернативы предложенным методам рассмотрена графическая визуализация шаблона поведения пользователя. Отмечается, что данный метод информативен, прост в реализации и позволяет выявить проблемы с навигацией и контентом на сайте. Основываясь на рассмотренных критериях мониторинга, становится возможным выделить основные требования к сайту вуза.

Группы требований к сайту вуза

При разработке требований к сайту вуза прежде всего учитываются требования 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» [12]. Дополнительно предъявляются Требования к структуре официального сайта образовательной организации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» и формату представления информации [13], а также составлены Методические рекомендации [14], позволяющие спроектировать сайт вуза в соответствии с требованиями законодательства. Данные нормативные акты влияют на информационное наполнение сайта вуза. Однако они не устанавливают ограничений на технические средства их реализации, такие как используемые языки программирования, способы представления сайта на различных устройствах и т. д.

С точки зрения сайта вуза как информационного сервиса к нему предъявляются требования аналогичные сайтам других организаций. Так, авторы [21] выделяют следующие требования к сайту вуза, которые не зависят от специфики направленности университета:

- грамотная композиция текста и изображений на сайте;
- соответствие дизайна сайта последним;
- четкая и интуитивно понятная пользователю навигация;
- возможность перевода языка сайта;
- предоставление возможности использования лицами с ограниченными возможностями здоровья;

– соответствие цветовой палитры и шрифта фирменному стилю.

Данные требования также не ставят ограничения на техническую реализацию сайтов вузов, аспекты которой редко описываются исследователями. Во многом это связано с большим разнообразием технологий, которые могут быть применены при создании.

С другой стороны, при анализе средств разработки сайтов вузов наблюдается консервативный подход, ориентированный на выбор надежных, проверенных технологий в угоду новым, не так сильно зарекомендовавшим себя на рынке.

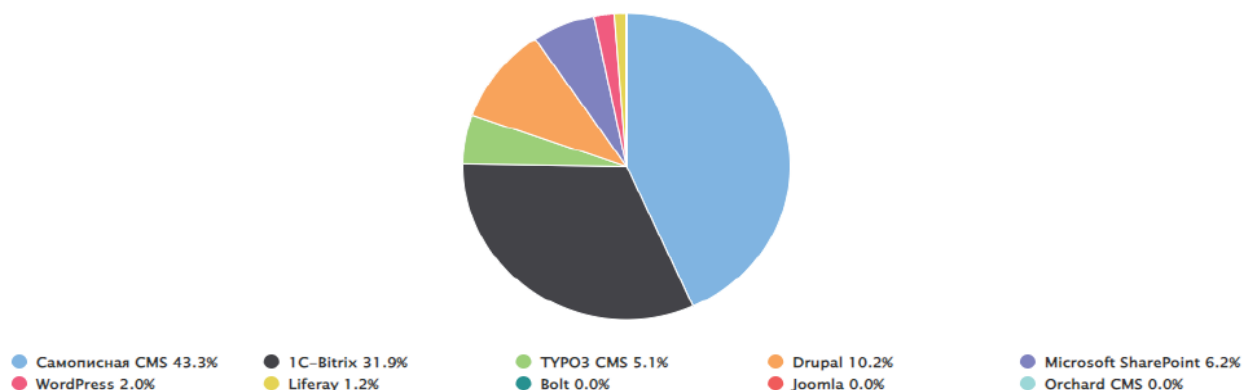
Так, среди двадцати лучших, согласно рейтингу [11] сайтов вузов, тринадцать использует веб-сервер Nginx и одиннадцать использует библиотеку jQuery, в то время как, например, фреймворк Vue.js используют лишь два ресурса. Среди систем управления контентом преобладают самостоятельно разработанные CMS, на втором месте стоит CMS 1С-Bitrix [11] (рисунок).

В современных условиях рассмотренные требования могут быть обобщены к следующим:

- соответствие требованиям законодательства, устанавливаемым перед сайтами образовательных учреждений;
- соответствие требованиям информационной безопасности и защиты персональных данных, установленным законодательством;
- соответствие современным требованиям дизайна веб-ресурсов;
- возможность доступа лицам с ограниченными возможностями;
- интернационализация;
- соответствие требованиям бренда вуза.

Данные требования, как и вышеизложенные, носят общий характер и не накладывают ограничений на использование конкретных средств разработки, однако ставят задачу использовать более современные технологии, что обусловлено возможностью создания более оптимизированного,

Значимость CMS в тематике



Соотношение используемых сайтами вузов CMS

качественного веб-ресурса, соответствующего современным тенденциям развития информационных технологий.

Методы оценки качества сайта

Показатели, описывающие качество веб-сайта, могут быть получены посредством различных методов.

Авторы [22] выделяют следующие методы оценки качества сайтов:

- методы индивидуальных экспертных оценок;
- метод «Да — нет»;
- метод идеального решения;
- метод на основе нейросетевых технологий.

Согласно ГОСТ 28195—89 [23] «Оценка качества программных средств» оценку программных средств можно осуществлять, используя экспертный, расчетный, регистрационный и органолептический метод.

Авторы [24] указывают, что данный стандарт не содержит требований, предъявляемых непосредственно к веб-проектам, но устанавливает общие положения по оценке качества программных средств, что позволяет говорить о возможности применения установленных критериев для оценки сетевых программных продуктов.

На текущий момент рассматриваемые методы оценки качества веб-сайтов могут быть сгруппированы к представленным в ГОСТ. Каждый из них обладает собственными преимуществами и недостатками, определяющими их применимость к оценке веб-сайта. Так, метод индивидуальных экспертных оценок основан на формировании экспертной группы для оценки качества веб-ресурса. Экспертная группа может выносить решение о соответствии сайта тому или иному критерию на основе компетентности экспертов, их опыта и интуиции, следствием чего является субъективность данных методов. Метод «Да — нет» представляет собой способ оценки содержания интернет-ресурса как самого существенного компонента обеспечения его полноты и качества. Сущность его заключается в проверке однозначного соответствия сайта ряду критериев. Данные методы позволяют охватить большое число аспектов наполнения веб-сайта, однако невозможность учета промежуточных состояний ограничивает их применимость. Метод идеального решения основан на расчете интегральных показателей, показывающих разницу показателей работы сайта и некоторого идеального продукта. Данный метод позволяет объединить множество критериев оценки сайта, недостатком же данного

Характеристики рейтингов оценки качества сайтов

Критерий/рейтинг	Webometrics	db-nica	wwwrating	Рейтинг Минобрнауки
Метод оценки качества	расчетный	расчетный	расчетный	расчетный
Оценка содержимого, в том числе на предмет соответствия законодательству	не проводится	проводится на предмет соответствия законодательства в сфере образования	не проводится	не проводится
Оценка структуры сайта	не проводится	не проводится	не проводится	не проводится
Оценка скорости работы сайта	не проводится	не проводится	на основе данных о скорости загрузки страниц сайта	не проводится
Оценка известности сайта	не проводится	на основе ссылок на страницы сайта из внешних источников	на основе данных о числе заходов на сайт, среднем времени проведения на сайте, источниках трафика и др.	не проводится

метода является субъективность в выборе показателей оценки, а также непосредственном выборе идеального продукта. Методы, основанные на применении нейросетевых технологий — в более общем случае, машинного обучения — позволяют проводить анализ веб-сайтов на основе известных входных данных, полученных на результатах других сайтов. Данные методы позволяют провести оценку множества сложных показателей, однако невозможность прослеживания всей цепочки логического вывода, возможность нахождения только субоптимального решения и ограниченность возможности использования вследствие относительно высокой вычислительной стоимости процесса обучения являются значимыми недостатками данных методов. Характеристики рейтингов оценки качества сайтов представлены в таблице.

На основе проведенного авторами анализа методов оценки качества сайтов образовательных организаций видно, что преобладают расчетные методы. Недостаточное внимание уделяется оценкам структуры и производительности сайта. Указанный недостаток может быть решен проведением дополнительной оценки сайта.

Для оценки структуры сайта предлагается использовать комбинированный метод на основе индивидуальных экспертных оценок, анкетирования групп пользователей сайта и расчетные пока-

затели, такие как соотношение успешных и ошибочных действий пользователя на сайте, карты кликов на страницах, время выполнения задач.

При оценке скорости работы сайта предлагается замер скорости загрузки страниц сайта в ходе нагрузочного и стресс-тестирования. В ходе эксплуатации предлагается использование сбора статистики пользователей, посещающих сайт.

Организация структуры сайта образовательной организации

Особую роль при создании сайта образовательной организации занимает организация его структуры. Качественная структура сайта позволяет упростить доступ к запрашиваемой информации, коммуникацию между участниками образовательного процесса, что особенно актуально для активных групп студентов, заинтересованных в ведении дополнительной деятельности — научной, культурной и т. д. — в стенах образовательной организации. Так, авторы [25] на основе опроса 254 студентов указывают, что более половины студентов участвуют в научной деятельности, однако лишь 18 % заявили, что хотели бы посвятить свою жизнь науке, и 84 % респондентов считают, что университеты должны больше вовлекать студентов в исследования. Качественная структура сайта образовательной организа-

ции может предоставить удобную точку систематизированного сбора информации о различных активностях университета, что может позволить заинтересовать большее число студентов для их проведения.

Авторы [8] описывают следующие способы организации контента на сайте вуза:

- таксономия — иерархическая, или древовидная, структура;
- фасетная классификация — применение нескольких независимых классификаций для различных информационных структур сайта;
- фолксономия — совместная категоризация с помощью различных тегов.

В качестве примера таксономии авторами приводится подход в упорядочении содержания по различным видам деятельности вуза, таким как «Наука», «Спорт» и т. д. Недостатком данного подхода является невозможность связывания объекта с несколькими узлами иерархии, что приводит к необходимости жертвовать при описании объекта некоторыми его характеристиками, которые, в свою очередь, могут оказаться значимыми в рамках системы.

Отмечается, что данный метод применялся ранее, однако на текущий момент среди сайтов вузов более часто применяется метод фасетной классификации.

При использовании данного способа на сайте к уже существующей навигации предлагается дополнительная, например по видам целевой аудитории. Такой способ классификации, по мнению авторов, позволяет увеличить скорость поиска информации и повысить удобство его использования. Однако данное решение не является современным. Данный метод частично исправляет недостатки таксономии, однако делает это не в полном объеме. Еще одним недостатком фасетной классификации наряду с таксономией является сложность создания интерактивного информационного окружения вуза, при

котором изменение одних компонентов информационной системы приведет к изменению других, связанных с ней.

В настоящее время наблюдается рост популярности подхода к упорядочению контента на сайте самими пользователями — так называемая фолксономия. Достоинством этого метода является достижение гибкости классификации представленной на сайте информации. Однако этот метод не позволяет организовать однозначную иерархию объектов по причине отсутствия элементарных отношений (род — вид) между ними. По этой причине становится невозможным выделить объекты, носящие более общий или более частный характер.

На основании этого можно сделать вывод о том, что оптимальным является сочетание представленных подходов. Это позволяет построить более удобную семантическую навигацию. Так, основная информация об образовательной организации — такая, как ее структура, контактная информация и т. д. — может быть описана посредством таксономического либо фасетного подхода и являться статическим, слабо изменяющимся в зависимости от времени ядром информационного ресурса. Данные, которые обладают большей динамикой изменений (новости и объявления), а также имеющие многоплановый характер (научно-популярные статьи), могут быть рассмотрены посредством фолксономического подхода. Этот подход может позволить отойти от построения сайта вуза в форме справочника.

Выводы

В результате проведенного исследования сделан вывод о том, что оптимальным решением для формирования структуры сайта образовательного учреждения является комбинированное применение таксономии и фолксономии при формировании его структуры. Общую информацию, раскрывающую деятельность учреждения,

связанную с его историей и другими ключевыми аспектами, предлагается размещать в раздел для поступающих. Учебно-методические материалы и информацию организационного характера следует размещать в разделе для обучающихся. Главная страница должна содержать информацию об учреждении с указанием основных моментов, раскрывающих особенности его функционирования.

Для оценки структуры сайта предлагается дополнить существующие методы экспертными оценками и автоматическим сбором пользовательской статистики для оценки структуры и скорости работы.

Сайт должен соответствовать требованиям законодательства, а также современным требованиям работы информационных сервисов с точки зрения функциональных возможностей и дизайна.

Сайты подразделений должны быть в достаточной мере связаны с основным сайтом учреждения и друг с другом. Это позволит сформировать целостную экосистему, в рамках которой изменение каждого отдельного элемента может происходить автономно, не затрагивая другие модули, но при этом обеспечить разностороннее развитие сайта вуза как разнопланового информационного центра. При этом, поскольку сайт подразделения является частью общего информационного сервиса, для пользователя может быть обеспечен простой доступ к услугам и данным различных подразделений, что существенно упростит его работу в рамках общего сервиса учреждения.

Библиографический список

1. Kuznetsova I. V. Web-technologies in knowledge integration as a means of mathematical literacy forming of school students (2021) / I. V. Kuznetsova, E. A. Blagoveshchenskaya, S. V. Napalkov et al. // Journal of the Balkan Tribological Association. — № 27(5). — Pp. 881–897.
2. Зверева Е. В. Профессиональные образовательные стандарты третьего поколения 3++ как инструмент в совершенствовании компетентностного подхода обучения / Е. В. Зверева // Общество, педагогика, психология: актуальные исследования: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с межд. участием (Чебоксары, 1 окт. 2021 г.). — Чебоксары: ИД «Среда», 2021. — С. 187–190.
3. Колосова В. В. Социально-психологические аспекты восприятия имиджа вуза в современном информационном обществе / В. В. Колосова, М. В. Прохорова // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Серия: Социальные науки. — 2014. — № 2(34). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sotsialno-psihologicheskie-aspekty-vospriyatiya-imidzha-vuza-v-sovremennom-informatsionnom-obschestve> (дата обращения: 27.03.2022).
4. Сапрыкина И. Э. Влияние сайта университета на его положение в мировых рейтингах / И. Э. Сапрыкина // Общество: социология, психология, педагогика. — 2018. — № 8. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-sayta-universiteta-na-ego-polozhenie-v-mirovyh-reytingah> (дата обращения: 27.03.2022).
5. Айтмагамбетова М. Б. Роль сайта в формировании имиджа вуза (на примере сайта Инновационного Евразийского университета Павлодара) / М. Б. Айтмагамбетова // Вестник Омского государственного педагогического университета. Гуманитарные исследования. — 2015. — № 1(5). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-sayta-v-formirovanii-imidzha-vuza-na-primere-sayta-innovatsionnogo-evraziyskogo-universiteta-pavlodara> (дата обращения: 27.03.2022).
6. Привалов А. Н. К вопросу анализа внешних ссылок и встраиваемых элементов на веб-сайтах / А. Н. Привалов, В. А. Смирнов, Ю. И. Богатырева // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2021. — № 5. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-analiza-vneshnih-ssylok-i-vstraivaemyh-elementov-na-veb-saytah> (дата обращения: 27.03.2022).
7. Pozdeeva E. Assessment of online environment and digital footprint functions in higher education analytics / E. Pozdeeva, O. Shipunova, N. Popova // Education Sciences. — 2021. — Vol. 11(6). — № 256.
8. Фещенко А. В. Веб-сайт университета в современном информационно-коммуникационном пространстве / А. В. Фещенко // Гуманитарная информатика. — 2009. — № 5. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/veb-sayt-universiteta-v-sovremennom-informatsionno-kommunikatsionnom-prostranstve> (дата обращения: 27.03.2022).
9. Ranking Web of Universities. — URL: www.webometrics.info/en (дата обращения: 28.02.2022).
10. Минобрнауки России представило рейтинг медийной активности высших учебных заведений. — URL: www.minobrnauki.gov.ru/press-center/news/?ELEMENT_ID=39066 (дата обращения: 28.02.2022).

11. Рейтинг сайтов вузов на основе BIG DATA. — URL: www.wwwrating.com/top/education/university/ (дата обращения: 28.02.2022).
12. Рейтинг сайтов образовательных учреждений 2022. Spider VIKON. — URL: www.db-nica.ru/ratings/rejting-sajtov-obrazovatelnykh-organizacij (дата обращения: 28.02.2022).
13. Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ. — URL: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174/ (дата обращения: 28.02.2022).
14. Требования к структуре официального сайта образовательной организации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» и формату представления информации. — URL: www.docs.cntd.ru/document/565780511?marker=6540IN (дата обращения: 28.02.2022).
15. Методические рекомендации представления информации об образовательной организации высшего образования в открытых источниках с учетом соблюдения требований законодательства в сфере образования. — URL: www.db-nica.ru/documents/actual_metod_recomendation_2021.pdf (дата обращения: 28.02.2022).
16. Баинова О. А. О мониторинге официальных сайтов высших учебных заведений / О. А. Баинова // Вестник БГУ. Экономика и менеджмент. — 2014. — № 3. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-monitoringe-ofitsialnyh-sajtov-vysshih-uchebnyh-zavedeniy> (дата обращения: 27.03.2022).
17. Сорокина Ю. В. Оценка эффективности государственных сайтов ведущих вузов Ростовской области / Ю. В. Сорокина, В. В. Баклакова // Science Time. — 2014. — № 9(9). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-gosudarstvennyh-sajtov-veduschih-vuzov-rostovskoy-oblasti> (дата обращения: 27.03.2022).
18. Муратова Е. А. Методы внутренней и внешней поисковой оптимизации сайта / Е. А. Муратова // Московский экономический журнал. — 2019. — № 9. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-vnutrennei-i-vneshnei-poiskovoi-optimizatsii-sai-ta> (дата обращения: 27.03.2022).
19. Дегтяренко И. А. Методика оценки удовлетворенности пользователей интерфейсом интернет-сайта / И. А. Дегтяренко, И. В. Бурмистров, А. Б. Леонова // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. — 2010. — № 1. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-otsenki-udovletvorennosti-polzovateley-interfeysov-internet-sayta> (дата обращения: 27.03.2022).
20. Абрамова О. Ф. Визуализация паттерна поведения пользователя web-системы / О. Ф. Абрамова // Кибернетика и программирование. — 2019. — № 3. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vizualizatsiya-patterna-povedeniya-polzovatelya-web-sistemy> (дата обращения: 27.03.2022).
21. Жаркова О. Р. Анализ современных тенденций web-дизайна для повышения конкурентоспособности информационных ресурсов учреждений высшего образования / О. Р. Жаркова, Т. И. Белая // Наука, образование и культура. — 2017. — № 5(20). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sovremennyh-tendentsiy-web-dizayna-dlya-povysheniya-konkurentosposobnosti-informatsionnyh-resursov-uchrezhdeniy-vysshego> (дата обращения: 27.03.2022).
22. Царева Т. Н. Аналитический обзор методов оценивания качества интернет-сайтов / Т. Н. Царева // Вестник МГУЛ — Лесной вестник. — 2007. — № 4. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskiy-obzor-metodov-otsenivaniya-kachestva-internet-saytov> (дата обращения: 20.05.2022).
23. ГОСТ 28195—89. Оценка качества программных средств. Общие положения. — М., 1990, 31 с.
24. Кубашева Е. С. Методы оценки качества веб-приложений / Е. С. Кубашева, А. Г. Гаврилов // Программные системы и вычислительные методы. — 2013. — № 1(2). — 7 с.
25. Shipunova O. Young Students' Attitude Toward Expert Knowledge / O. Shipunova, E. Pozdeeva, L. Evseeva // Lecture Notes in Networks and Systems. — 2021. — № 184. — Pp. 391–400.

Дата поступления: 20.04.2022

Решение о публикации: 29.05.2022

Контактная информация:

ЗВЕРЕВА Елена Валерьевна — канд. экон. наук, доц. кафедры «Экономика и менеджмент в строительстве»; zverelv@mail.ru

БУНЯЕВА Екатерина Викторовна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Вычислительная техника»; vitsk@inbox.ru

КУЗНЕЦОВ Иван Владимирович — преподаватель кафедры «Вычислительная техника»; ivankuznetsov@festu.khv.ru

ХОЛОДИЛОВ Александр Андреевич — старший преподаватель кафедры «Вычислительная техника»; kholodilovsapr@gmail.com

САВВАТЕЕВА Юлия Олеговна — студент; yuliasavvateeva@gmail.com

Website Quality Assessment and Website Design Methods for Educational Organizations

E. V. Bunyaeva¹, E. V. Zvereva², I. V. Kuznetsov¹, A. A. Kholodilov¹, Yu. O. Savvateeva²

¹Far Eastern State Transport University, 47, Seryshev St., Khabarovsk, 680021, Russian Federation

²Emperor Alexander I Transport State University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 199031, Russian Federation

For citation: Bunyaeva E. V., Zvereva E. V., Kuznetsov I. V., Kholodilov A. A., Savvateeva Yu. O. Website Quality Assessment and Website Design Methods for Educational Organizations // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 618–630. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-618-630

Purpose: To systemize existing methods for quality assessment and design of websites of educational organizations. To conduct a review of existing criteria for quality assessment of educational organization websites, their ratings. To consider existing restrictions in the design of educational organization web-sites, the means for their creation and their structure organization methods. **Methods:** Analysis of existing quality ratings of educational organization web-sites, requirements for their design from legislation view as well as of up-to-date trends of web-design. Analysis of methods of web-site structure organization. **Results:** Conclusion was made on the quality importance of university website in terms of a content, structure and working quality for shaping educational institution image. Combining folksonomic and taxonomic approaches is proposed at structure design of website. The importance of using modern design tools to get a possibility for web-site functionality expansion is indicated. **Practical significance:** The proposed steps can allow to create a comprehensive ecosystem on web-site basis which providing for a big number of functions to satisfy educational process participants' needs as well as better qualitative delivery of information to target audience.

Keywords: Web design, educational organizations, taxonomy, folksonomy, university rankings, website rankings.

References

1. Kuznetsova I. V., Blagoveshchenskaya E. A., Napalkov S. V., Smirnov E. I., Tikhomirov S. A., Troshina T. L. Web-technologies in knowledge integration as a means of mathematical literacy forming of school students. *Journal of the Balkan Tribological Association*. 2021, 27 (5), pp. 881–897.
2. Zvereva E. V. Professional'nye obrazovatel'nye standardy tret'ego pokoleniya 3++ kak instrument v sovershenstvovanii kompetentnostnogo podkhoda obucheniya [Professional educational standards of the third generation 3++ as a tool in improving the competence-based approach to teaching]. *Obshchestvo, pedagogika, psikhologiya: aktual'nye issledovaniya: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhd. uchastiem (Cheboksary, 1 okt. 2021 g.)* [Society, Pedagogy, Psychology: Actual Research: materials of Vseros. scientific-practical. conf. from int. participation (Cheboksary, October 1, 2021)]. Cheboksary: «Sreda» Publ., 2021, pp. 187–190. (In Russian)
3. Kolosova V. V., Prokhorova M. V. Sotsial'no-psikhologicheskie aspekty vospriyatiya imidzha vuza v sovremennom informatsionnom obshchestve [Socio-psychological aspects of the perception of the image of the university in the modern information society]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo. Seriya: Sotsial'nye nauki* [Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N. I. Lobachevsky. Series: Social Sciences]. 2014, I. 2 (34). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sotsialno-psikhologicheskie-aspekty-vospriyatiya-imidzha-vuza-v-sovremennom-informatsionnom-obshchestve> (accessed: March 27, 2022). (In Russian)
4. Saprykina I. E. Vliyanie sayta universiteta na ego polozhenie v mirovykh reytingakh [Influence of the univer-

city website on its position in world rankings]. *Obshchestvo: sotsiologiya, psikhologiya, pedagogika* [Society: sociology, psychology, pedagogy]. 2018, I. 8. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-sayta-universiteta-na-egopolozhenie-v-mirovyh-reytingah> (accessed: March 27, 2022). (In Russian)

5. Aytmagambetova M. B. Rol' sayta v formirovanii imidzha vuza (na primere sayta Innovatsionnogo Evraziyskogo universiteta Pavlodara) [The role of the site in shaping the image of the university (on the example of the site of the Innovative Eurasian University of Pavlodar)]. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Gumanitarnye issledovaniya* [Bulletin of the Omsk State Pedagogical University. Humanitarian research]. 2015, I. 1 (5). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-sayta-v-formirovanii-imidzha-vuza-na-primere-sayta-innovatsionnogo-evraziyskogo-universiteta-pavlodara> (accessed: March 27, 2022). (In Russian)

6. Privalov A. N., Smirnov V. A., Bogatyreva Yu. I. K voprosu analiza vneshnikh ssylok i vstraivaemykh elementov na veb-saytakh [On the issue of analyzing external links and embedded elements on websites]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya TulGU. Technical science]. 2021, I. 5. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-analiza-vneshnih-ssylok-i-vstraivaemykh-elementov-na-veb-saytah> (accessed: March 27, 2022). (In Russian)

7. Pozdeeva E., Shipunova O., Popova N., Evseev V., Evseeva L., Romanenko I., Mureyko L. Assessment of online environment and digital footprint functions in higher education analytics (2021) *Education Sciences*, 11 (6), I. 256.

8. Feshchenko Artem Viktorovich Veb-sayt universiteta v sovremennom informatsionno-kommunikatsionnom prostranstve [Website of the university in the modern information and communication space]. *Gumanitarnaya informatika* [Humanitarian informatics]. 2009, I. 5. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/veb-sayt-universiteta-v-sovremennom-informatsionno-kommunikatsionnom-prostranstve> (accessed: March 27, 2022). (In Russian)

9. Ranking Web of Universities, Available at: www.webo-metrics.info/en (accessed: February 28, 2022).

10. *Minobrnauki Rossii predstavilo reyting mediynoy aktivnosti vysshikh uchebnykh zavedeniy* [The Ministry of Education and Science of Russia has presented a rating of media activity of higher educational institutions,]. Available at: www.minobrnauki.gov.ru/press-center/news/?ELEMENT_ID=39066 (accessed: February 28, 2022). (In Russian)

11. *Reyting saytov vuzov na osnove BIG DATA* [Rating of university websites based on BIG DATA,]. Available at: www.wrating.com/top/education/university/ (accessed: February 28, 2022). (In Russian)

12. *Federal'nyy zakon "Ob obrazovanii v Rossiyskoy Federatsii" ot 29.12.2012 N 273-FZ* [Federal Law "On Education in the Russian Federation" dated December 29, 2012 N 273-FZ]. Available at: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174/ (accessed: February 28, 2022). (In Russian)

13. *Trebovaniya k strukture ofitsial'nogo sayta obrazovatel'noy organizatsii v informatsionno-telekommunikatsionnoy seti "Internet" i formatu predstavleniya informatsii* [Requirements for the structure of the official website of an educational organization in the information and telecommunications network "Internet" and the format for presenting information]. Available at: www.docs.cntd.ru/document/565780511?marker=6540IN (accessed: February 28, 2022). (In Russian)

14. *Metodicheskie rekomendatsii predstavleniya informatsii ob obrazovatel'noy organizatsii vysshego obrazovaniya v otkrytykh istochnikakh s uchetom soblyudeniya trebovaniy zakonodatel'stva v sfere obrazovaniya* [Guidelines for presenting information about an educational organization of higher education in open sources, taking into account compliance with the requirements of legislation in the field of education]. Available at: www.db-nica.ru/documents/actual_metod_recomendation_2021.pdf (accessed: February 28, 2022). (In Russian)

15. *Reyting saytov obrazovatel'nykh uchrezhdeniy 2022 | Spider VIKON* [Rating of websites of educational institutions 2022 | Spider VIKON]. Available at: www.db-nica.ru/ratings/rejting-sajtov-obrazovatelnykh-organizacij (accessed: February 28, 2022). (In Russian)

16. Bainova O. A. O monitoringe ofitsial'nykh saytov vysshikh uchebnykh zavedeniy [On monitoring the official websites of higher educational institutions]. *Vestnik BGU. Ekonomika i menedzhment* [Bulletin of BSU. Economics and Management]. 2014, I. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-monitoringe-ofitsialnyh-saytov-vysshih-uchebnyh-zavedeniy> (accessed: March 27, 2022). (In Russian)
17. Sorokina Yu. V., Baklakova V. V. *Otsenka effektivnosti gosudarstvennykh saytov vedushchikh vuzov Rostovskoy oblasti* [Evaluation of the effectiveness of state websites of leading universities in the Rostov region]. *Science Time*. 2014, I. 9 (9). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-gosudarstvennykh-saytov-vedushchih-vuzov-rostovskoy-oblasti> (accessed: March 27, 2022). (In Russian)
18. Muratova E. A. Metody vnutrennei i vneshnei poiskovoi optimizatsii saita [Methods of internal and external search engine optimization of the site]. *Moskovskiy ekonomicheskiy zhurnal* [Moscow Economic Journal]. 2019, I. 9. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-vnutrennei-i-vneshnei-poiskovoi-optimizatsii-sai-ta> (accessed: March 27, 2022). (In Russian)
19. Degtyarenko I. A., Burmistrov I. V., Leonova A. B. Metodika otsenki udovletvorennosti pol'zovateley interfeysom internet-sayta [Methodology for assessing user satisfaction with the Internet site interface]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 14. Psikhologiya* [Bulletin of Moscow University. Series 14. Psychology.]. 2010, I. 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-otsenki-udovletvorennosti-polzovateley-interfeysom-internet-sayta> (accessed: March 27, 2022). (In Russian)
20. Abramova O. F. Vizualizatsiya patterna povedeniya pol'zovatelya web-sistemy [Visualization of the web-system user behavior pattern]. *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and Programming]. 2019, I. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vizualizatsiya-patterna-povedeniya-polzovatelya-web-sistemy> (accessed 27 March 2022). (In Russian)
21. Zharkova O. R., Belaya T. I. Analiz sovremennykh tendentsiy web-dizayna dlya povysheniya konkurentosobnosti informatsionnykh resursov uchrezhdeniy vysshego obrazovaniya [Analysis of modern trends in web design to improve the competitiveness of information resources of higher education institutions]. *Nauka, obrazovanie i kul'tura* [Science, education and culture]. 2017, I. 5 (20). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sovremennyh-tendentsiy-web-dizayna-dlya-povysheniya-konkurentosobnosti-informatsionnyh-resursov-uchrezhdeniy-vysshego> (accessed: March 27, 2022). (In Russian)
22. Tsareva T. N. Analiticheskiy obzor metodov otsenivaniya kachestva internet-saytov [Analytical review of methods for evaluating the quality of Internet sites]. *Vestnik MGUL — Lesnoy vestnik* [Vestnik MGUL — Forest Bulletin]. 2007, I. 4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskiy-obzor-metodov-otsenivaniya-kachestva-internet-saytov> (accessed: May 20, 2022). (In Russian)
23. *GOST 28195—89 Otsenka kachestva programmnykh sredstv. Obshchie polozheniya* [GOST 28195—89 Software quality assessment. General provisions]. Moscow, 1990, 31 p. (In Russian)
24. Kubasheva E. S. Metody otsenki kachestva veb-prilozheniy [Methods for assessing the quality of web applications]. *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody* [Program systems and computational methods]. 2013, I. 1(2). 7 p. (In Russian)
25. Shipunova, O., Pozdeeva, E., Evseeva, L., Mureyko, L. V. Young Students' Attitude Toward Expert Knowledge. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021, I. 184, pp. 391–400.

Received: April 20, 2022

Accepted: May 29, 2022

Author's information:

Elena V. ZVEREVA — PhD in Economics, Associate Professor, “Economics and Management in Construction” Department; zverelv@mail.ru

Ekaterina V. BUNYAEVA — PhD in Engineering, Associate Professor, “Computation Technique” Department; vitsk@inbox.ru

Ivan V. KUZNETSOV — Lecturer, “Computation Technique” Department; ivankuznetsov@festu.khv.ru

Alexander A. KHOLODILOV — Senior Lecturer, “Computation Technique” Department; kholodilovsapr@gmail.com

Yulia O. SAVVATEEVA — Student; yuliasavvateeva@gmail.com

УДК 624.016

Гибридные конструкции балок на транспорте с применением металла и композитов

В. В. Веселов

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

Для цитирования: *Веселов В. В.* Гибридные конструкции балок на транспорте с применением металла и композитов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 631–638. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-631-638

Аннотация

Цель: Выполнить анализ возможного применения гибридных и комбинированных конструкций для перекрытий зданий и сооружений гражданского и промышленного назначения, в том числе на транспорте, расширить номенклатуру балочных конструкций, разработать инновационное конструктивное решение гибридной балки, обладающее низкой материалоемкостью при повышенной надежности и долговечности конструкции. **Методы:** Анализ преимуществ известных гибридных конструкций, применяемых для их проектирования материалов, расчет металлокомпозитной балки с применением существующих инженерных методик по СТО 38276489.003-2017 «Усиление стальных конструкций композитными материалами. Проектирование и технология производства работ» и численных методов расчета с привлечением расчетных программ. **Результаты:** Приводятся новые разработки балок с применением сталебетона и композитных материалов для проектируемых и усиливаемых конструкций. Разработана инновационная конструкция металлокомпозитной балки — стальная балка, усиленная системой внешнего армирования из композитного материала, защищаемая патентом на полезную модель, выполнен ее статический и конструктивный расчет с привлечением вычислительного комплекса SCAD, проанализированно напряженно-деформированное состояние, произведен анализ снижения расхода стали металлокомпозитной балки и других ее преимуществ в сравнении с традиционными решениями балок из стали и железобетона. **Практическая значимость:** Выявлены преимущества гибридных и комбинированных конструкций, выявлено снижение материалоемкости металлокомпозитной балки, усиленной боропластиком, в сравнении со стальной. Предложенное конструктивное решение балки может быть использовано в перекрытиях и покрытиях зданий и сооружений, транспортных сооружениях, особенно в условиях агрессивной окружающей среды, а также при капитальном ремонте и реконструкции объектов промышленного и гражданского назначения.

Ключевые слова: Здание, сооружение, гибридная конструкция, балка перекрытия, металлокомпозитная балка, численный расчет, надежность, долговечность.

Введение

Гибридные и комбинированные конструкции из сталебетона, сталежелезобетона все чаще применяются в каркасах зданий и транспортных сооружениях [1], в том числе с использованием бионического подхода [2]. Применение подобных конструкций позволяет снизить расход стали, массу несущей конструкции объекта, трудоемкость ее изготовления при повышении надежности и долговечности. Весьма перспективным направлением по совершенствованию несущих элементов зданий и сооружений являются гибридные конструкции с применением композитов, в частности железобетонные и металлические конструкции с системами внешнего армирования из композитных сеток, холстов или ламинатов [3–5].

Номенклатура гибридных и комбинированных конструкций в России и мировой практике строительства развита пока недостаточно. На кафедре «Строительные конструкции, здания и сооружения» ПГУПС ведутся разработки гибридных сталебетонных, сталефибробетонных и металлокомпозитных балочных конструкций [6, 7].

Практическое применение и результаты

Применение гибридных сталебетонных конструкций эффективно преимущественно в сжатых элементах: колоннах, стойках, опорах, сжатых частях балок и ферм, подкрановых балок, рамных и арочных конструкций. При этом бетон иногда можно располагать и в растянутых частях конструкций, но с учетом обжатия бетона за счет его предварительного напряжения [8]. Разработан целый ряд комбинированных балочных конструкций зданий и сооружений с применением сталебетона, которые запатентованы при участии автора [8–10]. В отдельных случаях под тяжелую транспортную нагрузку возможно применение сталефибробетона, позволяющего существенно повысить трещиностойкость бетона при отсутствии стержневой предварительно напряженной арматуры [11].

Применение металлокомпозитных конструкций для балок может быть эффективно в агрессивных условиях эксплуатации и большом расходе стали. Кроме того, применение композитов может быть рационально в качестве усиления эксплуатируемых конструкций, которые недопустимо ослаблять при ремонте сваркой или отверстиями под болты. Выполнен поиск конструктивных решений гибридных балок, в том числе разработанных на кафедре «Строительные конструкции, здания и сооружения» ПГУПС [12]. При участии автора предложена инновационная металлокомпозитная балка, защищаемая патентным решением [13].

Предлагаемая балка состоит из стенки, верхнего и нижнего поясов, которые составлены в двутавровое поперечное сечение и выполнены из листовой тонкостенной стали, балка может иметь несимметричное поперечное сечение с более развитым верхним поясом для повышения устойчивости балки и компенсации низкой прочности композита на сжатие, к поверхности стенки и поясов по всему периметру элементов приклеена композитная ткань при помощи эпоксидного клея, при этом стенка и пояса имеют перфорацию по всей площади элементов (рис. 1). Композитная ткань, приклеенная к поверхности поясов, может иметь увеличенную толщину в виде накладки в средней части по длине балки, где возникают максимальные нормальные напряжения от приложенных нагрузок. Композитная ткань, приклеенная к поверхности стенки, может иметь увеличенную толщину в виде поперечных ребер (например, композитных уголков), расположенных с равномерным шагом по длине балки, что обеспечивает местную устойчивость тонкой стенки.

В качестве композитного материала предлагается использовать полимерную основу, усиленную углеродными волокнами (углепластик) или борными волокнами (боропластик). Борные волокна обладают высокой чувствительностью к концентраторам напряжений, чем объясняется

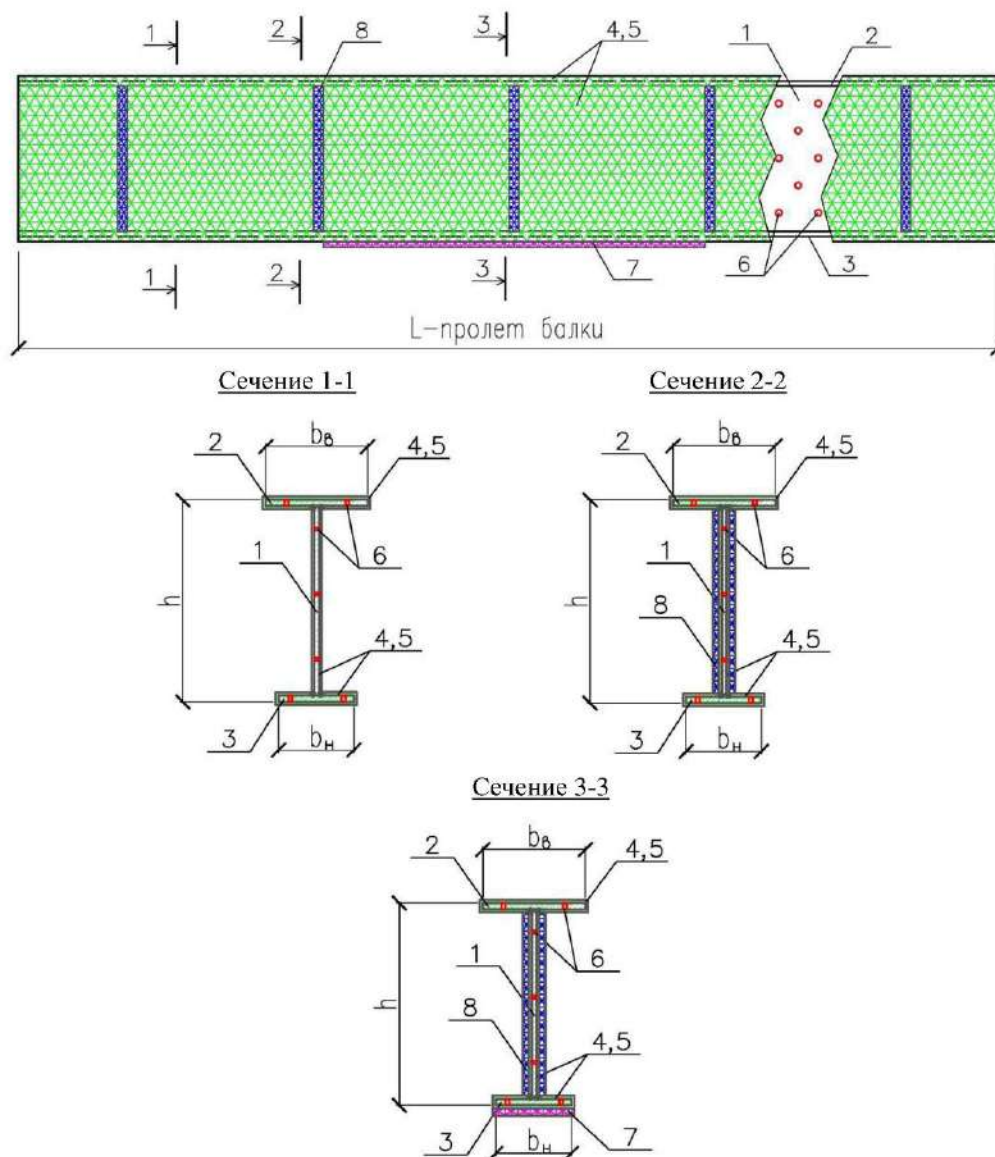


Рис. 1. Конструкция металлокомпозитной балки:
 1 — стальная стенка, 2 — стальной верхний пояс, 3 — стальной нижний пояс,
 4 — композитная ткань, 5 — слой эпоксидного клея, 6 — перфорация, 7 — накладка,
 8 — поперечное ребро

их большая прочность как при сжатии, так и при растяжении [14]. Волокна бора выпускаются в виде моноволокон, комплексных нитей и лент.

Наличие композитной ткани с эпоксидным клеем на поверхности стенки и поясов повышает местную устойчивость элементов, несущую способность балки в целом, снижает расход стали и, как следствие, снижает материалоемкость балки.

Наличие композитной ткани с эпоксидным клеем на поверхности стенки и поясов также защищает элементы балки от коррозионного износа, уменьшает эксплуатационные расходы на восстановление защитного покрытия балки и повышает ее эксплуатационную надежность.

Наличие перфораций на поверхности стенки и поясов (рис. 1) обеспечивает надежное сцепле-

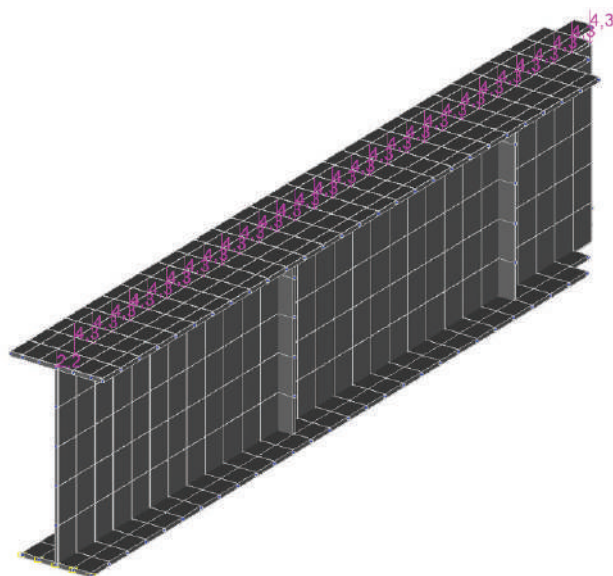


Рис. 2. Фрагмент расчетной модели балки в BK SCAD, КН

ние композитной ткани и эпоксидного клея с элементами балки, что повышает эксплуатационную надежность балки.

Наличие наклейки на поверхности композитной ткани с эпоксидным клеем на наиболее напряженном по длине участке балки (рис. 1) повышает несущую способность нижнего пояса, снижает расход стали на балку в целом и, как следствие, снижает материалоемкость балки.

Наличие поперечных ребер, приклеенных к поверхности композитной ткани по всей длине балки с равномерным шагом (рис. 1), повышает местную устойчивость стенки, снижает расход стали на балку в целом и, как следствие, снижает материалоемкость балки.

Несущая способность металлокомпозитной балки обеспечивается подбором марки стали, состава композита, размеров поперечного сече-

ния балки и ее элементов. Расчеты предлагаемой металлокомпозитной балки были выполнены с применением методики для подобных конструкций по СТО 38276489.003—2017 и численным моделированием в вычислительном комплексе BK SCAD (рис. 2). Все элементы балки моделировались пластинчатыми конечными элементами с размерами ячеек до 0,1–0,2 м.

Основные параметры рассчитываемой металлокомпозитной балки: пролет — 12 м, высота сечения — 675 мм, сечение стальной стенки — 663×6 мм, сечение стальных поясов — 260×11 мм, сталь марки С235, толщина композита на основной площади — 1,5 мм, толщина композита на поясах в наиболее нагруженных зонах — 3 мм, сечение композитных поперечных ребер — уголки 65×5 мм с шагом по длине балки — 1,2 м, материал композита — боропластик (плотность $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $E = 250 \text{ ГПа}$, предел прочности при сжатии/растяжении/изгибе $R = 60/1300/1750 \text{ МПа}$) [15].

На рис. 3–5 приведены результаты расчета металлокомпозитной балки (деформации балки и поля основных напряжений). В таблице в качестве сравнительного анализа приведены весовые показатели и значения напряжений для стальной прокатной и предлагаемой металлокомпозитной балок.

По результатам расчетов балки, усиленной композитом, удалось уменьшить толщины стальной стенки и поясов при некотором увеличении касательных напряжений в стенке, что не является критичным, учитывая существенный запас напряжений в стенке и обеспеченную местную устойчивость за счет ребер жесткости.

Сравнительный анализ балок

Вариант балки	Нормальные напряжения в стальных поясах σ_y , МПа	Касательные напряжения в стальной стенке τ , МПа	Вес балки, т
Стальная балка (двутавр 70 Б1)	224,2 < 230	29,4 < 133	1,55
Металлокомпозитная балка $h = 675 \text{ мм}$	229,8 < 230	57,9 < 133	1,04



Установлено, что металлокомпозитная балка в сравнении с металлической имеет более низкий вес, разница составляет 32 % при экономии стали на 25 % и снижении эксплуатационных затрат.

Заключение

Разработан ряд несущих гибридных сталебетонных и металлокомпозитных балочных конструкций для перекрытий зданий и сооружений, в том числе на транспорте. Предложено инновационное конструктивное решение металлокомпозитной балки, запатентованное при участии автора. Выполнен расчет балки по действующим методикам с использованием численных методов расчета. Рассмотренный вариант металлокомпозитной балки позволил уменьшить толщину стальных элементов балки, тем самым добиться снижения расхода стали, как следствие, ее веса. По предварительной экономической оценке стоимость металлокомпозитной балки будет несколько выше при существенном увеличении ее надежности и долговечности, а также снижении эксплуатационных затрат на восстановление защитного антикоррозионного покрытия. Предложенное конструктивное решение балки может быть рационально к применению в агрессивных условиях эксплуатации, а также при реконструкции и капитальном ремонте объекта при невозможности временного ослабления несущей конструкции.

Библиографический список

1. Веселов В. Применение сталежелезобетонных балочных конструкций в транспортном строительстве / В. Веселов // Конспекты лекций по сетям и системам 402 LNS. — С. 269. — DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_30.
2. Темнов В. Сетка из раковин бионического типа для эксплуатации в экстремальных условиях обитания / В. Темнов, М. Абу-Хасан, Д. Чарник и др. // Серия конференций IOP: материаловедение и инженерия. — 2020. — С. 022023.
3. Бикбаева К. А. Усиление металлических конструкций композитными материалами / К. А. Бикбаева, К. С. Савинкова // Молодой ученый. — 2018. — № 11(197). — С. 71–73.
4. Zou X. A review on FRP-concrete hybrid sections for bridge applications / X. Zou, H. Lin, P. Feng et al. // Composite Structures. — 2021. — № 262. — P. 113336. — DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113336.
5. Ali H. T. Fiber reinforced polymer composites in bridge industry / H. T. Ali, R. Akrami, S. Fotouhi, M. Yusuf, M. Fotouhi // Structures. — 2021. — № 30. — С. 774–785. — DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.092.
6. Веселов В. Гибридные балочные конструкции транспортных зданий / В. Веселов, К. Талантова // Конспекты лекций по сетям и системам 402 LNS. — С. 278. — DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_31.
7. Егоров В. В. Усиление стальной стенки гибридной балочной строительной конструкции композитными материалами / В. В. Егоров, М. С. Абу-Хасан, А. М. Федоров // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии: материалы VIII Международной научно-практической интернет-конференции (23.06.2021). — С. 10–15.
8. Патент № 2675002. Российская Федерация, МПК E04C 3/294. Предварительно напряженная сталебетонная балка / В. В. Веселов, М. В. Копачева, Т. Д. Абагурова. Заявл. 21.02.2018; опубл. 14.12.2018. — Бюл. № 35.
9. Патент № 2627810. Российская Федерация, МПК E04C 3/07, E04C 3/293, E04B 1/30. Сталебетонная балка / В. В. Егоров, В. В. Веселов. Заявл. 19.05.2016; опубл. 11.08.2017. — Бюл. № 23.
10. Патент № 170094. Российская Федерация, МПК B66 C/00. Подкрановая балка / В. В. Веселов. Заявл. 18.10.2016; опубл. 13.04.2017. — Бюл. № 11.
11. Талантова К. В. Сталефибробетон. Дизайн. Терминология / К. В. Талантова // Вестник Евразийской науки. — 2020. — Т. 12. — № 4. — DOI: 10.15862/69SAVN420.
12. Патент № 2745288. Российская Федерация, МПК E04C 3/29. Балка композиционной структуры / В. В. Егоров, А. М. Федоров. Заявл. 01.10.2020; опубл. 23.03.2021. — Бюл. № 9.

13. Патент № 211900. Российская Федерация, МПК E04C 3/29. Металлокомпозитная балка / В. В. Веселов, Е. И. Никонова. Заявл. 13.12.2021; опубл. 28.06.2022. — Бюл. № 19.

14. Химическая энциклопедия: в 5 т. / Гл. ред. И. Л. Кнунянц. — М.: Советская энциклопедия, 1988. — Т. 1: Абл-Дар. — 623 с.

Дата поступления: 27.06.2022

Решение о публикации: 04.09.2022

Контактная информация:

ВЕСЕЛОВ Виталий Владиславович — канд. техн. наук, доц.; veselov.1977@inbox.ru

Beam Hybrid Structures with Metal and Composites in Transport

V. V. Veselov

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

For citation: Veselov V. V. Beam Hybrid Structures with Metal and Composites in Transport // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 631–638. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-631-638

Summary

Purpose: To pursue the analysis of hybrid and combined frame possible usage for overlaps of buildings and structures for civil and industrial purposes, including on transport, to expand beam structure nomenclature, to develop innovative structural solution of hybrid beam with material low consumption but with frame increased reliability and durability. **Methods:** Analysis of the advantages of known hybrid frames, of materials, used for their projection; metal composite beam calculation using existing engineering techniques in accordance with STO 38276489.003-2017 “Strengthening of steel structures with composite materials. Projection and techniques of work production” and numerical calculation methods involving calculation software programs. **Results:** New workouts for beams with the use of steel concrete and composite materials for projected and strengthened structures are presented. Innovative frame of metal composite beam has been developed — steel beam strengthened with external reinforcement system of composite material, protected by a useful model patent, its static and structural calculation has been performed using SCAD computing complex; stress-strain state has been analyzed, the analysis of steel consumption reduction for a metal composite beam and of its other advantages in comparison with steel and reinforced concrete beam traditional solutions has been carried out. **Practical significance:** The advantages of hybrid and combined structures are revealed, the decrease in material capacity for a metal composite beam strengthened by boroplastics in comparison with a steel one is revealed. The proposed structural solution of a beam can be used in overlaps and coverings for buildings and structures, transport buildings, especially, in aggressive environment conditions as well as during major repairs and reconstruction of industrial and civil purpose facilities.

Keywords: Building, frame, hybrid structure, overlap beam, metal composite beam, numerical calculation, reliability, durability.

References

1. Veselov V. *Primenenie stalezhelezobetonnykh balochnykh konstruksiy v transportnom stroitel'stve. Konspekty lektsiy po setyam i sistemam 402 LNS, s.269.* DOI:

10.1007/978-3-030-96380-4_30 [The use of steel-reinforced concrete beam structures in transport construction. Lecture Notes on Networks and Systems 402 LNS, p. 269. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_30]. (In Russian)

2. Temnov V., Abu-Khasan M., Charnik D., Kuprava L., Egorov V. *Setka iz rakovin bionicheskogo tipa dlya ekspluatatsii v ekstremal'nykh usloviyakh obitaniya. Seriya konferentsiy IOP: materialovedenie i inzheneriya 2020. S. 022023* [Mesh of bionic shells for exploitation in extreme living conditions. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering]. (In Russian)
3. Bikbaeva K. A., Savinkova K. S. Usilenie metallicheskikh konstruktsiy kompozitnymi materialami [Strengthening of metal structures with composite materials]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2018, I. 11 (197), pp. 71–73. (In Russian)
4. Zou X., Lin H., Feng P., Bao Y., Wang J. A review on FRP-concrete hybrid sections for bridge applications. *Composite Structures*, 2021, 262, 113336. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113336.
5. Ali H.T., Akrami R., Fotouhi S., Yusuf M., Fotouhi M. Fiber reinforced polymer composites in bridge industry. *Structures*. 2021, 30, pp. 774–785. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.092.
6. Veselov V., Talantova K. *Gibridnye balochnye konstruktsii transportnykh zdaniy. Konspekty lektsiy po setyam i sistemam 402 LNNS, str.278*. [Hybrid beam structures of transport buildings. Lecture notes on networks and systems]. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_31 (In Russian)
7. Egorov V. V., Abu-Khasan M. S., Fedorov A. M. Usilenie stal'noy stenki gibridnoy balochnoy stroitel'noy konstruktsii kompozitnymi materialami [Strengthening the steel wall of a hybrid beam building structure with composite materials]. *Innovatsionnye tekhnologii v stroitel'stve i geoekologii. Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy internet-konferentsii (23.06.2021)* [Innovative technologies in construction and geocology. Materials of the VIII International Scientific and Practical Internet Conference (06/23/2021)]. Pp. 10–15. (In Russian)
8. Veselov V. V., Kopacheva M. V., Abaturova T. D. *Patent № 2675002. Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04S 3/294. Predvaritel'no napryazhennaya stalebetonnaya balka* [Patent No. 2675002. Russian Federation, IPC E04C 3/294. Prestressed reinforced concrete beam]. (In Russian)
9. Egorov V. V., Veselov V. V. *Patent № 2627810. Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04C 3/07, E04C 3/293, E04V 1/30. Stalebetonnaya balka* [Patent No. 2627810. Russian Federation, IPC E04C 3/07, E04C 3/293, E04B 1/30. Reinforced concrete beam]. (In Russian)
10. Veselov V. V. *Patent № 170094. Rossiyskaya Federatsiya, MPK V66 S/00. Podkranovaya balka / Zayavl. 18.10.2016; opubl. 13.04.2017. Byul. № 11* [Patent No. 170094. Russian Federation, IPC B66 C/00. Crane beam. Appl. 10/18/2016; publ. 04/13/2017]. (In Russian)
11. Talantova K. V. *Stalefibrobeton. Dizayn. Terminologiya* [Steel fiber reinforced concrete. Design. Terminology]. 2020 DOI: 10.15862/69SAVN420 *Vestnik Evraziyskoy nauki 2020, I. 4, vol. 12/2020*. DOI: 10.15862/69SAVN420. (In Russian)
12. Egorov V. V., Fedorov A. M. *Patent № 2745288. Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04C 3/29. Balka kompozitsionnoy struktury. Zayavl. 01.10.2020; opubl. 23.03.2021 g. — Byul. № 9* [Patent No. 2745288. Russian Federation, IPC E04C 3/29. Beam of compositional structure]. (In Russian)
13. Veselov V. V., Nikonova E. I. *Patent № 211900. Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04C 3/29. Metallokompozitnaya balka. Zayavl. 13.12.2021; opubl. 28.06.2022 g. — Byul. № 19* [Patent No. 211900. Russian Federation, IPC E04C 3/29. Metal-composite beam. Appl. 12/13/2021; publ. June 28, 2022 - Bull. No. 19]. (In Russian)
14. *Khimicheskaya entsiklopediya* [Chemical encyclopedia]. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1988, vol. 1, 623 p. (In Russian)

Received: June 27, 2022

Accepted: September 4, 2022

Author's information:

Vitaliy V. VESELOV — PhD in Engineering, Associate Professor; veselov.1977@inbox.ru

УДК 656.224.072

Модель расчета оптимальной заполняемости контейнерных поездов в двадцатифутовом эквиваленте

М. В. Шевердова¹, О. Д. Покровская¹, М. А. Марченко¹, 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: Шевердова М. В., Покровская О. Д., Марченко М. А., Щербаков В. В. Модель расчета оптимальной заполняемости контейнерных поездов в двадцатифутовом эквиваленте // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 639–650. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-639-650

Аннотация

Цель: Разработать математическую модель подсчета двадцатифутового эквивалента в контейнерных поездах на заданной модели платформы, сформулировать методику расчета в двадцатифутовом эквиваленте (ДФЭ) в контейнерных поездах, обозначить целевую функцию поиска оптимальной заполняемости фитинговой платформы. **Методы:** Применены математические расчеты с помощью программной среды Паскаль в части автоматизации расчета вместимости фитинговых платформ. **Результаты:** В ходе расчетов выполнено построение математической модели. При помощи анализа загруженности контейнерного поезда была обозначена целевая функция поиска оптимальной заполняемости фитинговой платформы. **Практическая значимость:** Выполнен обзор процесса расчета двадцатифутового эквивалента. Установлено, что новым элементом в цепочке оформления документов стоит считать автоматический расчет ДФЭ в контейнерных поездах, а именно автоматическое составление отчетности на основании полученных значений ДФЭ. Дано описание этапов расчета ДФЭ на заданном типе платформы. По итогам исследования предложен программный продукт расчета вместимости в ДФЭ одного вагона в среде Паскаль.

Ключевые слова: Двдцатифутовый эквивалент, фитинговая платформа, АС ЭТРАН, контейнерный поезд, математическая среда Паскаль.

Введение

Перевозка контейнеров на железнодорожном транспорте по итогу 2021 г. составила 6 млн 502,5 тыс. TEU, что превысило показатели на 12,1 % по сравнению с 2020 г. С увеличением

доли перевозимых контейнеров железнодорожным транспортом возникает необходимость своевременного и грамотного оформления перевозочных документов. Трудно поспорить, что данные действия не могут обойтись без четкого

взаимодействия всех служб, занятых в подготовке контейнерных поездов к отправлению. Особое внимание стоит уделить части оформления документов на контейнерные поезда, поскольку на данном этапе возникает ряд ошибок как по вине грузоотправителей (неверно введенные данные в заготовках на накладные), так и по вине работников службы движения (неправильная погрузка согласно техническим условиям и т. д.). В связи с этим возникает необходимость понизить процент ошибок в процессе оформления. Решением данной проблемы стало появление в АС ЭТРАН технологии «Автоагент» на контейнерный поезд. Данная программа позволяет обеспечить безошибочное и своевременное оформление документов, а если это невозможно в автоматическом режиме, то происходит передача информационного сообщения работникам СФТО о «ручном» оформлении документа.

В то же время существует проблема неполной загрузки контейнерных поездов. Необходимо «нивелирование» типоразмеров контейнеров и моделей платформ под контейнерный поезд каждого назначения с целью рациональной загрузки двадцатифутовым эквивалентом, а также грамотного использования вместимости подвижного состава.

Вопрос рациональной заполняемости и грамотного использования площади вагона, вопрос дальнейшего совершенствования автоматизированной системы ЭТРАН являются актуальными и носят прикладной характер. Принимая во внимание тот факт, что объем перевозок TEU постоянно возрастает и подсчет двадцатифутового эквивалента (далее — ДФЭ) вручную становится трудозатратным, требуется научная поддержка.

Проблемы размещения контейнеров на платформах, заполняемости подвижного состава освещены в исследованиях [1–3]. Стоит отметить, что рациональная заполняемость подвижного состава является не только основой для

четкой реализации выполнения планов погрузки конкретного поезда, но и поставленных объемов перевозок в целом. «Погрузка» контейнеров на вагон информационно осуществляется в несколько известных АСУ, таких как ЭТРАН, АРМ ПКП и т. д. Вопросам состояния системы ЭТРАН, развитие АС ЭТРАН посвящены работы [4–7], в которых дается характеристика системы, описывается ее функционал. Особое внимание стоит уделить АРМ ПКП (ПКП — приемосдатчик контейнерной площадки), поскольку данная программа находится в тесной взаимосвязи с АС ЭТРАН и данные при оформлении перевозочных документов одновременно синхронизируются с данной АС [8, 9].

В работах [10–14] были представлены основные принципы цифровизации и клиентоориентированности при организации транспортного обслуживания, на которых строится и концепция данного исследования. Кроме того, в данном исследовании используется методология, изложенная в работах [15–18]. Следует полагать, что и результаты, полученные в данном исследовании, могут быть использованы в теоретическом и практическом развитии транспортного обслуживания.

Обоснование актуальности исследования

В настоящее время существует технология расчета дефицита двадцатифутового эквивалента, технология составления актов общей формы (далее — АОФ) ГУ-23 ВЦ, накопительных ведомостей формы ФДУ-92 приемосдатчиками груза и багажа, агентами системы фирменного транспортного обслуживания (далее — СФТО) согласно распоряжению ОАО «РЖД», однако имеются пробелы в части автоматизации расчетов плат за неполную вместимость контейнерных поездов [19].

Ввиду ошибок в подсчетах работников, отсутствия автоматизированной подсистемы для расчета вместимости выявляются случаи оформ-

ления контейнерных поездов (далее — КП) с проставлением соответствующей тарифной отметки и предоставлением скидки к тарифу на перевозку при несоблюдении условий вместимости КП, установленных порядком организации перевозки и порожних контейнеров в составе контейнерных поездов от 2 октября 2020 г. № 2191/р, без начисления компенсационной платы или при начислении данной платы не в полном объеме. На основании данного документа устанавливается норматив количества контейнеров на вагонах не менее 92 % от максимально возможного для конкретного КП количества двадцатифутовых контейнеров [20]. Согласно документу для КП с расстоянием перевозки более 2300 км требуется оформление актов общей формы с целью взимания плат за неполную загрузку составов [21].

Методика расчета ДФЭ на фитинговой платформе

Исходя из вышесказанного требуется технология для подсчета вместимости фитинговых платформ и контейнерных поездов в целом. Вместимость фитинговых платформ определяется исходя из следующих критериев:

Максимальное количество ДФЭ для:

– вагона длиной по осям сцепления до 19 м — 2 ДФЭ;

– вагона длиной по осям сцепления свыше 19 м, но не более 25 м — 3 ДФЭ;

– вагона длиной по осям сцепления свыше 25 м — 4 ДФЭ.

При размещении контейнеров на вагонах:

– 40-футовый контейнер считать равным 2 ДФЭ.

При размещении на вагонах длиной по осям сцепления более 19 м, но менее 25 м:

– 20-футового контейнера массой брутто свыше 24 тонн — один контейнер считать равным 1,5 ДФЭ.

При размещении на вагонах длиной по осям сцепления более 25 м:

– 20-футового контейнера массой брутто свыше 24 тонн — один контейнер считать равным 2 ДФЭ.

На данный агентами СФТО, приемосдатчиками выполняется расчет ДФЭ, составление актов общей формы, накопительных ведомостей. Данные действия занимают значительную долю времени в технологическом процессе [22]. В целях рационализации требуется создать новую подсистему ЭТРАНа.

Известно, что заполняемость контейнерного поезда в ДФЭ является одним из ключевых показателей эффективности использования подвижного состава и формирования контейнерного маршрута в целом [23, 24].

После расчета приемосдатчиками груза и багажа дефицита ДФЭ по известным значениям составляется АОФ на компенсацию недогруза. Далее агентами СФТО на основании АОФ составляется накопительная ведомость формы ФДУ-92.

Исходя из вышесказанного, предлагается создание подсистемы в АС ЭТРАН, которая позволяет исключить ошибки в процессе расчетов ручным способом и позволяет оптимизировать процесс синхронизации переноса данных расчета ДФЭ в акты. Данная подсистема будет отличаться от существующих вложенных модулей ЭТРАНа в следующем:

– расчет дефицита ДФЭ в КП с расстоянием перевозки более 2300 км;

– автоматическое создание АОФ ГУ-23ВЦ на основании произведенных в подсистеме расчетов;

– автоматическое создание на основании АОФ ГУ-23ВЦ накопительной ведомости ФДУ-92.

Математическая модель и алгоритм расчета ДФЭ на заданном типе платформы

Для оптимизации процесса расчета ДФЭ фактического и планового значений и, как следствие, дефицита ДФЭ предложена следующая математическая модель расчета для различных типов платформ и размещенных на них типоразмеров

контейнеров. Для осуществления расчета по методике, предложенной в данном исследовании, необходимы исходные данные для расчета:

1. Типы используемой платформы t (40-футовые фитинговые платформы, 60-футовые фитинговые платформы, 80-е фитинговые платформы).

2. Типоразмер контейнеров, где k_i — 20-футовый контейнер (типоразмеры 22G1), K_i — 40-футовый контейнер (типоразмеры 4EG1, 40 RHC и др.)

3. Масса контейнеров m , кг.

Варианты размещения контейнеров на 40-футовой платформе следующие:

1. $k1, k2$.
2. $K1$.
3. $k1$.

Варианты размещения контейнеров на 60-футовой платформе следующие:

1. $k1$.
2. $k1, k2, k3$.
3. $k1, K1$.
4. $k1, k2$.

Варианты размещения контейнеров на 80-футовой платформе следующие:

1. $k1, k2, k2, k4$.
2. $k1, K1, k2$.
3. $K1, K2$.

Плановое значение $dfe_{\text{план}}$ для различных типов платформ является константой и принимает следующие значения:

- 40-футовые фитинговые платформы: $dfe_{\text{план}} = 2$.
- 60-футовые фитинговые платформы: $dfe_{\text{план}} = 3$.
- 80-футовые фитинговые платформы: $dfe_{\text{план}} = 4$.

Фактическое значение $dfe_{\text{факт}}$ определяется исходя из заданных типоразмеров контейнеров и их массы, типа платформы:

Случай 1

При $t = 40$

$$\text{if } K_i = 20 \Rightarrow dfe_{\text{факт}}(i) = 1.$$

$$\text{if } K_i = 40 \Rightarrow dfe_{\text{факт}}(i) = 2.$$

Случай 2

$t = 60$

$$\text{if } k_i = 20, m > 24\,000 \Rightarrow dfe_{\text{факт}}(i) = 1,5.$$

$$\text{if } k_i = 20, m \leq 24\,000 \Rightarrow dfe_{\text{факт}}(i) = 1.$$

$$\text{if } K_i = 40 \Rightarrow dfe_{\text{факт}}(i) = 2.$$

Случай 3

$t = 80$

$$\text{if } k_i = 20, m > 24\,000 \Rightarrow dfe_{\text{факт}}(i) = 2.$$

$$\text{if } k_i = 20, m \leq 24\,000 \Rightarrow dfe_{\text{факт}}(i) = 1.$$

$$\text{if } K_i = 40 \Rightarrow dfe_{\text{факт}}(i) = 2.$$

По методике, предложенной в данном исследовании на рис. 1, 2, показан фрагмент алгоритма расчета ДФЭ на платформе, который автоматизирован в среде Паскаль:

Фрагмент алгоритма предполагает ряд последовательных проверок.

Блок 1. Выполняется проверка: находится ли исходный контейнер с типоразмером 22G1 на 60-й футовой фитинговой платформе. Если условие верно, далее проверяется второе условие: масса заданного контейнера больше 24 000 кг. При положительном исходе ДФЭ контейнера принимает значение 1,5 ДФЭ. В противном случае принимает значение 1 ДФЭ.

Блок 2. Выполняется проверка: находится ли исходный контейнер с типоразмером 22G1 на 80-й футовой фитинговой платформе. Если условие верно, далее проверяется второе условие: масса заданного контейнера больше 24 000 кг. При положительном исходе ДФЭ контейнера принимает значение 2 ДФЭ. В противном случае принимает значение 1 ДФЭ.

Блок 3. Выполняется проверка: находится ли исходный контейнер с типоразмером 22G1 на 40-й футовой фитинговой платформе. Если условие верно, далее принимается значение 1 ДФЭ.

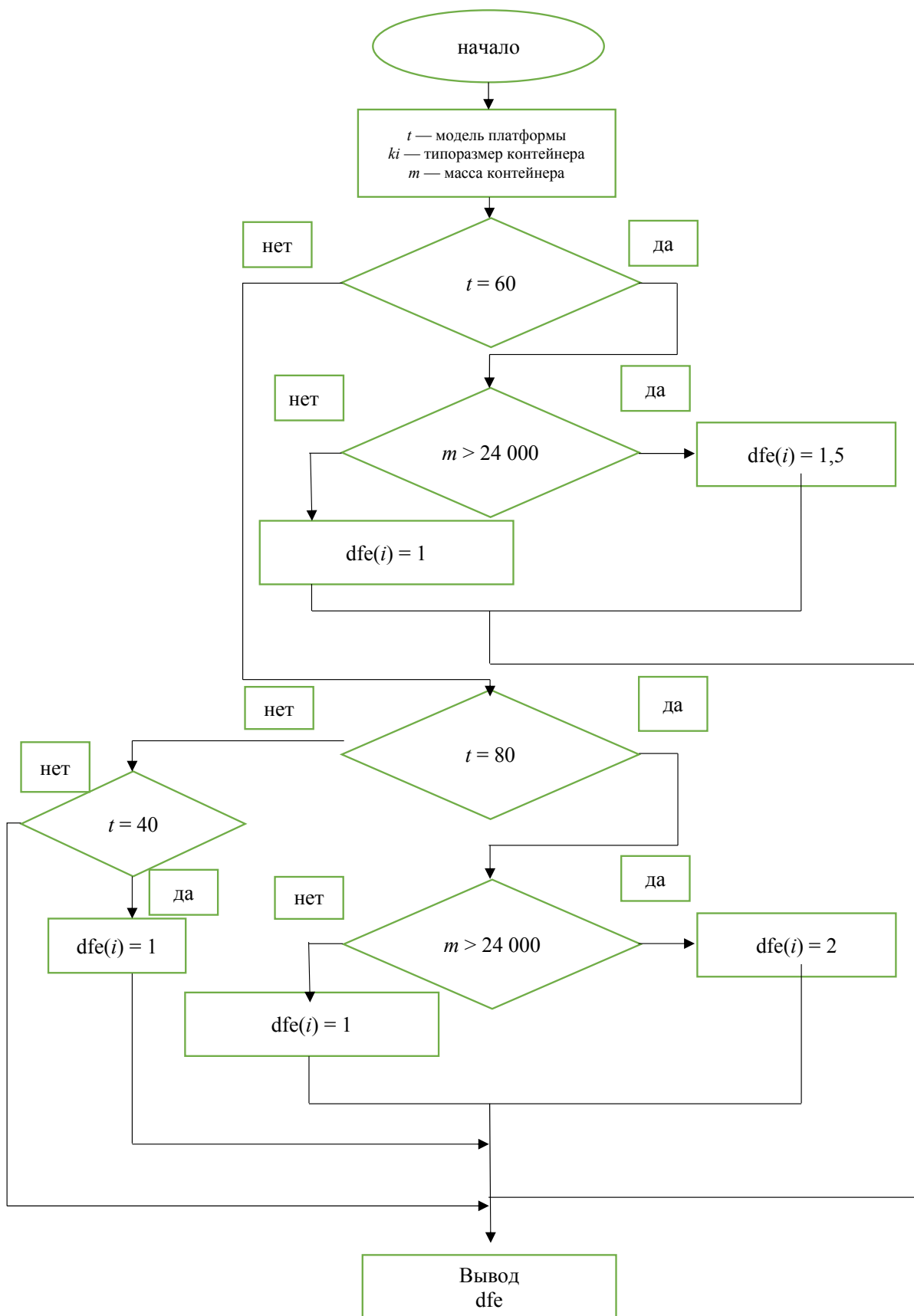


Рис. 1. Фрагмент алгоритма расчета ДФЭ одного контейнера типоразмера 22G1 на платформе



Рис. 2. Блок-схема фрагмента алгоритма расчета ДФЭ одного контейнера типоразмера 22G1 на платформе

В результате полученных значений по каждому $dfe_{\text{факт}}(i)$ на определенной платформе вычисляется суммарное ДФЭ $\sum dfe_{\text{факт}}$ на вагоне (1):

$$\sum dfe_{\text{факт}} = dfe_{\text{факт}}(1) + dfe_{\text{факт}}(2) + dfe_{\text{факт}}(3) \quad (1)$$

$$\sum dfe1 \text{ ('округлвверх')} = \sum dfe_{\text{факт}} = dfe1_{\text{окр}}$$

Исходя из полученных $dfe_{\text{факт}}$ и $dfe_{\text{факт}}$ составляется выражение, согласно которому и определяется:

1. Нормативное значение ДФЭ (2):

$$dfe_{\text{норматив}} = \text{'округлвверх'} = \frac{92 \cdot dfe_{\text{план}}}{100} \quad (2)$$

2. Недогруз ДФЭ в контейнерном поезде (3):

$$dfe_{\text{дефицит}} = dfe_{\text{норматив}} = \text{'округлвверх'} - dfe1_{\text{окр}} \quad (3)$$

В качестве примера приводится расчет фактического ДФЭ для модели платформы 13-9007 с размещенными на ней типоразмерами контейнеров 22G1 с массой брутто m_{k_i} (XXXX XXXXXXXX) = 23 370 кг (первый контейнер) и m_{k_i} (YYYY YYYYYYYY) = 24 385 кг (второй контейнер).

Тип платформы	Модель платформы	Вагон	Контейнеры	Типоразмер контейнера	Масса контейнера, кг
60	13-9007	94856929	XXXX XXXXXXX	22G1	23 370
			YYYY YYYYYYY	22G1	24 385

Исходные данные:

k_i — 20-футовый контейнер.

K_i — 40-футовый контейнер.

p — тип платформы, на которой размещаются контейнеры, $p = 60$.

m — масса контейнеров, кг.

m_{k_i} (XXXX XXXXXXXX) = 23 370 кг.

m_{k_i} (YYYY YYYYYYYY) = 24 385 кг.

Обсуждение результатов

Согласно фрагменту алгоритма программы, последовательно проверяется ряд условий (рис. 5).

Для начала определяется тип используемой фитинговой платформы (40, 60 или 80). Исходя из заданных условий, тип платформы в нашей задаче 60. Следовательно, для расчетов используется формулы случая 2.

$$if k_i = 20, m > 24\ 000 \Rightarrow dfe_{\text{факт}}(i) = 1,5 \text{ДФЭ.}$$

$$if k_i = 20, m \leq 24\ 000 \Rightarrow dfe_{\text{факт}}(i) = 1 \text{ДФЭ.}$$

$$if K_i = 40 \Rightarrow dfe_{\text{факт}}(i) = 2 \text{ДФЭ.}$$

Далее проверяется масса брутто каждого из контейнеров, размещенных на платформе. Контейнер XXXX XXXXXXXX типоразмера 22G1 имеет массу брутто 23 370 кг, масса контейнера $\leq 24\ 000$, следовательно, ДФЭ фактическое принимает следующее значение:

$$if k_i = 20, m \leq 24\ 000 \Rightarrow dfe_{\text{факт}}(1) = 1 \text{ДФЭ.}$$

Контейнер YYYY YYYYYYYY типоразмера 22G1 имеет массу брутто 24 385 кг, масса контейнера $\leq 24\ 000$, следовательно, ДФЭ фактическое принимает следующее значение:

$$if k_i = 20, m > 24\ 000 \Rightarrow dfe_{\text{факт}}(2) = 1,5 \text{ДФЭ.}$$

Расчет $dfe_{\text{факт}}$ окончен, так как на вагоне больше нет контейнеров. Далее находится сумма ДФЭ фактическое $\sum dfe_{\text{факт}}$, полученное из ранее найденных значений:

$$\begin{aligned} \sum dfe_{\text{факт}} &= dfe_{\text{факт}}(1) + dfe_{\text{факт}}(2) = 1 + 1,5 = \\ &= 2,5 \text{ДФЭ.} \end{aligned}$$

Таким образом, значения $dfe_{\text{факт}}$ и $dfe_{\text{план}}$ не совпадают. Недогруз на платформе составляет 0,5 ДФЭ. Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что одним из критериев качества формирования контейнерного маршрута с точки зрения его заполняемости следует считать максимум заполняемости фитинговой платформы в ДФЭ на

100 %. Соотношение фактического и планового значений должно стремиться к единице (4):

$$B = \frac{dfe_{\text{факт}}}{dfe_{\text{план}}} \rightarrow \max = 1. \quad (4)$$

В общем случае коэффициент заполняемости фитинговой платформы $Z_{\text{фтр}}$ стремится к максимальному значению (5):

$$Z_{\text{фтр}} = \sum_{i=1}^n \frac{dfe_{\text{факт}}(i)}{dfe_{\text{план}}} \rightarrow \max = 1. \quad (5)$$

где n — число контейнеров на рассчитываемой платформе.

Таким образом, показатель коэффициента заполняемости контейнерного поезда $B_{\text{кп}}$ складывается как сумма всех коэффициентов заполняемости платформ конкретного КП $Z_{\text{фтр}}$, деленного на число платформ, задействованных в данной перевозке (6):

$$B_{\text{кп}} = \frac{\sum_{j=1}^z \left(\sum_{i=1}^n \frac{dfe_{\text{факт}}(i)}{dfe_{\text{план}}} \right)}{z}. \quad (6)$$

$$B_{\text{кп}} = \frac{\sum_{j=1}^z (Z_{\text{фтр}})}{z},$$

где z — число вагонов в контейнерном поезде.

Однако для расчета ДФЭ в подсистеме ДФЭ ЭТРАН требуется ввод дополнительных условий для проверки правильности размещения согласно техническим условиям, а именно:

1. Масса брутто контейнеров не должна превышать грузоподъемность платформы $\sum m_{ki} < N$, где N — грузоподъемность вагона, $\sum m_{ki}$ — сумма масс контейнеров на вагоне.

2. Допускаемые сочетания масс брутто контейнеров длиной 20 и 40 футов, размещаемых на одной 60-футовой фитинговой платформе,

должны проверяться программой исходя из таблиц согласно телеграмме от 9 марта 2018 г. № 4971/ЦФТО [25].

Заключение

Для оптимизации процесса расчета ДФЭ фактического и планового значений и, как следствие, дефицита ДФЭ в данном исследовании предложена математическая модель расчета для различных типов платформ и размещенных на них типоразмеров контейнеров, сформулирована методика расчета ДФЭ для различных типов платформ (40-футовые фитинговые платформы, 60-футовые фитинговые платформы, 80-е фитинговые платформы). В качестве примера по данной методике предложен фрагмент алгоритма вычисления ДФЭ контейнера типоразмера 22G1. Показано, что одним из критериев качества формирования контейнерного маршрута с точки зрения его заполняемости следует считать максимум вместимости фитинговой платформы в ДФЭ на 100 %. Соотношение фактического и планового значений должно стремиться к единице.

Предложено создание подсистемы в АС ЭТРАН. Данная подсистема будет отличаться от существующих вложенных модулей ЭТРАНа, а именно в ней будут возможны следующие операции: расчет дефицита ДФЭ в КП с расстоянием перевозки более 2300 км, автоматическое создание АОФ ГУ-23ВЦ на основании произведенных в подсистеме расчетов ДФЭ, автоматическое создание на основании АОФ ГУ-23ВЦ накопительной ведомости ФДУ-92. Таким образом, данная подсистема позволит исключить ошибки в процессе расчетов ручным способом и позволит оптимизировать процесс синхронизации переноса данных расчета в акты и ведомости.

Кроме того, в работе предложен ввод дополнительных условий в подсистему ЭТРАНа для проверки правильности размещения согласно ТУ, а именно: масса брутто контейнеров не должна

превышать грузоподъемность платформы; допускаемые сочетания масс брутто контейнеров длиной 20 и 40 футов, размещаемых на одной 60-футовой фитинговой платформе, должны проверяться программой исходя из таблиц согласно телеграмме от 9 марта 2018 г. № 4971/ЦФТО.

Библиографический список

1. Нутович В. Е. Цифровое обеспечение и соблюдение технических условий размещения и крепления грузов / В. Е. Нутович // Мир транспорта. — 2018. — Т. 16. — № 4(77). — С. 52–65.
2. Оленцевич В. А. Автоматизация выбора безопасного размещения и крепления груза на железнодорожном транспорте / В. А. Оленцевич, В. Е. Гозбенко // Системы. Методы. Технологии. — 2013. — № 2(18). — С. 59–63.
3. Демина Н. В. Транспортные характеристики и условия перевозок грузов на железнодорожном транспорте: учебное пособие / Н. В. Демина, Н. В. Куклева, А. В. Дороничев. — М., 2015.
4. Франтасов Д. Н. Информационное взаимодействие АСУ грузоотправителей с АС ЭТРАН / Д. Н. Франтасов, Ю. О. Шипилова // Наука и образование транспорту. — 2016. — № 2. — С. 94–95.
5. Пакина С. А. Современные информационные системы как инструменты обеспечения качества транспортно-экспедиционного обслуживания на железнодорожном транспорте / С. А. Пакина, А. А. Сироткин // Актуальные вопросы экономики региона: анализ, диагностика и прогнозирование: материалы V Международной студенческой научно-практической конференции. Нижегородский филиал МИИТ. — 2015. — С. 326–330.
6. Эрлих Н. В. Электронный технологический документооборот / Н. В. Эрлих, Л. И. Папиловская, Т. Б. Ефимова // Вестник транспорта Поволжья. — 2010. — № 3(23). — С. 108–112.
7. Вельмина А. А. Реализация платформенного подхода ОАО «РЖД» в сфере грузовых перевозок и логистики / А. А. Вельмина, Т. Б. Ефимова // Проблемы развития предприятий: теория и практика. — 2019. — № 1–2. — С. 216–219.
8. Москвичев О. В. Информационные технологии и информационно управляющие системы на магистральном транспорте / О. В. Москвичев. — Самара, 2015.
9. Сеницына А. С. Оптимизация деятельности терминально-складского комплекса ОАО «РЖД» в условиях использования информационных и автоматизированных систем / А. С. Сеницына.
10. Покровская О. Д. Состояние транспортно-логистической инфраструктуры для угольных перевозок в России / О. Д. Покровская // Инновационный транспорт. — 2015. — № 1(15). — С. 13–23.
11. Pokrovskaya O. Assessment of transport and storage systems / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2020. — Vol. 1115 AISC. — Pp. 570–577.
12. 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.
13. Покровская О. Д. О терминологии объектов терминально-складской инфраструктуры / О. Д. Покровская // Мир транспорта. — 2018. — Т. 16. — № 1(74). — С. 152–163.
14. Покровская О. Д. Логистическая классность железнодорожных станций // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2018. — № 2(38). — С. 68–76.
15. Куренков П. В. Механизмы государственного регулирования развития транспортной системы региона / П. В. Куренков, Ю. В. Веселова // Транспорт: наука, техника, управление: Сб. Отечественная история. — 2006. — № 7. — С. 8–12.
16. 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: Сб. Российская история. — 2015. — № 11. — С. 84–92.
17. 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.
18. Баритко А. Л. Организация и технология внешне-торговых перевозок / А. Л. Баритко, П. В. Куренков // Железнодорожный транспорт. — 1998. — № 8.
19. Бороненко Ю. П. Выбор конструктивных решений устройств крепления контейнеров и съемных кузовов на железнодорожных платформах / Ю. П. Бороненко, А. С. Даукша // Транспорт РФ. — 2017. — № 3(70). — С. 29–32.
20. Прокофьев М. Н. Совершенствование технологии ускоренных грузовых перевозок железнодорожным

транспортом / М. Н. Прокофьев. — М.: Российский университет транспорта (МИИТ), 2018.

21. Распоряжение ОАО «РЖД» от 20 ноября 2020 г. № 2554/р. об «Обеспечении при перевозке грузевых и порожних контейнеров на вагонах в составе контейнерного поезда».

22. Нутович В. Е. Автоматизированное начисление платы за нахождение вагонов на инфраструктуре железнодорожного транспорта общего пользования / В. Е. Нутович. — Наука и техника транспорта. — 2018. — № 2. — С. 38–45.

23. Галкина Я. К. Перспективы развития ускоренных контейнерных поездов / Я. К. Галкина // Конкурентоспособность территорий: материалы XXIII Всероссийского экономического форума молодых ученых и студентов. В 4-х частях. Отв. за выпуск Я. П. Силин, Е. Б. Дворядкина. — Екатеринбург, 2020. — С. 163–166.

24. Автомонова Л. Ю. Прогнозирование объемов контейнерных перевозок с использованием эконометрических моделей / Л. Ю. Автомонова // Системный анализ и логистика. — 2018. — № 1(16). — С. 60–69.

25. Телеграмма от 9 марта 2018 г. № 4971/ЦФТО.

Дата поступления: 20.07.2022

Решение о публикации: 01.09.2022

Контактная информация:

ШЕВЕРДОВА Мария Вячеславовна — аспирант;
maria.bayern2017@yandex.ru,

ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна — д-р техн. наук,
проф., и. о. зав. кафедрой; insight1986@inbox.ru

МАРЧЕНКО Максим Александрович — аспирант;
maks.marchenko1998@mail.ru

ЩЕРБАКОВ Владимир Васильевич — д-р экон. наук,
проф., зав. кафедрой; shefainn@yandex.ru

Model for Calculation of Optimal Filling of Container Trains in Twenty-Foot Equivalent

M. V. Sheverdova¹, O. D. Pokrovskaya¹, M. A. Marchenko¹, 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: Sheverdova M. V., Pokrovskaya O. D., Marchenko M. A., Shcherbakov V. V. Model for Calculation of Optimal Filling of Container Trains in Twenty-Foot Equivalent // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 639–650. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-639-650

Summary

Purpose: To develop a mathematical model for calculating twenty-foot equivalent in container trains on the platform given model, to formulate a calculation method in twenty-foot equivalent (TFE) in container trains, to designate a target function in finding optimal filling capacity of fitting platform. **Methods:** Mathematical calculations were applied using Pascal software environment in terms of automating calculation of fitting platform capacity. **Research results:** During the calculations, mathematical model design was carried out as well as the study of parameters such as a container mass, size and model was done. Using the analysis of container train load, a target function for the search of fitting platform optimal filling capacity was identified. **Practical significance:** Review of calculation process for twenty-foot equivalent was carried out by station employees. It is established that as a new element in paperwork chain there should be considered automatic calculation of TFE in container trains, namely, TFE automatic reporting based on the obtained values for TFE in terms of filling in a general form act and a cumulative statement. The description of TFE calculation stages for a one container of 22G1 size on platform given type is demonstrated. Based on the study results, software product in Pascal environment for the calculation of a one container capacity into TFE is proposed.

Keywords: Twenty-foot equivalent, fitting platform, AC ETRAN (Automated system Electronic Transport Waybill where all freight transportations in Russian Railways JSC are formed), container train, Pascal mathematical environment.

References

1. Nutovich V. E. Tsifrovoye obespechenie i soblyudeniye tekhnicheskikh usloviy razmeshcheniya i krepleniya gruzov [Digital provision and compliance with the technical conditions for the placement and securing of goods]. *Mir transporta* [The world of transport]. 2018, vol. 16, I. 4 (77), pp. 52–65. (In Russian)
2. Olentsevich V. A., Gozbenko V. E. Avtomatizatsiya vybora bezopasnogo razmeshcheniya i krepleniya gruzov na zheleznodorozhnom transporte [Automation of the choice of safe placement and securing of cargo in railway transport]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technology]. 2013, I. 2 (18), pp. 59–63. (In Russian)
3. Demina N. V., Kukleva N. V., Doronichev A. V. *Transportnye kharakteristiki i usloviya perevozok gruzov na zheleznodorozhnom transporte* [Transport characteristics and conditions for the carriage of goods by rail]. Moscow, 2015. (In Russian)
4. Frantsov D. N., Shipilova Yu. O. *Informatsionnoye vzaimodeystvie ASU gruzootpraviteley s AS ETRAN- Nauka i obrazovanie transport* [Informational interaction of ACS of consignors with AS ETRAN. Science and education transport]. 2016, I. 2, pp. 94–95. (In Russian)
5. Pakina S. A., Sirotkin A. A. Sovremennyye informatsionnyye sistemy kak instrumenty obespecheniya kachestva transportno-ekspeditsionnogo obsluzhivaniya na zheleznodorozhnom transporte [Modern information systems as tools for ensuring the quality of freight forwarding services in railway transport]. *Aktual'nyye voprosy ekonomiki regiona: analiz, diagnostika i prognozirovaniye. Materialy V Mezhdunarodnoy studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Nizhegorodskiy filial MIIT* [Current issues of the regional economy: analysis, diagnosis and forecasting. Materials of the V International Student Scientific and Practical Conference]. 2015, pp. 326–330. (In Russian)
6. Erlikh N. V., Papirovskaaya L. I., Efimova T. B. Elektronnyy tekhnologicheskyy dokumentooborot [Electronic technological document management]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region]. 2010, I. 3 (23), pp. 108–112. (In Russian)
7. Vel'mina A. A., Efimova T. B. Realizatsiya platformennogo podkhoda OAO «RZhD» v sfere gruzovykh perevozok i logistiki [Implementation of the platform approach of Russian Railways in the field of freight transportation and logistics]. *Problemy razvitiya predpriyatiy: teoriya i praktika* [Problems of enterprise development: theory and practice]. 2019, I. 1-2, pp. 216–219. (In Russian)
8. Moskvichev O. V. *Informatsionnyye tekhnologii i informatsionno upravlyayushchie sistemy na magistral'nom transporte* [Information technologies and information management systems on the main transport]. Samara, 2015. (In Russian)
9. Sinitsyna A. S. *Optimizatsiya deyatelnosti terminal'no-skladskogo kompleksa OAO «RZhD» v usloviyakh ispol'zovaniya informatsionnykh i avtomatizirovannykh sistem* [Optimization of the activity of the terminal and warehouse complex of Russian Railways in the context of the use of information and automated systems]. (In Russian)
10. Pokrovskaya O. D. Sostoyaniye 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)
11. Pokrovskaya O., Fedorenko R. Assessment of transport and storage systems. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020, vol. 1115 AISC, pp. 570–577.
12. Pokrovskaya O., Fedorenko R. Evolutionary-functional approach to transport hubs classification. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020, vol. 982, pp. 356–365.
13. Pokrovskaya O. D. O terminologii ob'ektov terminal'no-skladskoy infrastruktury [About terminology of objects of terminal and warehouse infrastructure]. *Mir transporta* [Transport world]. 2018, vol. 16. I. 1 (74), pp. 152–163.
14. Pokrovskaya O. D. Logisticheskaya klassnost' zheleznodorozhnykh stantsiy [Logistic quality of railway stations]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Communications]. 2018, I. 2 (38), pp. 68–76. (In Russian)

15. 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)
16. 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. Russian history.]. 2015, I. 11, pp. 84–92. (In Russian)
17. 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 zheleznnye dorogi Rossii" [Project "Urban railways of Russia"]. *Vestnik transporta* [Bulletin of transport]. 2014, I. 5, pp. 2–10. (In Russian)
18. Baritko A. L., Kurenkov P. V. Organizatsiya i tekhnologiya vneshnetorgovykh perevozok [Organization and technology of foreign trade transportation]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 1998, I. 8. (In Russian)
19. Boronenko Yu. P., Dauksha A. S. *Vybor konstruktivnykh resheniy ustroystv krepeleniya konteynerov i s'emnykh kuzovov na zheleznodorozhnykh platformakh* [The choice of design solutions for fastening devices for containers and swap bodies on railway platforms]. (In Russian)
20. Prokof'ev M. N. Covershenstvovanie tekhnologii uskorennykh gruzovykh perevozok zheleznodorozhnym transportom [Improving the technology of accelerated freight transportation by rail]. *Rossiyskiy universitet transporta (MIIT)* [Russian University of Transport (MIIT)]. Moscow, 2018. (In Russian)
21. *Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 20 noyabrya 2020 g. No 2554/r. ob «Obespechenii pri perevozke gruzhenykh i porozhnykh konteynerov na vagonakh v sostave konteynernogo poezda»* [Order of Russian Railways OJSC dated November 20, 2020 No. 2554/r. on "Provision for the transportation of loaded and empty containers on wagons as part of a container train"]. (In Russian)
22. Nutovich V. E. Avtomatizirovannoe nachislenie platy za nakhozhdenie vagonov na infrastrukture zheleznodorozhnogo transporta obshchego pol'zovaniya [Automated calculation of fees for the presence of wagons on the infrastructure of public railway transport]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2018, I. 2, pp. 38–45. (In Russian)
23. Galkina Ya. K. Perspektivy razvitiya uskorennykh konteynernykh poezdov [Prospects for the development of accelerated container trains]. *Konkurentosposobnost' territoriy. Materialy XXIII Vserossiyskogo ekonomicheskogo foruma molodykh uchenykh i studentov* [Competitiveness of territories. Materials of the XXIII All-Russian Economic Forum of Young Scientists and Students.]. Ekaterinburg, 2020, pp. 163–166. (In Russian)
24. Avtomonova L. Yu. Prognozirovanie ob'emov konteynernykh perevozok s ispol'zovaniem ekonometricheskikh modeley [Forecasting the volume of container traffic using econometric models]. *Sistemnyy analiz i logistika* [System analysis and logistics]. 2018, I. 1 (16), pp. 60–69. (In Russian)
25. Ivlieva K. V. Telegramma №4971/TsFTO ot 9.03.2018 g. [Telegram No. 4971/TsFTO dated March 9, 2018]. *Logistika - evraziyskiy most. materialy KHI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Logistics — the Eurasian bridge. materials of the XI international scientific-practical conference]. 2016, pp. 223–228. (In Russian)

Received: July 20, 2022

Accepted: September 1, 2022

Author's information:

Maria V. SHEVERDOVA — Postgraduate Student;
maria.bayern2017@yandex.ru,

Oksana D. POKROVSKAYA — Dr. Sci. in Engineering,
Professor, Acting Head; insight1986@inbox.ru

Maksim A. MARCHENKO — Postgraduate Student;
maks.marchenko1998@mail.ru,

Vladimir V. SHCHERBAKOV — Dr. Sci. in Economics,
Professor, Head of Department; shefainn@yandex.ru

УДК 656.073.2

Математическая модель распределения заданий между подъемно-транспортными машинами

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. Математическая модель распределения заданий между подъемно-транспортными машинами // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 651–658. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-651-658

Аннотация

Цель: Для определения рационального распределения заданий между техникой, специализирующейся на внутритерминальных перемещениях, выполнить математическое моделирование работы подъемно-транспортных машин в транспортно-перегрузочной системе контейнерного терминала с учетом технологических параметров и дальнейшей многокритериальной оптимизацией. **Методы:** Для поиска распределения используются методы теории вероятностей и математической статистики, а также экспертных оценок. **Результаты:** Разработана математическая модель распределения заданий между подъемно-транспортными машинами. Определены зависимости общего времени выполнения заданий ПТМ при использовании текущей технологии и стратегии выполнения заданий при расчете оптимальности по Парето в отношении шести критериев, нацеленных на увеличение производительности крана и минимизацию порожнего пробега ПТМ. **Практическая значимость:** Предложено рациональное распределение заданий между техникой на перемещение контейнера, позволяющее увеличить перерабатывающую способность контейнерного терминала и снизить расходы на эксплуатацию техники.

Ключевые слова: Автоматизация, подъемно-транспортная машина, терминал, контейнерно-транспортная система, ускоренная доставка грузов.

Введение

Рост контейнерных перевозок за последние десять лет [1] приводит к необходимости повышения производительности технических средств и перерабатывающей способности контейнерных терминалов [2–4]. Для этого могут использоваться следующие методы:

– **экстенсивный** — за счет увеличения территории терминала и числа приемоотправочных путей при текущих технологии работы и устройстве. Этот метод применим на значительном расстоянии от крупных городов, где стоимость территории небольшая и она не ограничена жилыми кварталами [5–7];

– **интенсивный** — за счет смены технологии и применения новых видов техники с большей производительностью. Для больших контейнерных терминалов развитие таким образом наиболее перспективно из-за расположения железнодорожных станций рядом с агломерациями и снижения капитальных затрат [8–10].

Постановка задачи

Существует k заданий, необходимых для выполнения ν -м числом погрузчиков. После того как погрузчик завершает свое текущее задание, вызывается алгоритм (рис. 1) для выбора следующего задания среди набора потенциальных заданий.

Задание — цикл от получения приказа на перемещение из места, где находится погрузчик, до места выгрузки целевого контейнера погрузчиком.

Далее модель выбора соответствия заданий и погрузчиков оценивает все возможные задания для всех погрузчиков с использованием технологических критериев, предназначенных для учета двух целей: минимизации порожнего пробега погрузчика; увеличения производительности работы крана. В дальнейшем критерии рассматриваются в многокритериальной оптимизации для определения оптимальной стратегии работы погрузчиков.

Критерии в модели выбора соответствия заданий и погрузчиков

В табл. 1 приведены критерии, используемые моделью и поделенные на 2 группы в соответствии с целями. На рис. 2 изображен вектор времени с расположением критериев в процессе поиска и выполнения задания.

$C_1(X)$ представляет запас времени до выполнения задания x , мин:

$$C_1(X)_{\nu,k} = t_{\text{кр}}(X)_{\nu,k} - \frac{l_{\text{рейса}}(X)_{\nu,k}}{V_{\text{ср}}}, \quad (1)$$

где $l_{\text{рейса}}(X)_{\nu,k}$ — расстояние рейса ν -го погрузчика до места получения следующего k -го задания x , км;

$V_{\text{ср}}$ — средняя технологическая скорость погрузчика, км/ч;

$t_{\text{кр}}(X)_{\nu,k}$ — крайний срок выполнения задания x , ч.

Чем меньше $C_1(X)$, тем более срочным является задание x (отрицательная, если крайний срок пройден).

$C_2(X)$ — это разница между ожидаемым временем прибытия ν -го погрузчика в место получения k -го задания x и погрузчика с минимальным расстоянием, мин:

ТАБЛИЦА 1. Критерии модели

Группа	№	Описание	Результат
Увеличение производительности крана	C_1	Время до момента последнего срока начала k -го задания	Актуальность выбора k -го задания
	C_2	Разница между временем прибытия к точке получения задания текущего ПТМ и ближайшего ПТМ к точке	Выбор наиболее свободного и расположенного при приеме задания наиболее близко
	C_3	Время до момента времени, когда кран будет готов погрузить целевой контейнер ПТМ	Учет крана с минимальной очереди
Минимизация пробега погрузчиков	C_4	Время порожнего пробега ПТМ	Учет порожнего пробега с учетом конфликтов
	C_5	Время груженого рейса ПТМ	Учет груженого пробега с учетом конфликтов
	C_6	Возможность сдвоенной операции	Учет сдвоенной операции в будущих двух заданиях

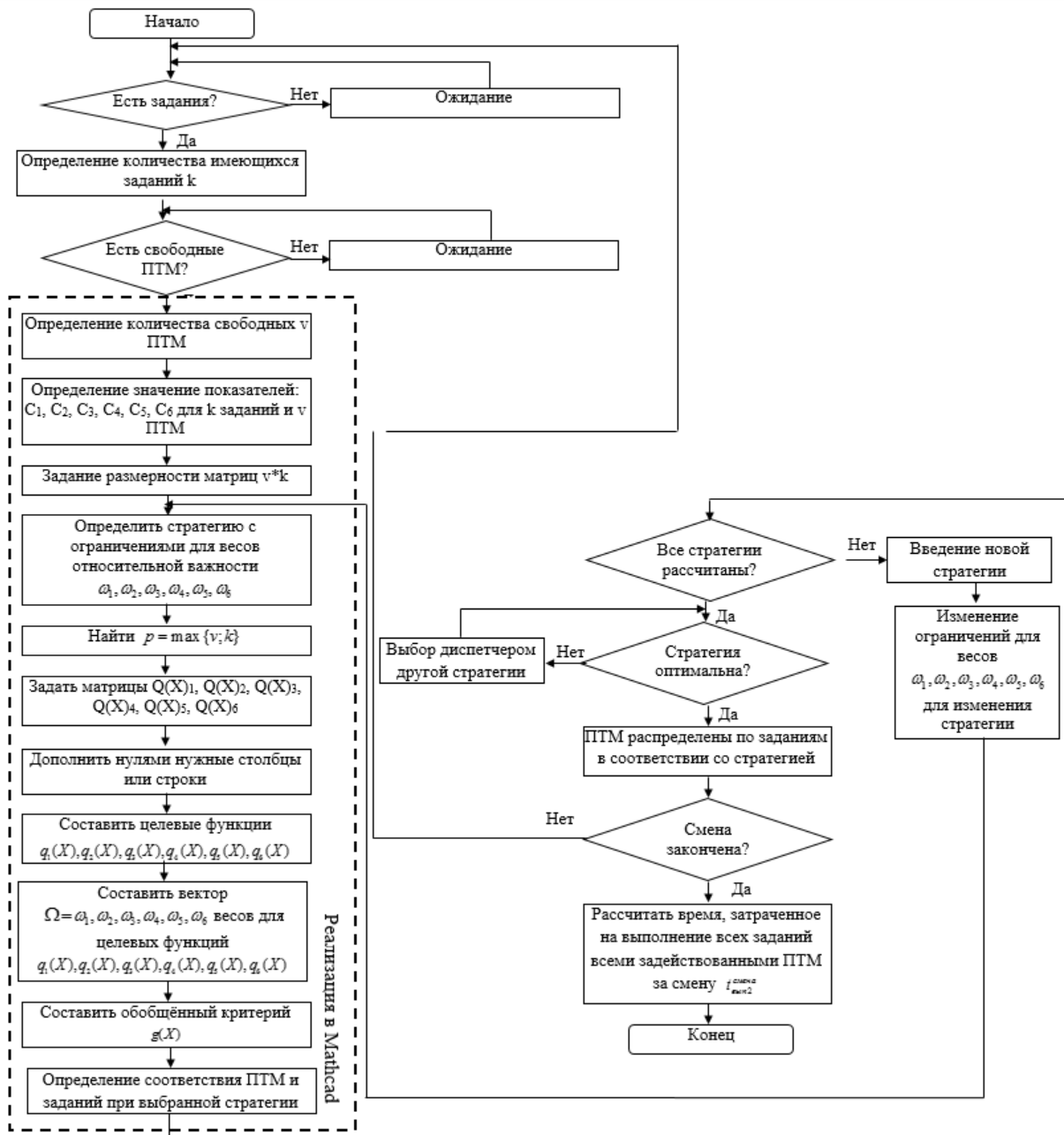


Рис. 1. Алгоритм математической модели выбора соответствия заданий и ПТМ

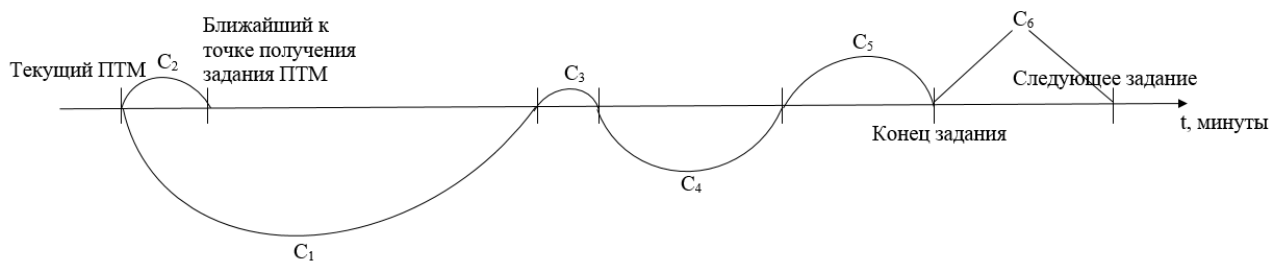


Рис. 2. Вектор времени с расположением показателей в процессе поиска и выполнения задания

$$C_2(X)_{v_k k} = \frac{I_{v_k}^{\text{рейса}}(X)_{v_k k}}{V_{\text{ср}}} - \frac{\min(I_1^{\text{рейса}}(X)_{v_k k}, I_2^{\text{рейса}}(X)_{v_k k}, \dots, I_{v_k}^{\text{рейса}}(X)_{v_k k})}{V_{\text{ср}}}. \quad (2)$$

Важно, что $C_2(X)$ учитывает будущие ситуации, заставляя текущего погрузчика конкурировать с другими погрузчиками, все еще занятыми своими текущими заданиями. Это позволяет модели принимать долгосрочные решения.

$C_3(X)$ — это время $t_{v_k}^{\text{пер}}(X)_{v_k k}$ простоя v -го погрузчика в ожидании передачи k -м краном или подъема/установки целевого контейнера (как на погрузо-разгрузочном пути, так и в зоне хранения) при взятии задания x , мин:

$$C_3(X)_{v_k k} = t_{v_k}^{\text{пер}}(X)_{v_k k}. \quad (3)$$

$C_4(X)$ — время преодоления порожнего рейса $I_{v_k}^{\text{порож}}(X)_{v_k k}$ v -м погрузчиком до места взятия контейнера по заданию x , мин:

$$C_4(X)_{v_k k} = \frac{I_{v_k}^{\text{порож}}(X)_{v_k k}}{V_{\text{ср}}}. \quad (4)$$

$C_5(X)$ — время преодоления груженого рейса $I_{v_k}^{\text{груз}}(X)_{v_k k}$ v -м погрузчиком с контейнером до места назначения, выполняемого в задании x , мин:

$$C_5(X)_{v_k k} = \frac{I_{v_k}^{\text{груз}}(X)_{v_k k}}{V_{\text{ср}}}. \quad (5)$$

$C_6(X)$ — возможность двояной операции. Если текущий v -й погрузчик назначен на x в место назначения предыдущего задания x_{k-1} , то $C_6(X) = 0$, если следующее задание x_{k+1} может образовывать двояную операцию, то $C_6(X) = 0,5$. В противном случае $C_6(X) = 1$.

Решение задачи выбора соответствия задания и погрузчика

В случае, когда количество заданий неравно количеству погрузчиков, необходимо произвести преобразования для добавления нулей в матрице показателя соответствия погрузчиков и заданий:

1. Определить значения показателей $C_1(X), C_2(X), \dots, C_6(X)$.

2. Определить стратегию с ограничениями для весов относительной важности $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5,$

$\omega_6, \omega_i > 0, \sum_i^6 \omega_i = 1$ показателей $C_1(X), C_2(X), \dots, C_6(X)$.

3. Привести матрицы $C_i(X)$ к закрытым, для чего:

а) найти $p = \max\{v; k\}$;

б) задать 6 матриц $Q_i(X)$ показателей следующим образом:

$$q_{vk} = \begin{cases} c_{vk}, v = \overline{1, V}, k = \overline{1, K}; \\ 0, v = \overline{1, p}, k = \overline{K+1, p}, \text{ если } V > K; \\ 0, v = \overline{V+1, p}, k = \overline{K, p}, \text{ если } V < K. \end{cases} \quad (6)$$

4. Составить целевые функции $q_1(X), q_2(X), q_3(X), q_4(X), q_5(X), q_6(X)$ с показателями:

$$q_1(X) = \sum_{v=1}^p \sum_{k=1}^p C_1(X)_{pp} x_{pp} \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$q_2(X) = \sum_{v=1}^p \sum_{k=1}^p C_2(X)_{pp} x_{pp} \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$q_3(X) = \sum_{v=1}^p \sum_{k=1}^p C_3(X)_{pp} x_{pp} \rightarrow \min, \quad (9)$$

$$q_4(X) = \sum_{v=1}^p \sum_{k=1}^p C_4(X)_{pp} x_{pp} \rightarrow \min, \quad (10)$$

$$q_5(X) = \sum_{v=1}^p \sum_{k=1}^p C_5(X)_{pp} x_{pp} \rightarrow \min, \quad (11)$$

$$q_5(X) = \sum_{v=1}^p \sum_{k=1}^p C_5(X)_{pp} x_{pp} \rightarrow \min. \quad (12)$$

5. Составить вектор $\Omega = \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$ весов для целевых функций $q_1(X), q_2(X), q_3(X), q_4(X), q_5(X), q_6(X)$.

6. Составить обобщенный критерий:

$$g(X) = \Delta(q_1(X), q_2(X), q_3(X), q_4(X), q_5(X), q_6(X), \Omega), \quad (13)$$

где Δ — оператор свертки.

7. Перейти к виду модели соответствием задания и ПТМ, описанной выше:

$$g(X) \rightarrow \min, \quad (14)$$

$$\sum_{v=1}^p x_{pp} = 1, k = \overline{1, p}, \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^p x_{pp} = 1, v = \overline{1, p}, \quad (16)$$

$$x_{pp} \in \{0, 1\}, v, k = \overline{1, p}. \quad (17)$$

ТАБЛИЦА 2. Сравнение стратегий

№ стратегии	Увеличение производительности работы крана, мин	Минимизация порожнего пробега погрузчика, мин
1	40,59	16,96
2	58,74	18,01
3	47,11	23,64

8. Решить венгерским методом. Результатом является получение стратегии, оптимальной по Парето.

Для нахождения наиболее оптимального распределения заданий по погрузчикам составляется таблица назначений (строки соответствуют погрузчикам, столбцы заданиям) и венгерским методом решается в среде Mathcad. Таким образом, решая задачу многократно и с изменением весовых коэффициентов, можно получить множество Парето-оптимальных стратегий с различными значениями групп показателей (табл. 2).

Для определения адекватности модели предлагается сравнить общее время выполнения всех заданий всеми погрузчиками, получен-

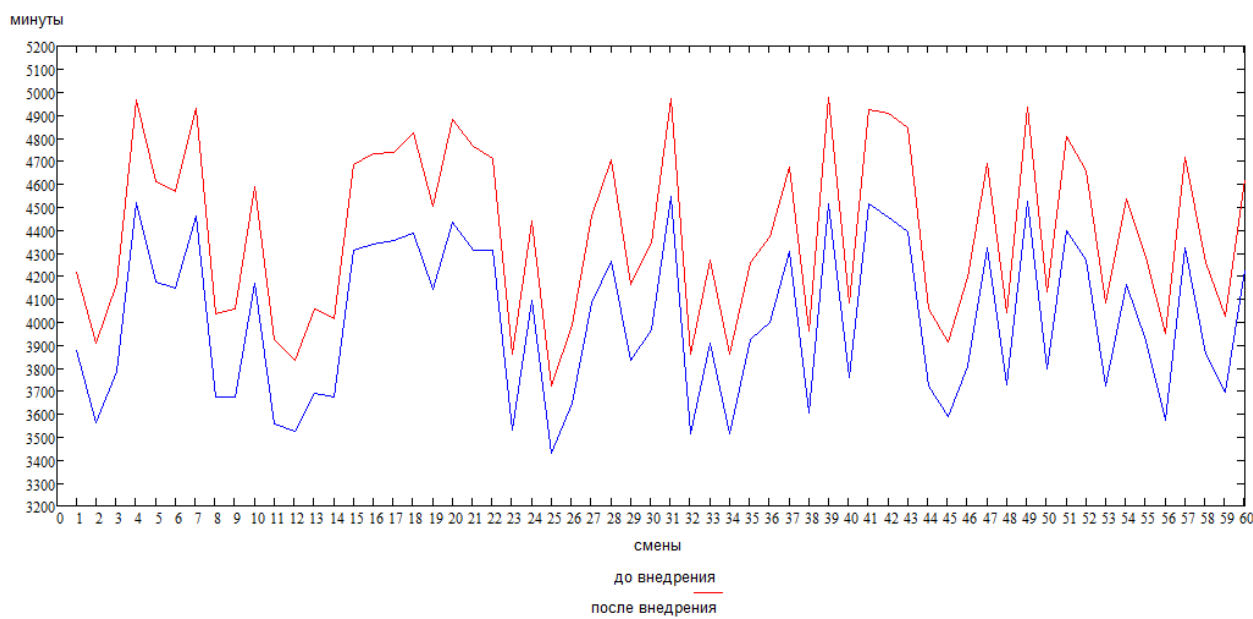


Рис. 3. Результаты моделирования предлагаемой стратегии работы и текущей технологии

ное в модели при использовании предложенной стратегии и равное 362,8 мин, и наиболее распространённый на грузовых терминалах принцип организации очереди выполнения заданий, учитывающий только порядок отправления со случайным распределением заданий, равный 396,5 мин. Из результатов видно, что стратегия, нацеленная на снижение пробега, затратила на выполнение на 9,3 % меньше времени при сохранении срока выполнения задания.

Для определения более точного сравнения модели и текущей технологии было произведено моделирование распределения заданий на контейнерном терминале в течении месяца (рис. 3), в результате которого выявлено, что стратегия, нацеленная на снижение пробега, позволяет в среднем снизить время на выполнение заданий на 9,6 %.

Библиографический список

1. Бадеецкий А. П. Оптимизация распределения контейнеропотоков на направлении Китай - европейский союз / А. П. Бадеецкий, 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. Маликов О. Б. Проектирование контейнерных терминалов / О. Б. Маликов, Е. К. Коровяковский, Ю. В. Коровяковская. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2015. — 52 с.
4. Малышев Н. В. Моделирование мультимодальных перевозок / Н. В. Малышев, К. Е. Ковалев // *Транспорт России: проблемы и перспективы* — 2018: материалы Международной-научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 13–14 ноября 2018 г. — СПб.: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2018. — С. 294–297.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Илесалиев Д. И. К вопросу о наиболее рациональном размещении грузовых терминалов / Д. И. Илесалиев, Е. К. Коровяковский // *Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 18–25 апреля 2016 г.* — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2016. — С. 162–166.
10. К вопросу развития контейнерных перевозок в России / Н. Г. Янковская, Я. Э. Яровая, К. Р. Ткачев и др. // *Russian Journal of Logistics & Transport Management*. — 2021. — Т. 6. — № 1. — С. 12–21.

Дата поступления: 15.08.2022

Решение о публикации: 31.08.2022

Контактная информация:

МАЛЫШЕВ Николай Валерьевич — ассистент;

kol.pgups@mail.ru

БОЙКОВ Сергей Анатольевич — начальник железнодорожной станции Шушары; dcs2_boykovsa@orw.ru

Mathematical Model for Task Distribution Among Lifting Transport Machines

N. V. Malyshev¹, S. A. Boikov²

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

²Oktyabrskaya railroad — Russian Railways JSC subsidiary, 1, Podyezdnoy lane, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

For citation: Malyshev N. V., Boikov S. A. Mathematical Model for Task Distribution Among Lifting Transport Machines // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 651–658. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-651-658

Summary

Purpose: To determine task rational distribution between technics specialized in intra-terminal movements is to perform mathematical modeling of lifting transport machine operation in container terminal transport transshipment system given technological parameters and further multi-criteria optimization. **Methods:** Methods of probability theory and mathematical statistics as well as of expert estimates are used to discover the distribution. **Results:** Mathematical model of task distribution among lifting transport machines (LTM) has been developed. Total time dependences for completing LTM tasks using the current technology and task execution strategy at calculation of Pareto optimality towards six criteria, aimed at crane performance increase and empty LTM mileage minimization, are determined. **Practical significance:** Tasks rational distribution amongst techniques for container movement is proposed, which allows to increase processing capacity of a container terminal and to reduce technique operating costs.

Keywords: Automation, lifting transport machine, 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 traffic in the direction China — European Union]. *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 scientific research results]. 2020, I. 1, pp. 15–25. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-1-15-25. (In Russian)

3. Malikov O. B., Korovyakovskiy E. K., Korovyakovskiy Yu. V. *Proektirovanie konteynernykh terminalov* [Design of container terminals]. St. Petersburg: Peterburgskiy

gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ., 2015. 52 p. (In Russian)

4. Malyshev N. V., Kovalev K. E. Modelirovanie mul'timodal'nykh perevozok [Modeling of multimodal transportation]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2018: materialy Mezhdunarodnoy-nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 13–14 noyabrya 2018 g.* [Transport of Russia: problems and prospects — 2018: materials of the International scientific and practical conference, St. Petersburg, November 13–14, 2018]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy universitet Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby Ministerstva Rossiyskoy Federatsii po delam grazhdanskoy oborony, chrezvychaynym situatsiyam i likvidatsii posledstviy stikhiynykh bedstviy Publ., 2018, pp. 294–297. (In Russian)

5. Konogray O. A., Voronov A. A. Perspektivy konversii mezhhdunarodnykh 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 transit “China — Europe”]. *Ekonomika ustoychivogo razvitiya* [Economics of sustainable development]. 2022, I. 2(50), pp. 190–193. DOI: 10.37124/20799136_2022_2_50_190. (In Russian)

6. Palamarchuk G. I., Kuzmenkov 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 equipment and transport technologies]. 2019, I. 3(41), pp. 112–117. (In Russian)

7. Kobozeva N. G. Analiz pokazatelye effektivnosti ispol'zovaniya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Analysis of indicators of the effectiveness of the use of railway rolling stock]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2020, vol. 17, I. 1, pp. 77–83. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-77-83. (In Russian)

8. 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 scientific research results]. 2020, I. 1, pp. 15–25. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-1-15-25. (In Russian)

9. Ilesaliev D. I., Korovyakovskiy E. K. K voprosu o naibolee ratsional'nom razmeshchenii gruzovykh terminalov [On the most rational placement of cargo terminals]. *Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXVI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Sankt-Peterburg, 18–25 aprelya 2016 g.* [Transport: problems, ideas, prospects: Proceedings of the LXXVI All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, St. Petersburg, April 18–25, 2016]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2016, pp. 162–166. (In Russian)

10. Yankovskaya N. G., Yarovaya Ya. E., Tkachev K. R. K voprosu razvitiya kontreylernykh perevozok v Rossii [On the development of piggyback transportation in Russia]. *Russian Journal of Logistics & Transport Management*. 2021, vol. 6, I. 1, pp. 12–21. (In Russian)

Received: August 15, 2022

Accepted: August 31, 2022

Author's information:

Nicolay V. MALYSHEV — Assistant;

kol.pgups@mail.ru

Sergey A. BOIKOV — Head of Shushary Railway Station;

dcs2_boykovsa@orw.ru