

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 20, выпуск 3, 2023

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Учредитель

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

Издатель

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

Адрес учредителя

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

Адрес издателя

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

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

Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

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

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется

Индекс подписки Агентство «Книга-Сервис» 33315

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

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

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

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

РЕДКОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Фото на обложке предоставлено пресс-службой ФГБОУ ВО ПГУПС

Подписано в печать с оригинал-макета 19.09.2023.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 35,5.
Тираж 300 экз. Заказ. Цена свободная.

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

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY,
volume 20, issue 3, 2023

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Publisher

Limited Liability Company

"Publishing Center RIOR" under contract

N ЭА94514 dated December 19, 2022

Founder's address

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

Publisher's address

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

Mass media registration

certificate number

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

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

© Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

М. А. Карюкин

Многовариантное моделирование параметров конструкции упругих клемм современных рельсовых скреплений с анализом их напряженно-деформированного состояния 507

Д. В. Даниленко, В. П. Ефимов, В. А. Чернов

Исследование усталостной долговечности пружин боковых скользунов тележки модели 18-9891 519

С. Т. Джаббаров, Н. Б. Кодиров

Анализ влияния динамической нагрузки колеса на рельсы условиях скоростного движения поездов в Узбекистане 531

Н. М. Магомедова, В. В. Хан

Актуальные вопросы в грузовой и коммерческой работе на железнодорожных станциях 544

К. Е. Ковалев, И. Л. Сакович, А. В. Новичихин

Методика повышения эффективности эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий на основе логистического подхода 554

М. Ван

Понятие, признаки и особенности использования инновационных видов транспортно-логистических услуг 568

О. Р. Хамидов, Б. Т. Кулманов

Оценка качества работы тепловозного дизеля применением управляемых клапанов 577

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Г. И. Паламарчук, П. Ю. Либерман, В. Н. Кузьменкова

Секвестирование бюджета как способ повышения эффективности управления расходами в авиационной деятельности 586

А. Л. Харитоненко, А. Б. Завьялов, Я. В. Зачиняев

Система совместного использования обедненного метана угольных пластов и биогаза для выработки электроэнергии в угольных шахтах 595

Н. А. Черников, А. В. Кудрявцев

Рациональное соотношение качества воды водного объекта и качества сбрасываемых сточных вод 604

Е. Г. Третьякова

Храмовые здания из быстровозводимых блок-модулей в сейсмически активных районах Сибири и Дальнего Востока на примере Забайкальского региона 614

В. В. Веселов

Применение сталежелезобетонных конструкций в мостовых сооружениях 633

В. Н. Смирнов	Вопросы проектирования и строительства мостовых сооружений для отечественных высокоскоростных железнодорожных магистралей.....	645
Г. А. Богданова, Ж. В. Иванова	Применение динамических гасителей колебаний для повышения устойчивости башенных сооружений связи к ветровым воздействиям.....	660
Е. Р. Богданова, А. В. Бенин	Прогнозирование значений предела прочности при растяжении и модуля упругости композитной арматуры большого диаметра по косвенным признакам.....	673
П. И. Татаренко, С. В. Чижов, Ю. В. Авдей, А. А. Антонюк	Метод продольной надвижки с плавучей опорой металлических комбинированных пролетных строений мостов	685
Р. Г. Ахтямов, Е. И. Макарова, А. А. Гаврилова	Анализ выбросов парниковых газов стран BRICS и пути сокращения выбросов на железнодорожном транспорте	694
А. А. Гаврилова, Е. И. Макарова, Р. Г. Ахтямов	Аккумуляция тяжелых металлов в почвах и фитомассе на урбанизированных территориях	706
О. К. Суворова, В. Я. Соловьева, М. С. Абу-Хасан, А. В. Харламова	Особенности загрязнения почвы на территории аэропорта, выявленные по результатам инженерно-экологических изысканий	715
А. Л. Харитonenко, В. Я. Соловьева	Экологические аспекты при утилизации отработанных охлаждающих жидкостей.....	721
П. В. Герасименко	Алгоритм оценивания публикационной активности преподавателей вузов, направленный на улучшение научно-педагогической деятельности	731
В. Ф. Лапшин	Расчет времени промерзания надземного водовода в условиях отрицательных температур ...	740
А. В. Харламова, А. Л. Харитonenко, В. Я. Соловьева, О. К. Суворова	Гидрологические условия формирования фитоценозов на рекультивированных отвалах угольных шахт	751



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

О. Г. Евдокимова, С. М. Куценко, Б. А. Мешков	Применение технологии интернета вещей для передачи данных от автоматического измерителя сопротивления заземления.....	758
Е. В. Опарин	Методика формирования комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени для крупной распределенной системы технологического назначения	768

CONTENTS

→ PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM

M. A. Karyukin

Multivariate Modeling of Design Parameters of Elastic Clips of Modern Rail Fasteners,
with Analysis of Their Stress-Strain State 517

D. V. Danilenko, V. P. Efimov, V. A. Chernov

Research on Fatigue Durability of Side Bearing Springs for Model 18-9891 Bogie 529

S. T. Jabbarov, N. B. Kodirov

Analysis of the Impact of Wheel Dynamic Load on Rails under High-Speed Train
Operations in Uzbekistan 542

N. M. Magomedova, V. V. Khan

Actual Issues in Cargo and Commercial Work at Railway Stations 552

K. E. Kovalev, I. L. Sakovich, A. V. Novichikhin

Methodology for Improving the Efficiency of Operation of Low-Intensity Railway
Lines Based on a Logistic Approach 566

M. Wang

Concept, Features and Characteristics of Innovative Types of Transport
and Logistics Services Utilization 575

O. R. Khamidov, B. T. Kulmanov

Evaluation of Diesel Locomotive Performance Using Controlled Valves 584

→ GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

G. I. Palamarchuk, P. Yu. Liberman, V. N. Kuzmenkova

Budget Sequestration As a Way to Increase the Efficiency
of Cost Management in Aviation Activities 593

A. L. Kharitonenko, A. B. Zavyalov, Ya. V. Zachinyaev

A System for the Joint Use of Coalbed Lean Methane and Biogas
to Generate Electricity in Coal Mines 602

N. A. Chernikov, A. V. Kudryavtsev

A Rational Relationship between the Water Quality of a Water Body
and the Quality of Discharged Wastewater 612

E. G. Tretyakova

Temple Buildings Made of Prefabricated Block Modules in Seismically Active Areas
of Siberia and the Far East on the Example of the Trans-Baikal Region 629

V. V. Veselov

Application of Steel-Reinforced Concrete Structures in Bridge Constructions 642

V. N. Smirnov	Issues of Design and Construction of Bridge Structures for Domestic High-Speed Railways.....	657
G. A. Bogdanova, Zh. V. Ivanova	The Use of Dynamic Vibration Dampers to Increase the Stability of Tower Communication Structures under Wind Loads	671
E. R. Bogdanova, A. V. Benin	Forecasting Ultimate Tensile Strength and Elastic Modulus Values of Large-Diameter Composite Rebar Using Indirect Indicators	681
P. I. Tatarenko, S. V. Chizhov, Y. V. Avdey, A. A. Antonyuk	The Incremental Launching Method with a Floating Support of Metal Combined Bridge Superstructures.....	692
R. G. Akhtyamov, E. I. Makarova, A. A. Gavrilova	Analysis of Greenhouse Gas Emissions in BRICS and Ways to Reduce Emissions from Rail Transport	703
A. A. Gavrilova, E. I. Makarova, R. G. Akhtyamov	Accumulation of Heavy Metals in Soils and Phytomass in Urbanized Areas.....	712
O. K. Suvorova, V. Ya. Solovieva, M. S. Abu-Khasan, A. V. Kharlamova	Features of Soil Contamination on the Airport Territory Revealed Through Engineering and Environmental Survey.....	719
A. L. Kharitonenko, V. Ya. Solovieva	Environmental Aspects in the Disposal of Used Coolants.....	729
P. V. Gerasimenko	The Algorithm for Evaluating the Publication Activity of University Lecturers Aimed at Improving Scientific and Pedagogical Activity.....	738
V. F. Lapshin	Freezing Time Calculation of the Above-Ground Water Pipeline Under Conditions of Negative Temperatures.....	749
A. V. Kharlamova, A. L. Kharitonenko, V. Ya. Solovieva, O. K. Suvorova	Hydrological Conditions for the Formation of Phytocenoses on Reclaimed Colliery Spoil Heaps	756



HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

O. G. Evdokimova, S. M. Kutsenko, B. A. Meshkov	Application of the Internet of Things Technology for Data Transmission from an Automatic Grounding Resistance Meter.....	766
E. V. Oparin	The Methodology for the Formation of a Comprehensive System of Synchronization and Delivery of the Time Scale for a Large-Scale Distributed Technological Purpose System	782



УДК 625.143

Многовариантное моделирование параметров конструкции упругих клемм современных рельсовых скреплений с анализом их напряженно-деформированного состояния

М. А. Карюкин

Сибирский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191

Для цитирования: Карюкин М. А. Многовариантное моделирование параметров конструкции упругих клемм современных рельсовых скреплений с анализом их напряженно-деформированного состояния // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 507–518. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-507-518

Аннотация

Цель: Определить влияние геометрических параметров наиболее распространенной упругой прутковой клеммы современных промежуточных рельсовых скреплений — В-образной клеммы (типа ЖБР и АРС) на изменение ее напряженно-деформированного состояния. Предложить дальнейшее направление совершенствования конструкции упругих прутковых клемм рельсовых скреплений для увеличения надежности конструкции. **Методы:** В статье приведены результаты многовариантного моделирования геометрических параметров клемм (ЖБР — 20 шт., АРС — 13 шт.) с анализом их напряженно-деформированного состояния, с использованием методов программно-вычислительных комплексов SolidWorks и Ansys Workbench. **Результаты:** Анализ конструкции современных скреплений показал, что интервалы варьирования геометрических параметров клемм (диаметр прутка, вертикальный радиус, горизонтальный радиус) имеют небольшие пределы и существенные ограничения, связанные с требованиями обеспечения прочности, упругости и работоспособности всего скрепления. Выявлена необходимость рассмотрения вариантов с вертикальными радиусами менее 60 мм, что влечет за собой необходимость коренного изменения самой формы клемм. **Практическая значимость:** Анализ расчетов многовариантных моделей показал степени влияния интервалов варьирования геометрических параметров прутковых клемм (диаметр прутка, вертикальный радиус, горизонтальный радиус) на напряженно-деформированное состояние. Установлено, что для дальнейшего увеличения упругости клемм необходима разработка нового типа рельсового скрепления с принципиально иной формой (отличной от современной В-образной формы) упругой клеммы, не обладающей современными конструктивными ограничениями в геометрических параметрах.

Ключевые слова: Железнодорожный путь, рельсовое скрепление, программно-вычислительный комплекс, SolidWorks, Ansys, геометрические параметры, напряжения.

Введение

В качестве современных промежуточных рельсовых креплений для сети Российских железных дорог можно выделить крепления типа ЖБР и АРС [1–6]. Данные крепления имеют схожую конструкцию клеммы — В-образную упругую прутковую клемму [7] (рис. 1).

Дальнейшее совершенствование конструкции упругих клемм рельсовых креплений [2, 6, 8] подразумевает определение их наиболее оптимальных геометрических параметров, обеспечивающих наибольший упругий ход уса клеммы при сохранении прочности и надежности конструкции.

Поскольку главным параметром для упругих клемм является усталостная прочность, при проведении исследования граничным условием считается непревышение предела текучести выбранного материала.

Материалы и методы исследования

Определение наиболее оптимальных геометрических параметров выполняется в результате анализа напряженно-деформированного состояния [9] упругих прутковых клемм, проводилось на основе многовариантного компьютерного моделирования с использованием программно-вычислительных комплексов SolidWorks и Ansys Workbench.

SolidWorks использовался в качестве графического редактора для построения трехмерных моделей упругих В-образных прутковых клемм (тип ЖБР — 20 шт., тип АРС — 13 шт.). Подготовленные трехмерные модели подгружались в качестве объектов исследования в Ansys Workbench для последующей оценки напряженно-деформированного состояния на основе анализа методом конечных элементов.

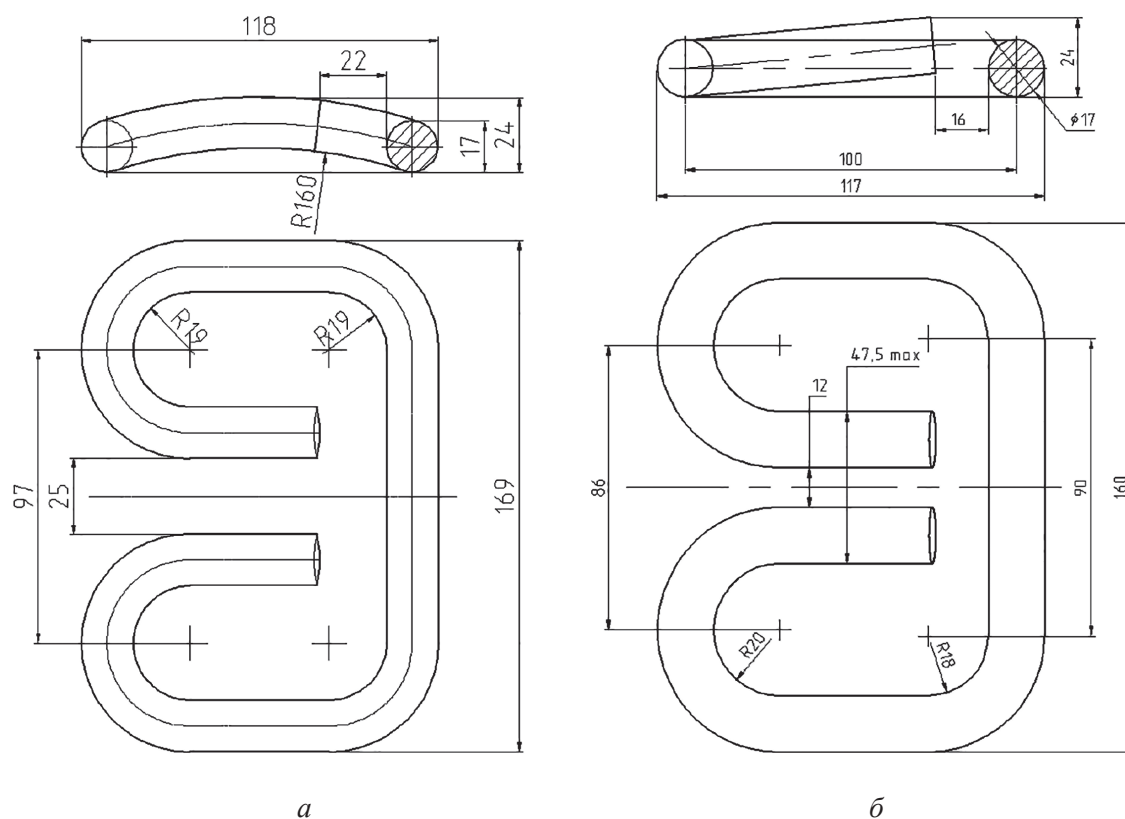


Рис. 1. Типовые геометрические размеры упругих клеммы:
a — клемма ЖБР-3; *б* — клемма АРС

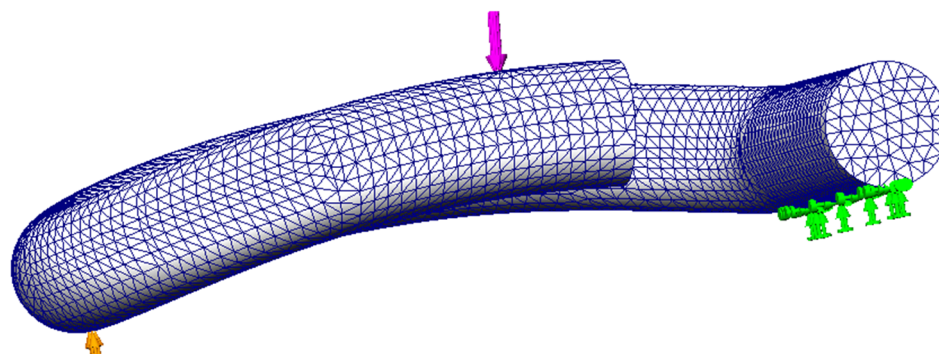


Рис. 2. Расчетная модель на примере клеммы ЖБР

При компьютерном моделировании клемм ЖБР и АРС использовалась сталь марки 60С2А с пределом текучести 1570 МПа.

Для обеспечения стабильного положения бесстыковой плети относительно железобетонных шпал необходимо, чтобы погонное сопротивление смещению плети составляло 25 кН/м [10], что определяет усилие прижатия упругих клемм — 20 кН.

В качестве граничных условий используются жесткая заделка на основании нарельсовой части клеммы и ролик/ползун на основании нашпальной части (рис. 2).

Результаты исследования

Результаты исследования напряженно-деформированного состояния упругих В-образных клемм приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение напряженно-деформированного состояния типовых упругих клемм ЖБР и АРС

Параметр	Упругая прутковая клемма	
	ЖБР-3	АРС
Максимальное напряжение, МПа	1451	1506
Максимальное перемещение концов усов клеммы, мм	7,84	8,95
Перемещение усов клеммы в точке приложения силы, мм	6,15	7,47

Анализ напряженно-деформированного состояния современных клемм креплений ЖБР и АРС с типовыми геометрическими параметрами, по данным табл. 1: перемещение усов клеммы ЖБР на 17 % ниже, чем клеммы АРС, максимальные напряжения в клемме ЖБР на 4 % ниже, чем в АРС.

Как уже говорилось ранее, клеммы креплений ЖБР и АРС имеют схожую конструкцию, поэтому в дальнейшем обозначим два типа конструкций В-образных клемм:

- тип А — В-образная клемма с криволинейными очертаниями боковых частей и усов (соответствует клемме ЖБР-3);
- тип Б — В-образная клемма с прямолинейными очертаниями боковых частей и усов (соответствует клемме АРС).

Анализ влияния геометрических параметров упругих прутковых В-образных клемм на их напряженно-деформированное состояние

Рассмотрено влияние трех варьируемых геометрических параметров упругих прутковых клемм (диаметр прутка, вертикальный радиус, горизонтальный радиус) на внутренние напряжения клемм и перемещение усов клеммы.

Типовые размеры упругих прутковых клемм приведены в табл. 2, для клеммы АРС через дробь указан радиус сопряжения прямолинейного нарельсового и бокового участков (рис. 1).

ТАБЛИЦА 2. Типовые размеры клемм

Тип клеммы	Диаметр прутка, мм	Вертикальный радиус, мм	Горизонтальный радиус, мм
А (ЖБР-3)	17	160	19
Б (АРС)	17	∞	20/18

Прутковые клеммы с указанными в табл. 2 типовыми геометрическими размерами будут обозначаться базовым нулевым вариантом (0 вариант).

Результаты исследования многовариантных моделей клеммы типа А (23 шт.) — В-образной клеммы с криволинейными очертаниями боковых частей и усов представлены на рис. 3–8.

Влияние вертикальных радиусов на напряженно-деформированное состояние клеммы типа А

В ходе моделирования В-образной клеммы с криволинейными очертаниями боковых частей и усов (тип А) построено 13 вариантов клеммы с различными вертикальными радиусами (рис. 3, 4).

Влияние 7 вариантов вертикальных радиусов (120–180 мм) на изменение перемещения усов клеммы типа А и максимальные напряжения оказалось незначительным (в пределах 1 %). При величине вертикального радиуса более 180 мм форма клеммы типа А становится наиболее приближенной к плоской, как у клеммы типа Б. Поэтому в расчетах вертикальные радиусы более 180 мм для В-образной конструкции клемм не рассматриваются.

Влияние других 6 вариантов вертикальных радиусов (в интервале 60–110 мм) с большей кривизной показало, что перемещение усов клеммы и максимальные внутренние напряжения увеличиваются на 5–6 %.

Влияние диаметра прутка на напряженно-деформированное состояние клеммы типа А

Результаты моделирования клемм типа А с 5 вариантами диаметра прутка приведены на рис. 5, 6.

Диаметр сечения прутка 17 мм является наиболее удачным, поскольку максимальные напряжения в клеммах меньших диаметров превышают

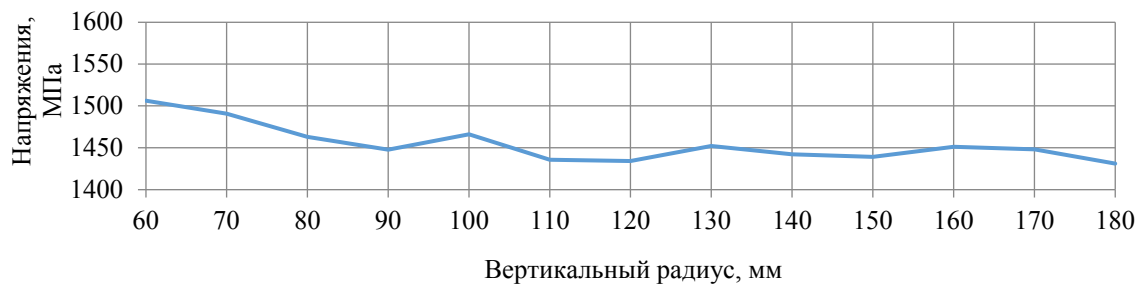


Рис. 3. Зависимость напряжений от вертикального радиуса для клеммы типа А

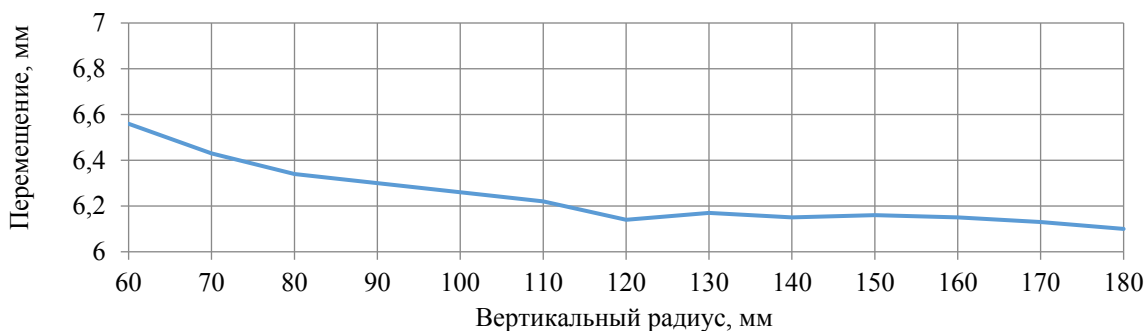


Рис. 4. Зависимость перемещений от вертикального радиуса для клеммы типа А

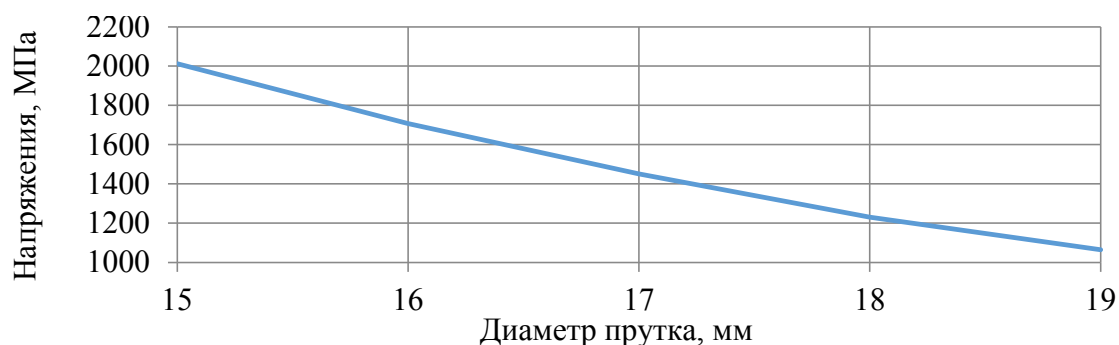


Рис. 5. Зависимость напряжений от диаметра прутка для клеммы типа А

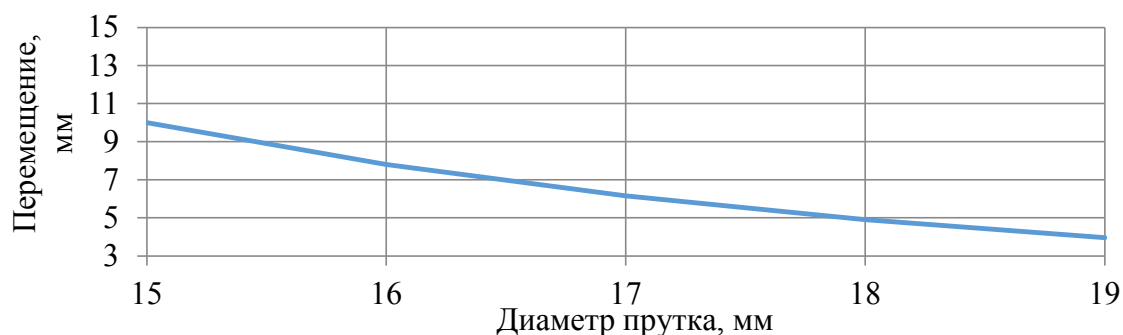


Рис. 6. Зависимость перемещений от диаметра прутка для клеммы типа А

предел текучести стали, а большие диаметры, 18 и 19 мм, снижают упругие перемещения усов клеммы на 20,3 % и 35,7 % соответственно.

Влияние горизонтального радиуса на напряженно-деформированное состояние клеммы типа А

На рис. 7, 8 представлены результаты моделирования клеммы типа А с 4 вариантами горизонтальных радиусов.

Увеличение горизонтального радиуса до 20 мм обеспечивает немного больший упругий ход уса клеммы (6,5 мм), что на 5 % больше в сравнении с базовым вариантом. Представляется полезным дальнейшее увеличение горизонтального радиуса клеммы, вплоть до смыкания двух горизонтальных радиусов в один радиус 41,5 мм за счет прямого бокового участка клеммы.

С использованием программно-вычислительных комплексов SolidWorks и Ansys определено,

что типовые сочетания геометрических параметров клеммы типа А являются оптимизированными и обеспечивают сравнительно наибольшую величину упругого хода уса клеммы при сравнительно меньших внутренних напряжениях, не превышающих предел текучести выбранного материала.

Результаты исследования многовариантных моделей клеммы типа Б (22 шт.) представлены на рис. 9–14.

Влияние диаметра прутка на напряженно-деформированное состояние клеммы типа Б

Результаты исследования клеммы типа Б с 6 вариантам диаметра прутка представлены на рис. 9, 10.

Как и следовало ожидать, результаты моделирования клеммы с измененными диаметрами прутка для клеммы типа А и типа Б схожи. Оптимальный диаметр сечения прутка — 17 мм.

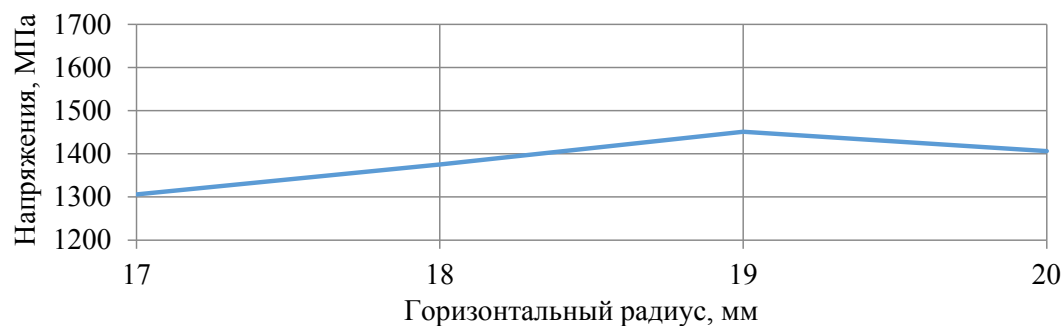


Рис. 7. Зависимость напряжений от горизонтального радиуса для клеммы типа А

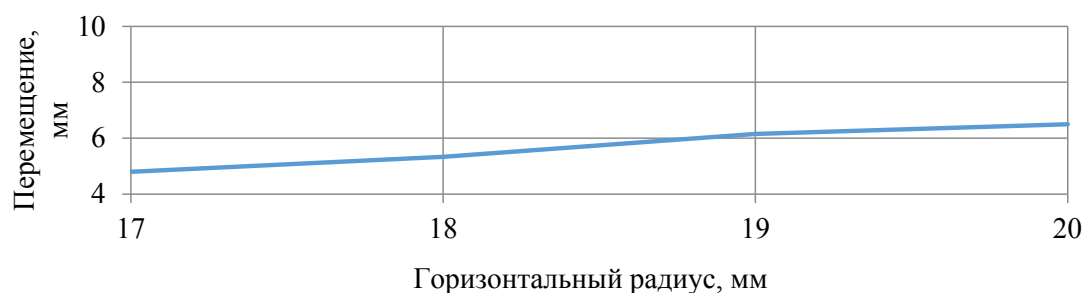


Рис. 8. Зависимость перемещений от горизонтального радиуса для клеммы типа А

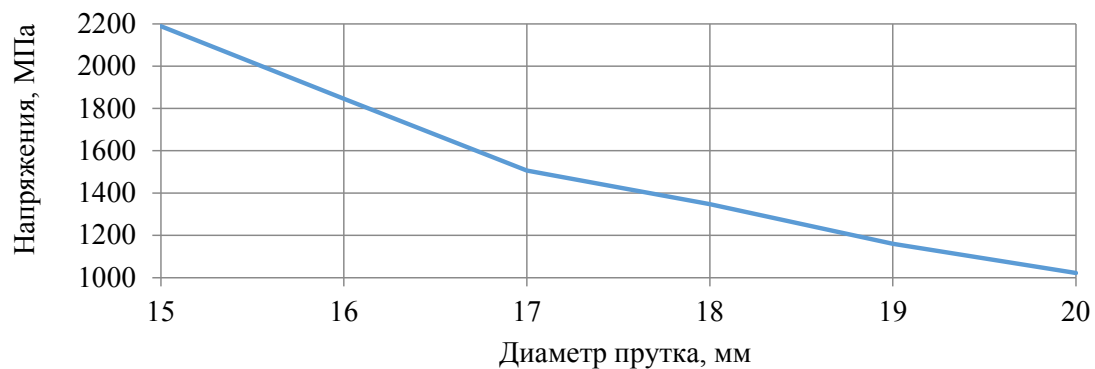


Рис. 9. Зависимость напряжений от диаметра прутка для клеммы типа Б

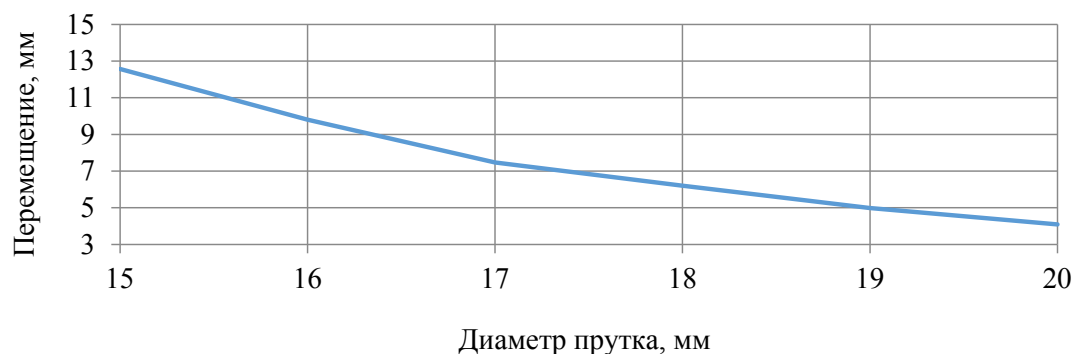


Рис. 10. Зависимость перемещений от диаметра прутка для клеммы типа Б

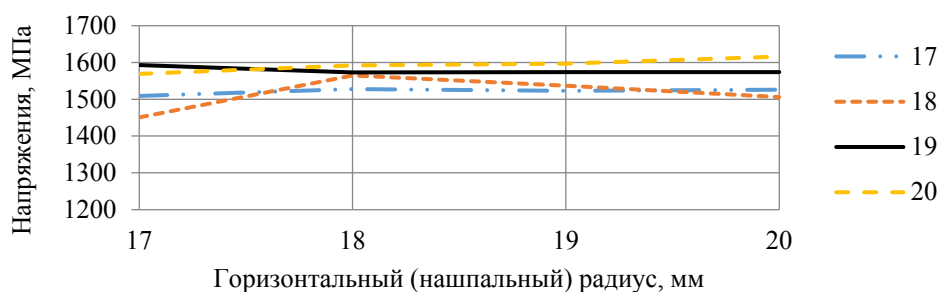


Рис. 11. Зависимость напряжений от горизонтального радиуса (нашпального) с учетом 4 нарельсовых радиусов клеммы типа Б

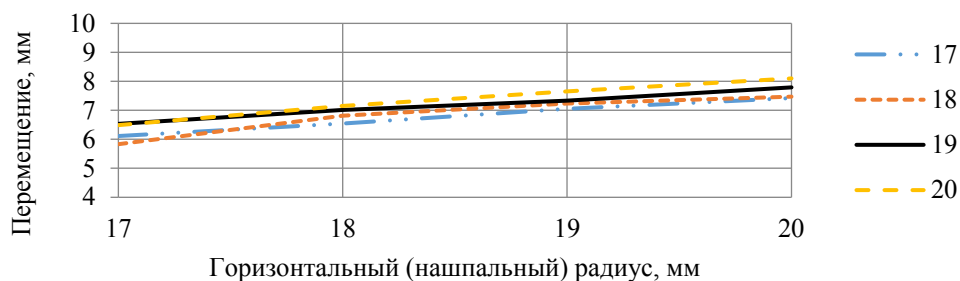


Рис. 12. Зависимость перемещений от горизонтального радиуса (нашпального) с учетом 4 нарельсовых радиусов клеммы типа Б

Влияние горизонтальных радиусов на напряженно-деформированное состояние клеммы типа Б

Конструкция клеммы типа Б имеет различные радиусы сопряжения бокового и нашпального участка и бокового и нарельсового участка. При моделировании клеммы типа Б рассматривались 4 различных сочетания горизонтальных радиусов (рис. 11, 12).

Другими словами, детальнее рассмотрены зависимости напряженно-деформированного состояния от изменения горизонтальных радиусов клеммы, с учетом варьирования размеров отдельно для нарельсового и нашпального радиусов.

Определено, что изменение радиуса сопряжения прямолинейного нарельсового и бокового участков (нарельсового радиуса) оказывает большее влияние на изменение внутренних напряжений клеммы АРС, чем радиус сопряжения нашпального участка и уса клеммы (нашпаль-

ный радиус), при этом перемещения изменяются незначительно.

В то же время изменение радиуса сопряжения нашпального участка и уса клеммы (нашпальный радиус) в большей степени влияет на величину максимальных перемещений, при этом внутренние напряжения изменяются незначительно.

Определение оптимальных геометрических параметров упругих В-образных клемм на основе анализа сборных вариантов.

Проведено определение оптимальных геометрических параметров упругих клемм с криволинейными очертаниями боковых частей и усов (тип А) и прямолинейными очертаниями боковых усов (тип Б) на основе анализа сборных вариантов.

На основе полученных ранее зависимостей влияния геометрических параметров прутковых клемм типа А на их напряженно-деформирован-

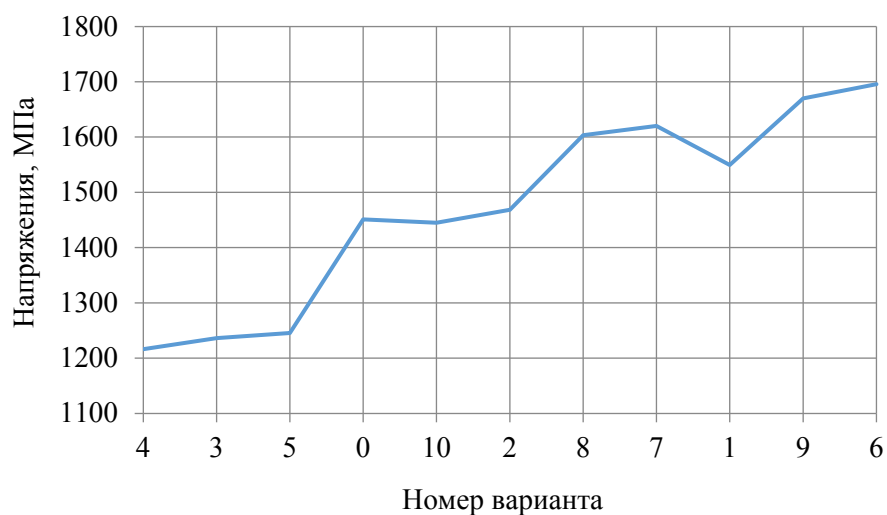


Рис. 13. Сравнение перемещений в сборных вариантах клеммы типа А

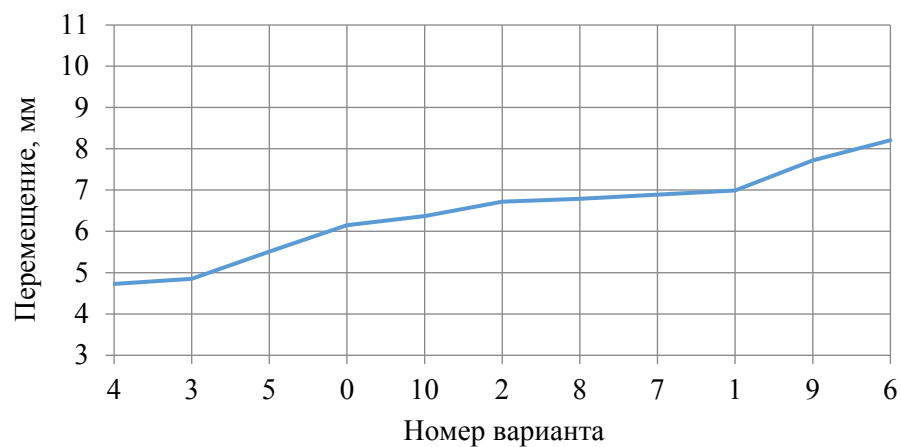


Рис. 14. Сравнение напряжений в сборных вариантах клеммы типа А

ТАБЛИЦА 3. Сборные варианты геометрических параметров клеммы типа А

Номер варианта	Диаметр прута, мм	Вертикальный радиус, мм	Горизонтальный радиус, мм	Напряжения, МПа	Перемещения, мм
0	17	160	19	1451	6,15
1	17	60	20	1549	6,99
2	17	80	20	1468	6,72
3	18	70	18	1236	4,85
4	18	90	18	1217	4,73
5	18	100	20	1246	5,51
6	16	80	20	1696	8,21
7	16	90	18	1620	6,89
8	16	110	18	1603	6,79
9	16,5	60	20	1670	7,72
10	17,5	60	20	1445	6,37

ТАБЛИЦА 4. Сборные варианты геометрических параметров клеммы типа Б

Номер варианта	Диаметр прутка, мм	Нашпальный радиус, мм	Нарельсовый радиус, мм	Напряжения, МПа	Перемещения, мм
0	17	20	18	1506	7,47
1	16	17	18	1520	6,34
2	16	18	18	1689	7,47
3	16	18	17	1689	7,52
4	17,5	17	18	1373	5,41
5	17,5	18	18	1135	4,38
6	17,5	18	17	1146	4,4
7	18	17	18	1349	5,19
8	18	18	18	1179	4,92
9	18	18	17	1229	5,11

ное состояние дополнительно проведены расчеты 10 сборных вариантов клеммы типа А.

Под сборными вариантами подразумеваются модели с несколькими измененными геометрическими параметрами (диаметр прутка, вертикальный и горизонтальный радиусы).

Результаты исследования приведены в табл. 3.

На рис. 13, 14 представлено наглядное сравнение сборных вариантов клемм типа А с базовым 0 вариантом.

По результатам анализа напряженно-деформированного состояния определено, что комбинация геометрических параметров для существующей клеммы типа А (ЖБР-3, 0 вариант) является хорошо сбалансированной.

Также определено, что клеммы ЖБР 1, 2 и 10 вариантов могут оказаться альтернативными, близкими по эффективности базовому, 0 варианту, так как они также обеспечивают увеличение упругого хода уса клеммы при сохранении внутренних напряжений, не превышающих значений допускаемых напряжений по пределу текучести стали.

При сравнении 2 и 10 вариантов с 0 базовым наблюдается увеличение упругого хода клеммы на 3 и 10 % соответственно, сопровождающееся небольшим изменением напряжений (1 %). В 1 варианте определено немного большее изменение внутренних напряжений (7 %), при этом упругий ход уса клеммы увеличивается (на 13 %).

На основе полученных ранее зависимостей влияния геометрических параметров прутковых клемм типа Б на их напряженно-деформированное состояние дополнительно проведены расчеты 10 сборных вариантов клеммы типа Б, в которых комбинируются различные варианты диаметра прутка, нашпального и нарельсового радиусов (табл. 4).

Оптимальными величинами для данных параметров является интервал от 17 до 18 мм. Поскольку ранее уже определена доля влияния изменения вертикального радиуса на напряженно-деформированное состояние клеммы, для облегчения анализа результатов рассматривается плоская конструкция В-образной клеммы.

На рис. 15, 16 представлено наглядное сравнение сборных вариантов клемм типа Б с базовым (вариант 0). Для более удобного представления данных расположим графики в порядке возрастания величин напряжений и перемещений.

На графиках наглядно показано, что комбинация геометрических параметров для существующей клеммы типа Б (АРС, 0 вариант) является наиболее удачной, так как обеспечивает наибольшие перемещения в точке приложения силы, сохраняя наименьшие внутренние напряжения.

Близким, но не лучшим в сравнении с базовым 0 вариантом является 1 вариант, который показал ухудшения по напряжениям (1 %) и упругому ходу (15 %).

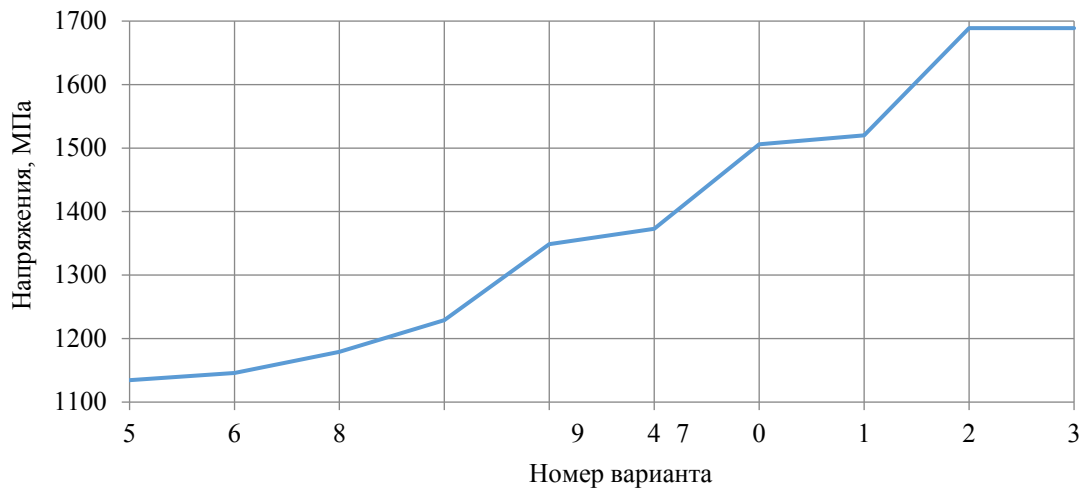


Рис. 15. Сравнение напряжений в сборных вариантах клеммы типа Б

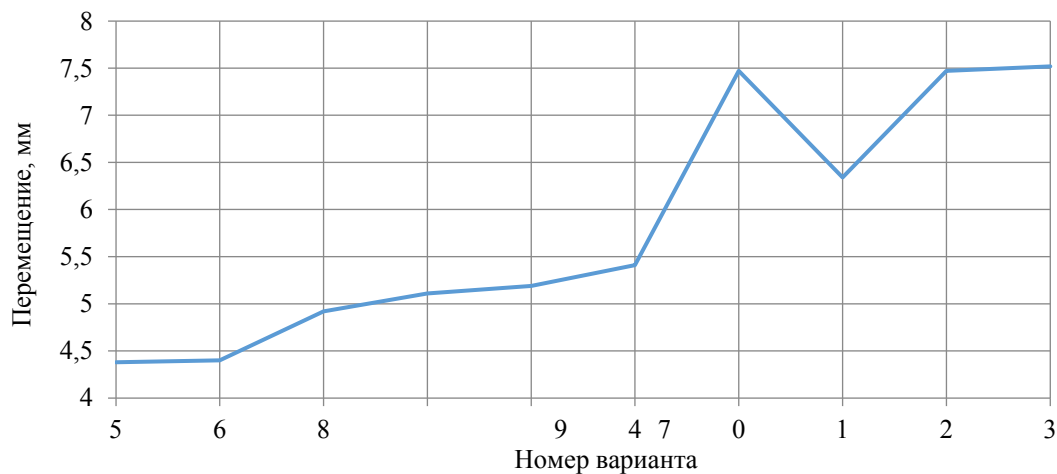


Рис. 16. Сравнение перемещений в сборных вариантах клеммы типа Б

Выводы

1. Анализ конструкции современных промежуточных рельсовых скреплений показал, что интервалы варьирования геометрических параметров прутковых клемм (диаметр прутка, вертикальный радиус, горизонтальный радиус) имеют относительно небольшие пределы и существенные ограничения, связанные с требованиями обеспечения прочности, упругости и работоспособности всего узла скрепления.

2. Результаты многовариантного моделирования прутковых клемм показали, что относительно небольшие интервалы варьирования изменения геометрических параметров существующих конструкций прутковых клемм имеют

небольшое влияние на изменение их напряженно-деформированного состояния (до 15 % по упругому ходу).

3. Наибольшим влиянием на изменение напряженно-деформированного состояния клемм обладает параметр «диаметр прутка» (до 50 %), но он имеет разнонаправленные требования по обеспечению прочности и упругости. Варьирование параметра вертикального радиуса боковой части клеммы от ∞ до 120 мм (соответственно для АРС и ЖБР) не сильно влияет на внутренние напряжения и упругий ход (в пределах 1 %).

Для дальнейшего совершенствования конструкции клеммы рекомендуется рассмотреть варианты клемм с вертикальными радиусами менее 60 мм,

что влечет за собой необходимость коренного изменения самой формы клемм.

4. Для значительного увеличения надежности клемм необходимы дальнейшие исследования по разработке нового типа рельсового скрепления с принципиально иной формой (отличной от современной В-образной формы) упругой прутковой клеммы.

Библиографический список

1. Крысанов Л. Г. Определение напряженно-деформированного состояния и усталостной прочности клемм ЖБР-3 / Л. Г. Крысанов, А. А. Дорошкевич, А. С. Антипов и др. // Повышение надежности работы верхнего строения пути в современных условиях эксплуатации: сборник научных трудов. Сер.: Труды ВНИИЖТа. — М.: Интекст, 2000. — С. 93–99.

2. Виноградов А. Г. Совершенствование конструкции и технологии изготовления пружинных клемм крепления рельсов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. Г. Виноградов. — Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2013. — 19 с.

3. Круглов В. М. Испытывается усовершенствованное скрепление / В. М. Круглов, Ю. Н. Аксенов, А. Ю. Богачев и др. // Путь и путевое хозяйство. — 2007. — № 11. — С. 12–13.

4. Круглов В. М. Модернизированное рельсовое скрепление APC / В. М. Круглов, Ю. Н. Аксенов, А. Ю. Бога-

чев и др. // Путь и путевое хозяйство. — 2011. — № 3. — С. 10–12.

5. Аксенов Ю. Н. Модернизация рельсового скрепления типа APC / Ю. Н. Аксенов, А. Ю. Богачев, Е. Г. Курзина // Транспорт Российской Федерации. — 2010. — № 3. — С. 72–73.

6. Антонов Н. И. О разработке и внедрении скреплений для суровых условий Сибири / Н. И. Антонов, Д. В. Величко // Путь и путевое хозяйство. — 2020. — № 2. — С. 17–20.

7. Альбом элементов и конструкций верхнего строения пути. — Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 19.12.2011. — М., 2012.

8. Карпущенко Н. И. Совершенствование рельсовых скреплений / Н. И. Карпущенко, Н. И. Антонов. — Новосибирск: СГУПС, 2003. — 300 с.

9. Деменчук Н. П. Основы теории напряженного и деформированного состояния: учеб. пособие / Н. П. Деменчук, А. А. Прилуцкий. — СПб.: Университет ИТМО, 2016. — 118 с.

10. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. — Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2544р (ред. от 19.10.2020).

Дата поступления: 25.07.2023

Решение о публикации: 30.08.2023

Контактная информация:

КАРЮКИН Максим Александрович — ведущий инженер РЦДМ, аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство»; m.caryuckin@yandex.ru

Multivariate Modeling of Design Parameters of Elastic Clips of Modern Rail Fasteners, with Analysis of Their Stress-Strain State

M. A. Karyukin

Siberian Transport University, 191, Dusi Kovalchuk str., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

For citation: Karyukin M. A. Multivariate Modeling of Design Parameters of Elastic Clips of Modern Rail Fasteners, with Analysis of Their Stress-Strain State // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 507–518. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-507-518

Abstract

Purpose: To determine the influence of geometric parameters on the most common elastic rod clip used in modern intermediate rail fastenings — the B-shaped clip (such as reinforced concrete rail (RCR) clip and anchor rail fastening (ARF)) — on changes in its stress-strain state. To propose a further direction of improving the design of elastic rod clips of rail fasteners to increase the reliability of the structure. **Methods:** The article presents the results of multivariate modeling of the geometric parameters of the clips (RCR — 20 pcs., ARF — 13 pcs.)

with the analysis of their stress-strain state, using the methods of software and computer systems SolidWorks and Ansys Workbench. **Results:** Analysis of the design of modern fasteners has shown that the intervals for varying the geometric parameters of the clips (rod diameter, vertical radius, horizontal radius) have small limits and significant limitations associated with the requirements for ensuring the strength, elasticity and operability of the entire fastening. The necessity of considering options with vertical radii less than 60 mm has been revealed, which entails the need for a radical change in the shape of the clips themselves. **Practical significance:** As a result of the analysis of the calculations of multivariant models, the degrees of influence of the intervals of variation of the geometric parameters of rod clips (rod diameter, vertical radius, horizontal radius) on the stress-strain state have been determined. It is established that in order to further increase the elasticity of the clips, it is necessary to develop a new type of rail fastening with a fundamentally different shape (different from the modern B-shaped) elastic clip that does not have modern design limitations in geometric parameters.

Keywords: Railway track, rail fastening, software and computing complex, SolidWorks, Ansys, geometric parameters, stresses.

References

1. Krysanov L. G., Doroshkevich A. A., Antipov A. S. et al. *Opredelenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i ustalostnoy prochnosti klemm ZhBR-3* [Determination of the stress-strain state and fatigue strength of ZhBR-3 terminals]. *Povyshenie nadezhnosti raboty verkhnego stroeniya puti v sovremennykh usloviyakh ekspluatatsii: sbornik nauchnykh trudov. Ser.: Trudy VNIIZhTa* [Improving the reliability of the work of the upper structure of the track in modern operating conditions: a collection of scientific papers. Series: Proceedings of VNIIZhT]. Moscow: Intekst Publ., 2000, pp. 93–99. (In Russian)
2. Vinogradov A. G. *Sovershenstvovanie konstruktсии i tekhnologii izgotovleniya pruzhinnykh klemm krepleniya rel'sov: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the design and technology of manufacturing spring terminals for fastening rails: author. diss. ... cand. tech. Sciences]. Magnitogorsk: Magnitogorskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. G. I. Nosova Publ., 2013, 19 p. (In Russian)
3. Kruglov V. M., Aksenov Yu. N., Bogachev A. Yu. *Ispytyvaetsya usovershenstvovannoe skreplenie* [An improved fastening is being tested]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Path and track facilities]. 2007, Iss. 11, pp. 12–13. (In Russian)
4. Kruglov V. M., Aksenov Yu. N., Bogachev A. Yu. et al. *Modernizirovannoe rel'sovoe skreplenie ARS* [Modernized rail fastening ARS]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Way and track facilities]. 2011, Iss. 3, pp. 10–12. (In Russian)
5. Aksenov Yu. N., Bogachev A. Yu., Kurzina E. G. *Modernizatsiya rel'sovogo skrepleniya tipa ARS* [Modernization of rail fastening type ARS]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2010, Iss. 3, pp. 72–73. (In Russian)
6. Antonov N. I., Velichko D. V. *O razrabotke i vnedrenii skrepleny dlya surovyykh usloviy Sibiri* [On the development and implementation of fasteners for the harsh conditions of Siberia]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Way and track facilities]. 2020, Iss. 2, pp. 17–20. (In Russian)
7. *Al'bom elementov i konstruktсий verkhnego stroeniya puti. Utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 19.12.2011* [Album of elements and structures of the track superstructure. Approved Order of Russian Railways OJSC dated December 19, 2011]. Moscow, 2012. (In Russian)
8. Karpushchenko N. I., Antonov N. I. *Sovershenstvovanie rel'sovykh skrepleny* [Improvement of rail fastenings]. Novosibirsk: SGUPS Publ., 2003, 300 p. (In Russian)
9. Demenchuk N. P., Prilutskiy A. A. *Osnovy teorii napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniya: ucheb. posobie* [Fundamentals of the theory of stress and strain: a tutorial]. St. Petersburg: Universitet ITMO Publ., 2016, 118 p. (In Russian)
10. *Instruktsiya po ustroystvu, ukladke, soderzhaniyu i remontu besstykovogo puti. Utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 14.12.2016 № 2544r (red. ot 19.10.2020)* [Instructions for the device, laying, maintenance and repair of a seamless track. Approved Order of Russian Railways JSC dated December 14, 2016 № 2544r (revision dated on October 19, 2020)]. (In Russian)

Received: July 25, 2023

Accepted: August 30, 2023

Author's information:

Maxim A. KARYUKIN — Lead Engineer of the RCDM (Center for Diagnostics and Monitoring), Postgraduate Student, Department "Track and Track Management"; m.caryuckin@yandex.ru

УДК 629.463:629.4.018

Исследование усталостной долговечности пружин боковых скользунов тележки модели 18–9891

Д. В. Даниленко¹, В. П. Ефимов², В. А. Чернов³

¹ООО «УК РМ РЕЙЛ», Российская Федерация, 430006, Республика Мордовия, Саранск, ул. Лодыгина, 11

²ООО «УИЦ — Вагоны», Российская Федерация, 622007, Нижний Тагил, ул. Орджоникидзе, 22, оф. 28

³Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Даниленко Д. В., Ефимов В. П., Чернов В. А. Исследование усталостной долговечности пружин боковых скользунов тележки модели 18-9891 // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 519–530. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-519-530

Аннотация

Цель: Проведение комплексных экспериментальных исследований усталостной прочности пружин боковых скользунов грузовой тележки с оценкой эффективности применения термической и дробеструйной обработки в процессе их изготовления. **Методы:** Применен метод стендовых ресурсных (на усталость) испытаний пружин боковых скользунов постоянного контакта, который позволил получить характеристики выносливости натуральных деталей. Для исследования влияния упрочняющих операций в процессе изготовления пружин на их усталостную прочность проведены металлографические исследования пружинной стали с оценкой механических характеристик поверхностных слоев различных зон винтового пространственного бруса. **Результаты:** Получены экспериментальные силовые характеристики пружинных комплектов боковых скользунов инновационной грузовой тележки с нагрузкой на ось 25 тс (245 кН). Кривые усталости пружин, представленные в вероятностном аспекте, позволили определить коэффициенты запаса прочности пружин по усталости с учетом эксплуатационной нагруженности, а также обосновать соответствие пружинных комплектов нормативным требованиям. **Практическая значимость:** По результатам исследований рассмотренный конструктивно-технологический вариант бокового скользуна постоянного контакта грузовой тележки запущен в серийное производство. Результаты испытаний позволяют обоснованно назначить гарантийный межремонтный пробег ответственного узла тележки и проводить работы по дальнейшей модернизации конструкции с целью повышения эксплуатационного ресурса.

Ключевые слова: Усталостная прочность, пружины, боковой скользя тележки грузового вагона, металлографические исследования металла пружин.

В тележке модели 18-9891, тип 3, ГОСТ 9246—2013 [1] с максимальной статической нагрузкой от колесной пары на рельсы 25 тс (245кН) и конструкционной скоростью 120 км/ч (разработчик КД — ФГБОУ ВО ПГУПС, г. Санкт-Петербург) для эффективного гашения колебаний виляния и боковой качки применяются боковые скользуны

постоянного контакта. Боковой скользя тележки модели 18-9891, согласно ГОСТ 34387—2018 [2], относится к съемному скользяму постоянного контакта типа ПКСПП с упругим элементом в виде двухрядной винтовой пружины. В качестве упругих элементов используется комплект из цилиндрических винтовых пружин сжатия из

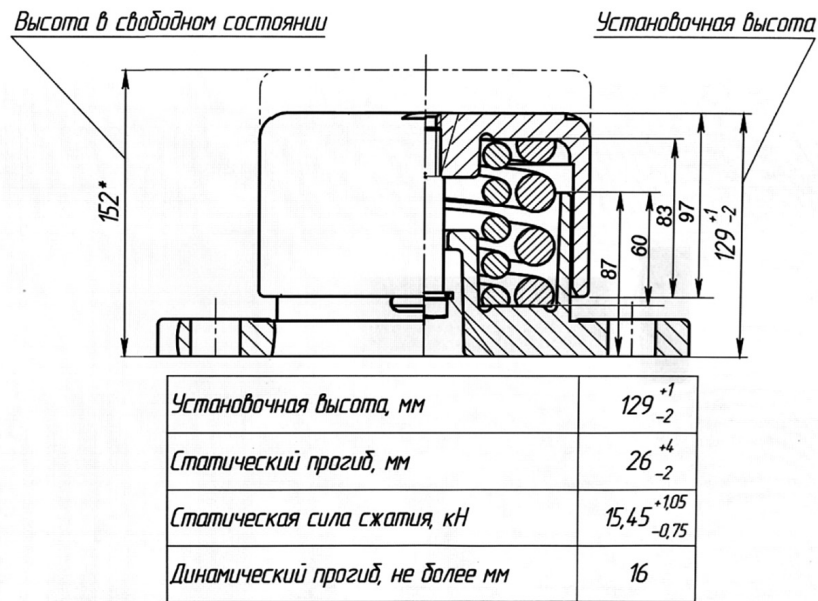


Рис. 1. Схема и основные характеристики бокового скользуна постоянного контакта тележки модели 18-9891

ТАБЛИЦА 1. Основные параметры пружин бокового скользуна тележки модели 18-9891 (категория пружин Б по ГОСТ 1452—2011)

Параметр пружины	d , мм	D , мм	l_0 , мм	n	n_1	Масса пружины, кг	i
Пружина внутренняя черт. № 9891.04.00.004	14	75	111 ⁺⁴ ₋₂	3,85	5,35 ± 0,13	1,4	5,357
Пружина наружная черт. № 9891.04.00.003	20	115	111 ⁺⁴ ₋₂	2,4	3,9 ± 0,13	3,0	5,75

Примечание: d — диаметр прутка пружины, мм; D — средний диаметр пружины, мм; l_0 — высота пружины в свободном состоянии мм; n — число рабочих витков пружины; n_1 — полное число витков пружины; $i = D/d$ — индекс пружины.

стали круглого сечения. Изготовитель пружин — ООО «Уральский пружинный завод», г. Белорецк, Республика Башкортостан. Пружины категории Б, согласно ГОСТ 1452—2011 [3], — пружины, воспринимающие в условиях эксплуатации продольные (вдоль оси пружины) нагрузки и перемещения. Пружины изготовлены из стали 60С2ХФА с дробеструйной обработкой.

Долговечность бокового скользуна должна быть указана в эксплуатационных документах, должен обеспечиваться ресурс не менее наработки тележки от начала эксплуатации до ее первого планового ремонта. Для тележки модели 18-9891 с нагрузкой

на ось 25 тс (245 кН) гарантийный межремонтный пробег, согласно ТУ ВБСТ.667112.002 [4], установлен 500 тыс. км (6 лет).

Несущие составные части скользуна (пружины) должны обладать статической прочностью в соответствии с требованиями п. 4.5.1, 6.1.3 ГОСТ 33211—2014 [5]. При постановке пружин на производство, в рамках проведения предварительных испытаний, пружины подвергнуты испытаниям на циклическую долговечность на базе $N_0 = 6 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Схема и основные характеристики бокового скользуна постоянного контакта тележки и его силовые характеристики

приведены на рис. 1, основные параметры пружин бокового скользуна тележки приведены в табл. 1.

Перед проведением ресурсных (на усталость) испытаний пружин бокового скользуна проведены их статические испытания. Статические испытания пружин скользуна проведены методом трехкратного нагружения максимальной (пробной) нагрузкой, установленной КД. Напряжения τ_1 на внутренней поверхности витка пружины (МПа) определяются, учитывая действительные размеры диаметра прутка и среднего диаметра пружины (табл. 1) по формуле:

$$\tau_1 = \frac{8 \cdot 10^3 K F_1 D}{\pi d^3}, \quad (1)$$

где F_1 — расчетная статическая нагрузка на пружину (кН);

D — средний диаметр пружины (мм);

d — диаметр прутка пружины (мм);

K — коэффициент, учитывающий кривизну витка пружины, определяется по формуле:

$$K = \frac{4i - 1}{4i - 4} + \frac{0,615}{i}, \quad (2)$$

$i = D/d$ — индекс пружины. Для наружной пружины $K = 1,265$; для внутренней пружины $K = 1,287$.

Для наружной пружины (черт. № 9891.04.00.003) расчетное значение касательного напряжения составило величину $\tau_1 = 465,164$ МПа, при расчетной статической нагрузке на пружину $F_1 = 10,04$ кН. При этом деформация пружины составила величину $S_1 = 23$ мм. Амплитуда напряжения цикла $\tau_{ан} = 217,156$ МПа определена на основании диаграммы предельных амплитуд напряжений цикла на базе испытаний $6 \cdot 10^6$ циклов (ГОСТ 32208—2013 [6]) — пружина из стали 60С2ХФА, упрочненная дробью. Для внутренней пружины (черт. № 9891.04.00.004): $\tau_1 = 485,726$ МПа, при $F_1 = 5,42$ кН, $S_1 = 23$ мм, $\tau_{ан} = 212,04$ МПа.

Предельная амплитуда напряжений цикла при испытаниях на базе $6 \cdot 10^6$ циклов нагружения для наружной пружины составила величину $\tau_{а\ пред} = 189,718$ МПа (определена по формуле 10 ГОСТ 32208—2013 и диаграммы, приведенной в приложении Д), для внутренней пружины $\tau_{а\ пред} = 193,878$ МПа. Амплитуда напряжений цикла $\tau_{ан}$ (МПа) при проведении испытаний пружин на циклическую долговечность задается по амплитуде деформации цикла S_a (мм), которая определяется по формуле:

$$S_a = S_1 \frac{\tau_{ан}}{\tau_1}, \quad (3)$$

где S_1 — продольная деформация (прогиб) пружины под расчетной статической нагрузкой F_1 (мм).

На рис. 2 показан общий вид испытаний, на рис. 3 приведены силовые характеристики пружин. Проведены также статические испытания пружинных комплектов скользуна. В табл. 2 приведены результаты статических испытаний пружинных комплектов, на рис. 4 приведены силовые характеристики пружинных комплектов бокового скользуна постоянного контакта тележки модели 18-9891.

По результатам статических испытаний наружной и внутренней пружин бокового скользуна и статических испытаний пружинных комплектов скользуна установлено, что разработанный опытный вариант скользуна постоянного контакта тележки модели 18-9891 соответствует требуемым силовым параметрам при установочной высоте 129_{-2}^{+1} мм. Среднее значение жесткости пружинного комплекта бокового скользуна составило величину $Z_{ср} = 0,609$ кН/мм, что соответствует статической силе сжатия $F = 15,834$ кН при статическом прогибе 26 мм.

Испытания пружин на циклическую долговечность проведены на специальном стенде для



Рис. 2. Общий вид статических испытаний пружин на универсальной испытательной машине ЦДМ Пу 10

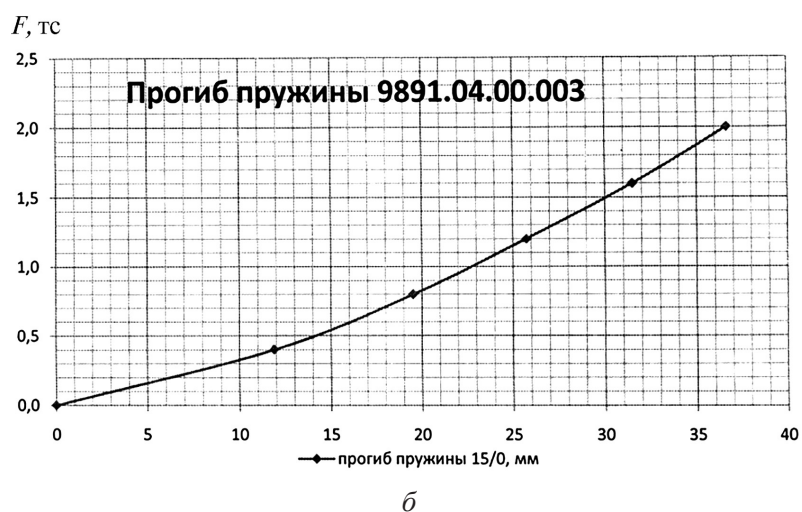
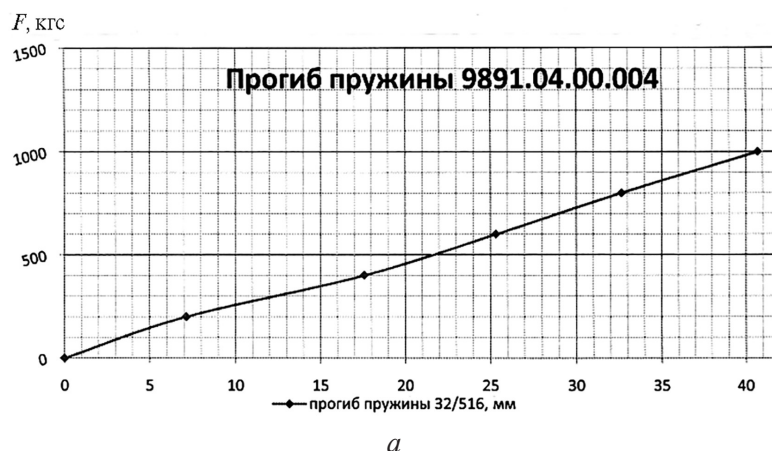


Рис. 3. Статическая тарировка внутренней (а) и наружной (б) пружин бокового скользяна

ТАБЛИЦА 2. Результаты статических испытаний пружинных комплектов бокового скользяна

Комплектация пружинного комплекта (зав. № пружины)	Прогиб пружинного комплекта S , мм	Вертикальная сила на пружинный комплект F , кН	Жесткость пружинного комплекта Z , кН/мм
36/15 и 16/0	23	13,92	0,650
– « –	24	14,70	0,612
– « –	25	15,68	0,627
– « –	26	16,66	0,640
34/545; 15/0	23	13,43	0,583
– « –	24	14,21	0,592
– « –	25	15,19	0,607
– « –	26	15,88	0,610

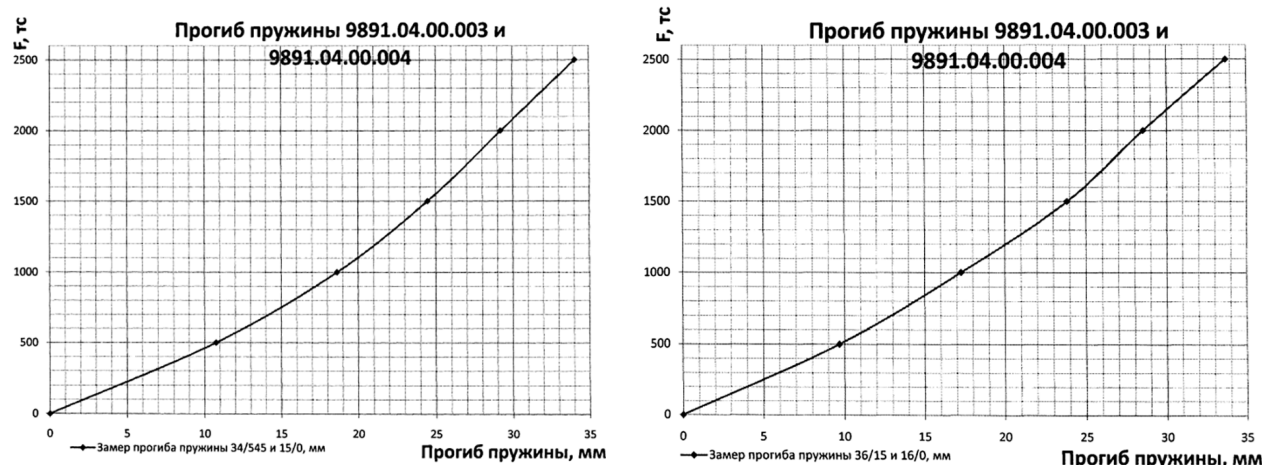


Рис. 4. Силовые характеристики пружинных комплектов бокового скользяна

усталостных испытаний пружин резонансного типа (рис. 5, 6).

Принцип действия стенда заключается в том, что упругим звеном колебательной системы являются расположенные друг под другом упругие элементы (цилиндрические винтовые пружины), между которыми крепится одно из плеч нагружающего рычага, шарнирно опирающегося на станину. На другом конце рычага установлен центробежный вибратор. Благодаря такому расположению пружин достигается достаточно высокая собственная частота колебаний стенда. Под действием центробежной силы груза вибратора, при его вращении, нагружающий рычаг колеблется относительно опоры с частотой, соответствующей скорости вращения вибратора. При этом пружины попеременно сжимаются и растягиваются относительно своего первоначального положения. Изменение амплитуды перемещения пружин достигается изменением скорости вращения вибратора. Среднее статическое поджатие пружин, от которого зависит частота колебаний, задается узлами статического нагружения стенда. При вводе стенда в резонансный режим энергетические затраты и время проведения испытаний для достижения необходимой базы значительно снижаются. Контроль режимов нагружения испытываемых пружин производится с помощью кон-

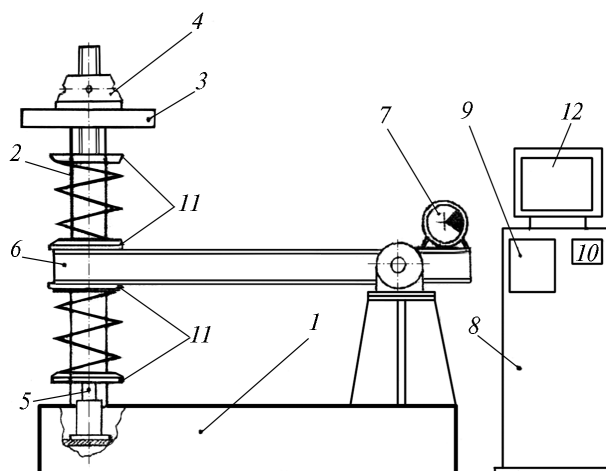


Рис. 5. Схема стенда резонансного типа для усталостных испытаний пружин:
 1 — основание стенда; 2 — вертикальные колонны; 3 — верхняя траверса;
 4 — верхний регулировочный винтовой механизм; 5 — нижний винтовой механизм;
 6 — нагружающий рычаг;
 7 — вибровозбудитель центробежного типа; 8 — шкаф электрооборудования;
 9 — преобразователь частоты;
 10 — электронный счетчик циклов;
 11 — опорные тарелки испытываемых пружин; 12 — контрольно-измерительный комплекс

трольно-измерительного комплекса стенда. Этот комплекс позволяет постоянно следить за уровнем динамического нагружения испытываемых



Рис. 6. Общий вид стенда для усталостных испытаний пружин

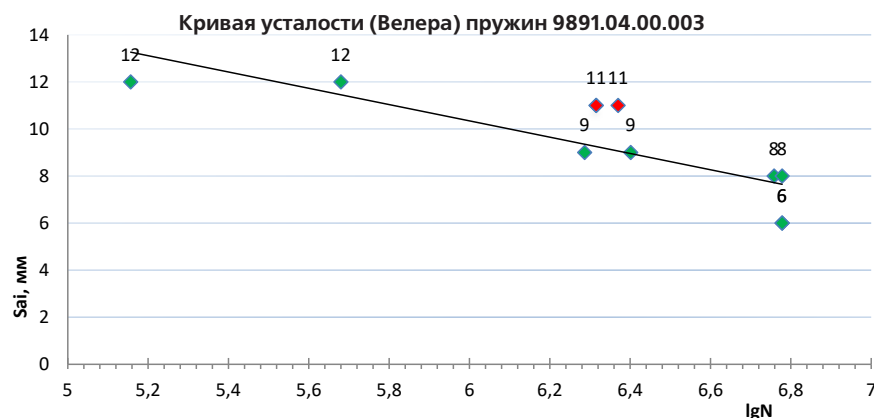


Рис. 7. Кривая усталости наружных пружин бокового скользуна

пружин и поддерживать заданный уровень нагружения. Стенд снабжен электронным счетчиком циклов нагружения объектов испытания с пределами измерений до 10^7 циклов.

Все пружины испытывались при постоянной средней деформации цикла (S_m), нагруженность изменялась путем назначения амплитудных значений деформации цикла (S_a). Кривые усталости построены методом Велера с учетом требований ГОСТ 33788—2016 [7] и соответствуют зависимости:

$$\tau_{a \text{ пред}}^m \cdot N = \text{const}, \quad (4)$$

где m — показатель степени наклонной кривой усталости. База испытаний $N = 6 \cdot 10^6$ циклов. Результаты усталостных испытаний пружин обработаны методом линейно-регрессионного анализа. Кривые усталости построены в координатах (S_a — $\lg N$) при вероятности неразрушения $P = 0,5$ (рис. 7, 9).

Общий вид пружин, разрушенных в стендовых условиях при проведении усталостных испытаний, приведен на рис. 8.

По результатам испытаний и расчетов для внутренней пружины скользуна амплитудное значение

предела выносливости по деформациям составило величину $S_a = 10$ мм, по касательным напряжениям амплитудное значение предела выносливости составило величину $\tau_{a\text{пред}} = 211,29$ МПа (рис. 9), для наружной пружины $S_a = 7,6$ мм, $\tau_{a\text{пред}} = 150,99$ МПа (рис. 7) соответственно.

Применение дробеструйного наклепа поверхностного слоя пружин является эффективным методом повышения их усталостной прочности и долговечности. Эффективность наклепа складывается из нескольких факторов, из которых основными являются повышение механических свойств поверхностного слоя, создание в нем остаточных сжимающих напряжений и переход очага зарождения усталостной трещины с поверхности в подслоиную область. При этом следует учитывать, что применяемое оборудование для обработки пружин дробью не обеспечивает равномерного упрочнения всей поверхности детали, которая представляет собой винтовой пространственный брус. Наибольший упрочняющий эффект появляется на волокнах пружины, которые имеют оптимальный угол встречи (75–90°) с потоком дроби, в других зонах эффективность наклепа снижается. На рис. 10, а показан вид поверхности пружины в зоне перехода внутреннего волокна к средней зоне витка (эффективность наклепа низкая). На рис. 10, б показан вид

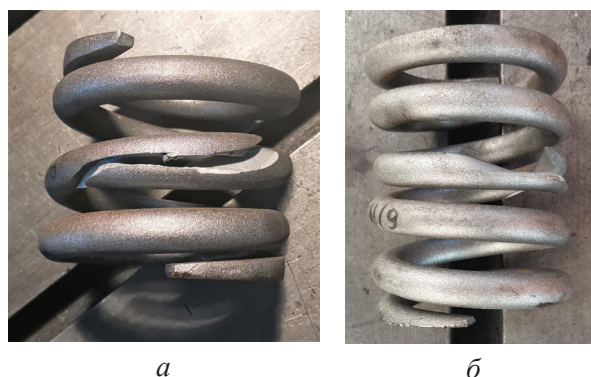


Рис. 8. Характер и зоны усталостных разрушений наружных пружин (а) и внутренних пружин (б) бокового скользуна в стендовых условиях

наружной поверхности витков пружины (эффективность наклепа высокая, сопровождается появлением волокнистой структуры).

Исследования микроструктуры разрушенных в стендовых условиях пружин показали, что низкие показатели усталостной прочности имеют пружины, структура металла которых представляет собой крупноигльчатый мартенсит. Значительно снижает усталостную прочность пружин включение троостита и феррита. Пружины, имеющие самые низкие показатели циклической прочности, имели неудовлетворительное качество поверхностных слоев, которые содержали участки феррита (рис. 11, а) или сплошную

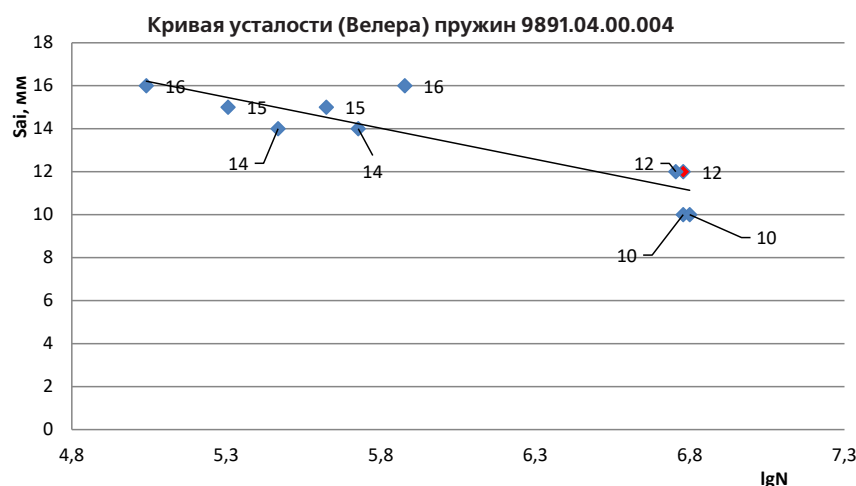


Рис. 9. Кривая усталости внутренних пружин бокового скользуна

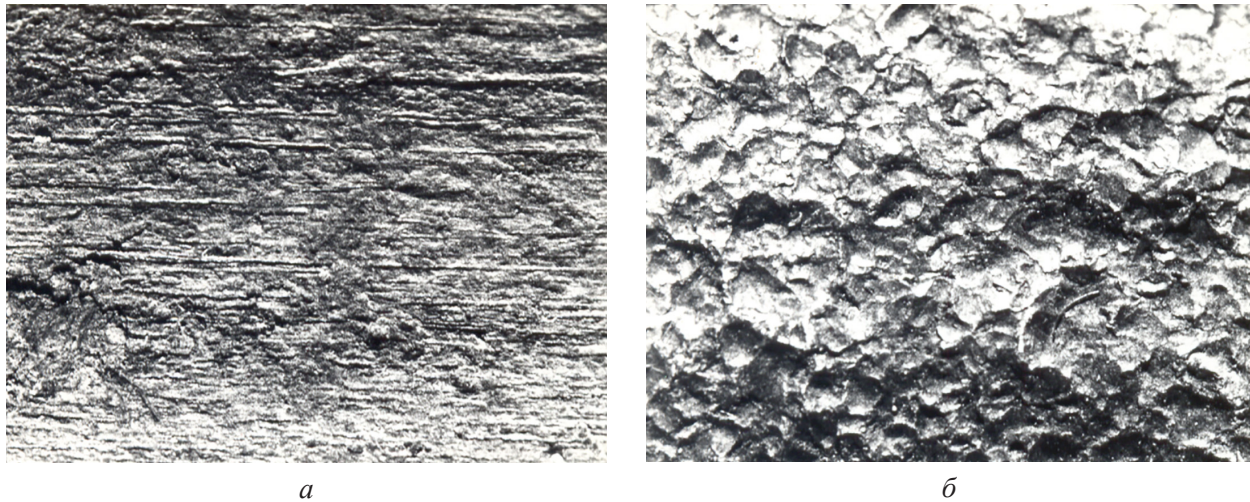


Рис. 10. Вид поверхности пружины с неэффективным наклепом (а) и вид поверхности пружины (б), наклепанной дробью с высоким эффектом, — волокнистая структура

ферритную зону значительной глубины (0,38–0,42 мм, рис. 11, б).

Наибольшую циклическую долговечность показывают пружины, металл которых имеет структуру мелко- и среднегольчатого отпущенного мартенсита (рис. 12) при твердости 42–45 HRC и глубине обезуглероженного поверхностного слоя не более 0,1–0,12 мм.

Коэффициент запаса прочности пружин скользуна по усталости определяется с учетом эксплуатационной нагруженности пружин по формуле:

$$n = \frac{\tau_1 + \tau_a^{\text{пред}}}{\tau_1 + \tau_a} \geq 1,0, \quad (5)$$

где τ_1 — касательное напряжение кручения на внутренней поверхности витка наружной пружины, возникающее при приложении силы F_1 ($\tau_1 = 456,16$ МПа);

$\tau_a^{\text{пред}}$ — предельная амплитуда напряжений цикла при испытаниях на базе $N_0 = 6 \cdot 10^6$ циклов нагружения, ($\tau_a^{\text{пред}} = 150,99$ МПа);

τ_a — амплитуда напряжений (модальное значение) от динамической нагрузки в эксплуатации, МПа, определяется из соотношения:

$$\tau_a = k_d \tau_1, \quad (6)$$

где k_d — коэффициент вертикальной динамики, при отсутствии экспериментальных данных принимается расчетное значение $k_d = 0,25$.

Полученное значение амплитуды напряжений (модальное значение) от динамической нагрузки в эксплуатации составило величину $\tau_a = 114,04$ МПа. Коэффициент запаса прочности наружных пружин скользуна по усталости, определенный по формуле (5), с учетом эксплуатационной нагруженности пружин составил величину: $n = 1,065 > [n] = 1,0$, для внутренних пружин $n = 1,148 > [n] = 1,0$. Следовательно, испытанные пружины бокового скользуна по показателям циклической долговечности соответствуют требованиям ГОСТ 1452—2011 и ГОСТ 32208—2013.

Ниже приведен расчет коэффициента запаса прочности по усталости для пружин бокового скользуна в соответствии с требованиями [8] и СТ ССФЖТ ЦТ-ЦВ-ЦЛ 084—2000 [9]. Расчет сопротивления усталости производится по коэффициенту запаса по формуле:

$$n = \tau_{a,N} / \tau_{a,\sigma} \geq [n], \quad (7)$$

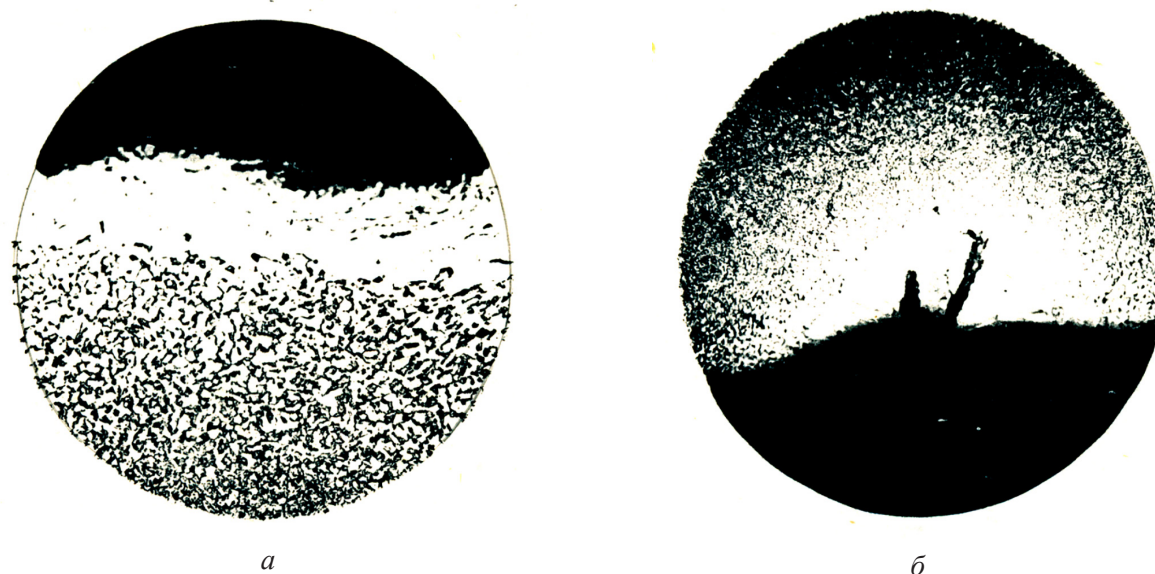


Рис. 11. Микроструктура поверхностного слоя пружин, содержащая участки феррита (а) или сплошную ферритную зону (б) с выявленным в ней очагом зарождения усталостной трещины

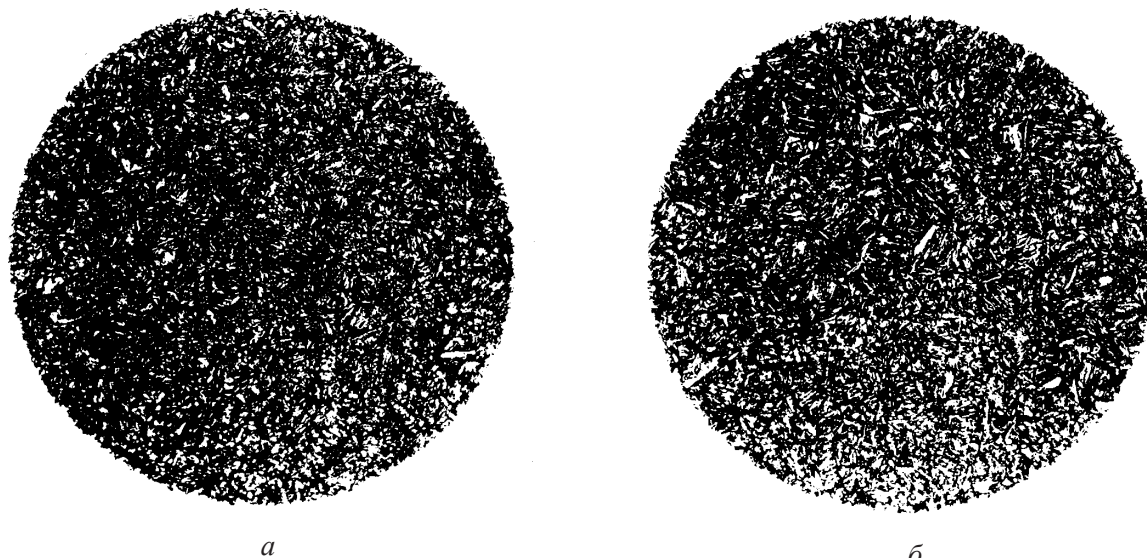


Рис. 12. Структура металла пружин, долговечность которых на высоком уровне, представляющая собой мелкоигольчатый мартенсит (а); среднеигольчатый мартенсит (б)

где $\tau_{a,N}$ — предел выносливости (по амплитуде) натурной детали при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения на базе испытаний $N_0 = 6 \cdot 10^6$ циклов (принимая для наружной пружины $\tau_{a,N} = 150,99$ МПа); $\tau_{a,\varepsilon}$ — расчетная величина амплитуды динамического напряжения условного симметричного цикла, приведенная к базе N_0 , эквивалент-

ная по повреждающему действию реальному режиму эксплуатационных случайных напряжений за проектный срок службы детали, определяется по формуле:

$$\tau_{a,\varepsilon} = \tau_{ст} Y k_{двэ}, \tag{8}$$

где $\tau_{ст} = \tau_1 = 456,16$ МПа;

$Y = 0,9$ — коэффициент использования грузоподъемности вагона;

$k_{\text{двз}} = 0,25$ — расчетный эквивалентный коэффициент вертикальной динамики;

$[n]$ — допускаемый коэффициент запаса сопротивления усталости. С учетом рекомендаций (табл. 3.6 [8]) при использовании статистически надежных экспериментальных данных по пределу выносливости $\tau_{a,N}$ (при $P = 0,5$) и приближенных данных по $\tau_{a,3}$, определяемых расчетным путем по установленным нормативам динамических сил, принимаем $[n] = 1,4$.

Таким образом, коэффициент запаса прочности наружных пружин бокового скользуна по формуле (7) с учетом эксплуатационной нагруженности пружин составил величину: $n = 1,472 \geq [n] = 1,4$, для внутренних пружин $n = 1,934 \geq [n] = 1,4$. Следовательно, испытанные наружные и внутренние пружины бокового скользуна постоянного контакта тележки модели 18-9891, из стали 60С2ХФА, упрочненные наклепом дробью, по показателю циклической долговечности соответствуют требованиям ГОСТ 1452—2011; «Норм для расчета...»; ГОСТ 32208—2013.

Заключение

1. По результатам статических испытаний наружной и внутренней пружин бокового скользуна и статических испытаний пружинных комплектов скользуна установлено, что разработанный опытный вариант скользуна постоянного контакта тележки модели 18-9891 соответствует требуемым силовым параметрам при установочной высоте 129_{-2}^{+1} мм. Среднее значение жесткости пружинного комплекта бокового скользуна составило величину $Z_{\text{cp}} = 0,609$ кН/мм, что соответствует статической силе сжатия $F = 15,834$ кН при статическом прогибе 26 мм.

2. По результатам усталостных испытаний опытных партий наружных и внутренних пружин бокового скользуна тележки модели 18-9891 с нагрузкой на ось 25 тс (245 кН), изготовленных на ООО «Уральский пружинный завод», получены параметры кривых усталости пружин:

– для наружной пружины амплитудное значение предела выносливости составило величину ($\tau_a^{\text{пред}} = 138,67$ МПа) на базе $N_0 = 6 \cdot 10^6$ циклов, коэффициент запаса прочности пружин по усталости составил величину $n = 1,043 > [n] = 1,0$. Согласно требованиям «Норм...» $n = 1,472 \geq [n] = 1,4$;

– для внутренней пружины амплитудное значение предела выносливости составило величину ($\tau_a^{\text{пред}} = 211,29$ МПа) на базе $N_0 = 6 \cdot 10^6$ циклов, коэффициент запаса прочности пружин по усталости составил величину $n = 1,148 > [n] = 1,0$. Согласно требованиям «Норм...» $n = 1,934 \geq [n] = 1,4$.

3. Полученный результат свидетельствует о том, что пружины бокового скользуна тележки модели 18-9891, из стали 60С2ХФА, упрочненные наклепом дробью, соответствуют нормативным требованиям.

Библиографический список

1. ГОСТ 9246—2013. Тележки двухосные грузовых вагонов магистрали железных дорог колеи 1520 мм. Технические условия.
2. ГОСТ 34387—2018. Скользуны тележек грузовых вагонов. Общие технические условия.
3. ГОСТ 1452—2011. Пружины цилиндрические винтовые тележек и ударно-тяговых приборов подвижного состава железных дорог. Технические условия.
4. ТУ ВБСТ. 667112.002. Тележка двухосная 18-9891, тип 3 ГОСТ 9246—2013. Технические условия.
5. ГОСТ 33211—2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам.
6. ГОСТ 32208—2013. Пружины рессорного подвешивания железнодорожного подвижного состава. Метод испытаний на циклическую долговечность.
7. ГОСТ 33788—2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества.

8. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). — М.: ГосНИИВ — ВНИИЖТ, 1996. — 317 с. (с изменениями и дополнениями).

9. СТ ССФЖТ ЦТ-ЦВ-ЦЛ 084—2000. Стандарт системы сертификации на Федеральном железнодорожном транспорте. Подвижной состав железных дорог. Пружины цилиндрические винтовые тележек. Типовая методика испытаний. Утвержден и введен в действие указанием МПС России от 18.06.2001 № М-1107у.

Дата поступления: 10.07.2023

Решение о публикации: 15.08.2023

Контактная информация:

ДАНИЛЕНКО Денис Викторович — руководитель департамента

ЕФИМОВ Виктор Петрович — канд. техн. наук, доц., генеральный директор; uiz123456@mail.ru

ЧЕРНОВ Владимир Александрович — доц. кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»

Research on Fatigue Durability of Side Bearing Springs for Model 18–9891 Bogie

D. V. Danilenko¹, V. P. Efimov², V. A. Chernov³

¹LLC “RM RAIL Management Company”, 11, Lodygina str., Saransk, Republic of Mordovia, 430006, Russian Federation

²LLC “UIC — Wagons”, 22, Ordzhonikidze str., Sverdlovsk region, Nizhny Tagil, 622007, Russian Federation

³Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Danilenko D. V., Efimov V. P., Chernov V. A. Research on Fatigue Durability of Side Bearing Springs for Model 18-9891 Bogie // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 519–530. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-519-530

Summary

Purpose: To conduct comprehensive experimental studies on the fatigue strength of side bearing springs for freight bogies, evaluating the effectiveness of thermal and shot peening treatments during their manufacturing process. **Methods:** The method of stand endurance (fatigue) testing of constant contact side bearing springs has been applied, allowing for obtaining endurance characteristics of actual components. Metallographic studies of spring steel have been conducted to investigate the influence of strengthening operations during spring manufacturing on their fatigue strength, with the assessment of mechanical characteristics of surface layers in various zones of the helical spatial beam. **Results:** Experimental force characteristics of spring sets for side bearings of an innovative freight bogie with a load of 25 tons (245 kN) on the axle have been obtained. Fatigue curves of the springs have been presented in a probabilistic aspect, enabling the determination of load factor for fatigue strength of the springs considering operational loading, as well as justifying the compliance of the spring sets with the regulatory requirements. **Practical significance:** Based on the research results, the considered constructive-technological variant of the constant contact side bearing spring for the freight bogie has been put into serial production. The test results allow us to reasonably determine the warranty mileage of the responsible assembly of the bogie and to conduct further work on the design modernization with the aim of increasing operational life.

Keywords: Fatigue strength, springs, side bearing of a freight bogie, metallographic studies of spring metal.

References

1. *GOST 9246—2013. Telezhki dvukhosnye gruzovykh vagonov magistrali zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 9246—2013. Two-axle bogies of freight cars of the main line of railways of 1520 mm gauge. Technical conditions]. (In Russian)

2. *GOST 34387—2018. Skol'zuny telezhek gruzovykh vagonov. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [GOST 34387—2018. Sliding trolleys of freight cars. General technical conditions]. (In Russian)

3. *GOST 1452—2011. Pruzhiny tsilindricheskie vintovye telezhek i udarno-tyagovykh priborov podvizhnogo sostava zheleznykh dorog. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 1452—2011. Cylindrical screw springs of bogies and shock-traction devices of railway rolling stock. Technical conditions]. (In Russian)

4. *TU VBST. 667112.002. Telezhka dvukhosnaya 18-9891, tip 3 GOST 9246—2013. Tekhnicheskie usloviya* [TU VBST. 667112.002. Biaxial trolley 18-9891, type 3 GOST 9246—2013. Technical conditions]. (In Russian)

5. *GOST 33211—2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [GOST 33211—2014. Freight cars. Requirements for strength and dynamic qualities]. (In Russian)

6. *GOST 32208—2013. Pruzhiny resornogo podveshivaniya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Metod ispytaniy na tsiklicheskiy dolgovechnost'* [GOST 32208—2013. Springs of spring suspension of railway rolling stock. Test method for cyclic durability]. (In Russian)

7. *GOST 33788—2016. Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i dinamicheskie kachestva*

[GOST 33788—2016. Freight and passenger cars. Methods of testing for strength and dynamic qualities]. (In Russian)

8. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Norms for the calculation and design of railcars of the MPC gauge of 1520 mm (non-self-propelled)]. Moscow: GosNIIV — VNIIZhT, 1996, 317 p. (In Russian)

9. *ST SSFZhT TsT-TsV-TsL 084—2000. Standart sistemy sertifikatsii na Federal'nom zheleznodorozhnom transporte. Podvizhnoy sostav zheleznykh dorog. Pruzhiny tsilindricheskie vintovye telezhek. Tipovaya metodika ispytaniy. Uтвержден и введен в действие указанием MPS России от 18.06.2001 № М-1107u* [ST SSFZHT CT-CV-CL 084—2000. The standard of the certification system for Federal Railway transport. Rolling stock of railways. Cylindrical screw springs of trolleys. Standard test procedure. Approved and put into effect by the instruction of the Ministry of Internal Affairs of Russia dated 18.06.2001. № M-1107u]. (In Russian)

Received: July 10, 2023

Accepted: August 15, 2023

Author's information:

Denis V. DANILENKO — Head of the Department
Viktor P. EFIMOV — PhD in Engineering, Associate Professor, General Director; uiz123456@mail.ru
Vladimir A. CHERNOV — Associate Professor, Department of Carriages and Carriage Facilities

УДК 625.12.033.38

Анализ влияния динамической нагрузки колеса на рельсы условиях скоростного движения поездов в Узбекистане

С. Т. Джаббаров, Н. Б. Кодиров

Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, 100167, г. Ташкент, ул. Темир-йулчилар, 1

Для цитирования: Джаббаров С. Т., Кодиров Н. Б. Анализ влияния динамической нагрузки колеса на рельсы в условиях скоростного движения поездов в Узбекистане // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 531–543. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-531-543

Аннотация

Цель: Обоснование выбора факторов, определяющих формирование динамической нагрузки на железнодорожный путь со стороны современного подвижного состава при скоростном и высокоскоростном движении. Для достижения этой цели были проведены теоретические предпосылки и экспериментальные исследования. В результате работы разработана методика определения вертикальной расчетной силы, которая действует от колеса на рельс. **Методика:** Скоростные и высокоскоростные поезда, в силу своей принципиальной конструкции и значительного увеличения скорости движения, требуют пересмотра методов расчета воздействия подвижного состава на железнодорожный путь. Это включает анализ соотношений среднеквадратических отклонений различных динамических сил и оценку влияния различных факторов при разных скоростях движения. **Результаты:** В рамках работы были проведены экспериментальные измерения для изучения изменений динамической нагрузки. В результате были получены зависимости между средней и расчетной вертикальными силами и скоростью движения для современных пассажирских поездов. С использованием факторного дисперсионного анализа были получены численные характеристики влияния различных факторов на значение вертикальной силы, действующей от колеса на рельс. Также были определены степени влияния различных факторов на формирование этой силы.

Ключевые слова: Расчет пути на прочность, верхнее строение пути, скоростное движение, напряжение в пути, динамическая сила, динамическое неравенство.

Введение

Выполняя расчеты прочности пути, решаются разнообразные задачи, такие как определение напряжений и деформаций, возникающих в элементах верхнего строения железнодорожного пути из-за воздействия движущегося поездного состава, обоснование конструкции и оценка мощности пути по установленным условиям эксплуатации, расчет допустимых скоростей движения по условиям прочности пути, установка температурного

режима эксплуатации бесстыкового пути и т. п. Их методика имеет долгую историю, которую можно отследить начиная с XIX века. В развитие этого направления свой вклад внесли многие известные отечественные и зарубежные ученые. Современным действующим документом является отраслевая инструкция — «Правила расчетов железнодорожного пути на прочность и стойкость» [1].

Один из основных вопросов, решаемый практическими расчетами колеи на прочность, — это

определение максимально возможных напряжений в элементах железнодорожного пути, что является показателем его прочности. Поэтому понятно, что основное внимание уделялось «тяжелым» грузовым единицам подвижного состава, преимущественно локомотивам для грузовых поездов. Но их скорость движения, как правило, не превышает 80–90 км/ч. Даже с учетом пассажирского движения использование методики расчета согласно [2] ограничено скоростью 160 км/ч.

Современное развитие транспортных сетей подразумевает внедрение скоростного и высокоскоростного движения пассажирских поездов на железных дорогах Узбекистана [3]. В связи с принципиальными конструктивными изменениями в таких поездах и значительным увеличением скорости движения возникает необходимость пересмотра методик расчета воздействия этих поездов на железнодорожный путь [4, 5].

При проектировании высокоскоростного подвижного состава используются две концепции тягового привода: локомотивная (сосредоточенная тяга) и моторвагонная (распределенная тяга).

В концепции локомотивной тяги тяговые двигатели устанавливаются на электровозах, которые, как правило, размещаются по одному в главной и хвостовой частях высокоскоростного поезда. Однако существуют исключения, например, в некоторых высокоскоростных поездах, таких как Х2000 (Швеция) и ICE2 (Германия), используется только один электровоз, или поезд АРТ-Р (Великобритания), в котором два электровоза размещаются в середине состава.

В концепции моторвагонной тяги тяговые устройства равномерно распределяются вдоль поезда. Это позволяет достичь более равномерного распределения мощности и более гибкой конфигурации состава.

Обе концепции имеют свои преимущества и применяются в зависимости от требований и особенностей высокоскоростных поездов.

На высокоскоростных железнодорожных линиях применяются различные конструкции опирания кузовов на тележки у подвижного состава. Существуют две основные концепции: сочлененная и независимая.

В концепции сочлененной тележки два смежных вагона опираются на одну тележку. Эта концепция используется, например, в поездах семейства TGV, производимых международным концерном Alstom.

В концепции независимой тележки каждый вагон поддерживается двумя индивидуальными тележками. Промежуточные одноосные тележки используются, например, в поездах Talgo-250, где применяется концепция сочлененных вагонов. Конструкторы продолжают соперничество и соблюдают одну из этих двух концепций в разработке высокоскоростных поездов в зависимости от их требований и специфики.

При равных условиях считается, что уменьшение жесткости рессорного подвешивания благоприятно влияет на плавность движения железнодорожных экипажей. Современные тенденции по улучшению плавности хода в основном связаны со снижением жесткости рессорного подвешивания и соответствующим увеличением статического прогиба.

Применение гидравлических приборов с компьютерным управлением представляет собой новый подход, который не подразумевает полное соответствие существующим расчетным методикам для пружинно-механических систем. Эти новые технологии и методы выходят за рамки классических расчетных подходов, предусмотренных для пружинно-механических систем.

Таким образом, современные тенденции в области повышения плавности движения железнодорожных экипажей связаны с уменьшением жесткости рессорного подвешивания и внедрением новых технологий, таких как гидравлические приборы с компьютерным управлением, которые требуют разработки новых расчетных методик и подходов.

Цель

Цель данного исследования заключается в обосновании выбора факторов, которые определяют формирование динамической нагрузки на железнодорожный путь со стороны современного подвижного состава при условиях скоростного и высокоскоростного движения. Для достижения этой цели были проведены теоретические предпосылки и экспериментальные исследования.

В результате данного исследования будет разработана методика определения вертикальной расчетной силы, которая действует от колеса на рельс. Эта методика будет основываться на предшествующих теоретических и экспериментальных исследованиях, а также учете различных факторов, которые влияют на динамическую нагрузку на путь при скоростном и высокоскоростном движении подвижного состава.

Методика

Основным направлением адаптации расчетов пути на прочность для высоких скоростей движения следует считать адекватность учета динамики самого процесса движения. Касательно рельсов, в соответствии с принятой гипотезой Н. П. Петрова, прогиб рельса происходит мгновенно, а за очертание изгиба рельса под влиянием динамической перегрузки принимается линия изгиба от статической перегрузки, численно равного значению динамической силы в данный момент времени [6].

Пределы и граничившие условия применения такого предположения были рассмотрены Д. М. Курганом [7]. Динамическая нагрузка учитывается через соответствующее определение расчетной силы, за которую принимается максимальная вероятная сила с вероятностью не превышения 0,994, состоящая из статической нагрузки и комплекса динамических добавок, т. е.:

$$P_{\text{раз}} = \bar{P} + 2,5S, \quad (1)$$

где \bar{P} — среднее значение силы, действующей от колеса на рельс;

S — среднеквадратическое отклонение динамической вертикальной нагрузки колеса на рельс, кг.

В практических расчетах пути на прочность [6, 8] показатели силы, действующие от колеса на рельс, определяются по формулам:

$$\begin{cases} \bar{P} = P_{\text{ст}} + \bar{P}_p \\ S = \sqrt{S_p^2 + S_{pн}^2 + 0,05S_{нк}^2 + 0,95S_{ок}^2}, \end{cases} \quad (2)$$

где $P_{\text{ст}}$ — вес экипажа, отнесенный к одному колесу (статическая нагрузка);

\bar{P}_p — среднее значение силы от колебаний сверхрессорного веса экипажа;

S_p — среднеквадратическое отклонение силы от колебаний сверхрессорного веса экипажа;

$S_{pн}$ — среднеквадратическое отклонение силы от пережатки колеса по рельсу с неровностью;

$S_{нк}$ — среднеквадратическое отклонение силы от наличия на колесе изолированного неровности;

$S_{ок}$ — среднеквадратическое отклонение силы наличия на колесе непрерывного неровности.

Максимальное значение силы от колебаний надрессорного веса экипажа (кузова) можно определить через максимальные и статические прогибы рессор, а также через коэффициент вертикальной динамики [6] по следующей формуле:

$$P_{p(\text{max})} = k_d (P_{\text{ст}} - q_k), \quad (3)$$

где k_d — коэффициент вертикальной динамики;

q_k — вес необрессоренной части экипажа, отнесенный к одному колесу, кН.

Среднее значение силы от колебаний сверхрессорного веса экипажа принимается к 75 % от

его максимального значения, а едноквадратичное отклонение — 8 % [9] и определяется по следующему выражению:

$$\begin{cases} \bar{P}_p = 0,75P_{p(\max)} \\ S_p = 0,08P_{p(\max)} \end{cases} \quad (4)$$

Среднеквадратическое отклонение силы от пережатки колеса по рельсу с неровностью в соответствии с [9] определяется по следующей формуле:

$$S_{\text{рн}} = 1,81 \cdot 10^7 \alpha_1 \beta \varepsilon \gamma \sqrt{\frac{U q_k}{k}} \bar{P} V, \quad (5)$$

где α_1 — коэффициент, зависящий от типа шпал (учитывает вес верхнего строения пути, участвующего во взаимодействии с колесом);

β — коэффициент, учитывающий тип рельсов (зависит от момента инерции рельса);

ε — коэффициент, зависящий от типа шпал;

γ — коэффициент, зависящий от вида балласта;

U — модуль упругости подрельсовой основы, МПа;

k — коэффициент относительной жесткости рельса, см⁻¹;

V — скорость движения, км/ч.

Согласно [8], среднеквадратическое отклонение силы, возникающей из-за наличия изолированного неровного участка на колесе, может быть рассчитано по следующей формуле:

$$S_{\text{инк}} = 0,05 \alpha_0 \xi e_0 \frac{U}{k}, \quad (6)$$

где α_0 — коэффициент, зависящий от типа шпал;

ξ — безразмерный прогиб (отношение дополнительного прогиба рельса, возникающего вследствие наличия на колесе изолированного неровности, до глубины этого неровности);

e_0 — глубина изолированной неровности на колесе, см.

Среднеквадратическое отклонение силы от наличия на колесе непрерывного неравенства в соответствии с [8] рекомендовано определять по формуле

$$S_{\text{онк}} = \frac{1,63 \cdot 10^{-2} a_0 U \sqrt{qkV^2}}{d^2 \sqrt{kU - 32k^2 qk}}, \quad (7)$$

где d — диаметр колеса, см.

Как видно из приведенных формул, динамические составляющие силы, действующие от колеса на рельс, имеют сложные зависимости от многих параметров. Выполненные исследования показали, что для большинства разновидностей современных единиц скоростного и высокоскоростного подвижного состава характерна зависимость вклада каждой динамической добавки в общее значение силы. Определяющими исходными данными можно считать скорость движения и модуль упругости подрельсовой основы.

Результаты

Значения вертикальных сил были вычислены согласно формулам (4) — (7) и представлены в виде графических изображений на рисунках с 1 по 7.

На рис. 1 приведены результаты расчетов по определению изменения значений среднеквадратических отклонений динамических сил, входящих в практические прочностные расчеты, в зависимости от скорости движения, выполненных по формулам (4) — (7). При этом модуль упругости подрельсового основания принять 50 Мпа [10].

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 1, позволил установить, что соотношение среднеквадратических отклонений динамических сил, а соответственно, и влияние разных факторов для разных скоростей движения не одинаково. Так, можно отделить зону со скоростями движения до 80–100 км/ч (характерно для грузовых поездов,

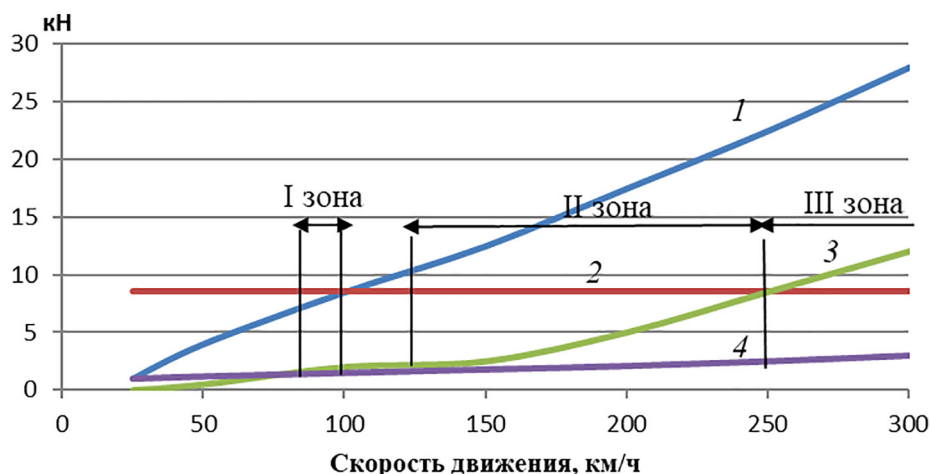


Рис. 1. Изменение среднеквадратических отклонений динамических сил от скорости движения:

$$1 — S_{pH}; 2 — S_{инк}; 3 — S_{бнк}; 4 — S_p$$

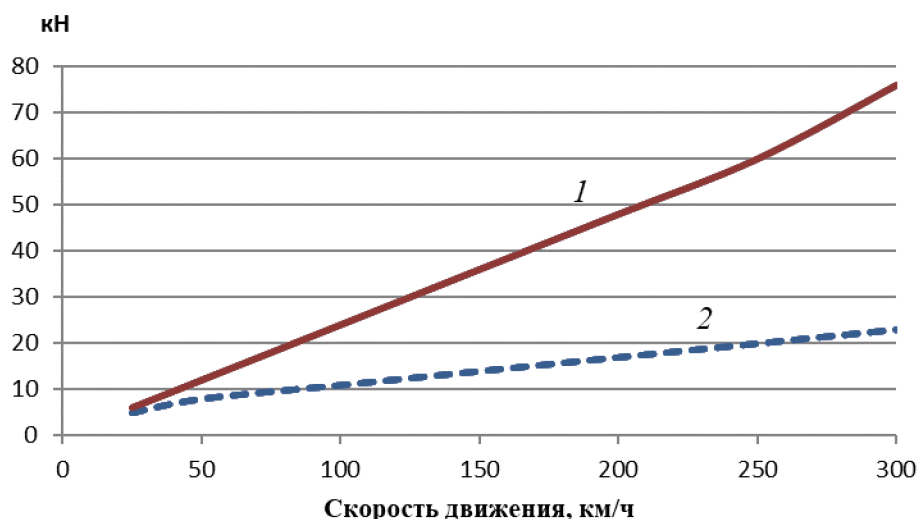


Рис. 2. Изменение составляющих расчетной силы в зависимости от скорости движения:

$$1 — 2,5S; 2 — \bar{P}_0$$

условно I зона) и зоны со скоростью движения 120–250 км/ч (II зона) и более 250 км/ч (III зона).

На рис. 2 приведена зависимость составляющих расчетной силы (общего среднеквадратичного отклонения и среднего значения силы от колебаний наддрессорного веса экипажа) в зависимости от скорости движения.

Для исследования изменения динамической нагрузки от колеса подвижного состава, т. е. локомотивов и вагонов, на рельс в зависимости

от скорости движения для пассажирских поездов произведены расчеты по определению их значений по формуле (10), приведенной в [8]. Результаты расчетов в виде графических изображений приведены на рис. 3–5. При этом предполагалось, что пассажирские поезда приводятся в движение локомотивами серий Talgo-250 и Skoda.

Приведенные значения средней и расчетной (рис. 3) сил определялись по результатам статистической обработки данных. С целью полу-

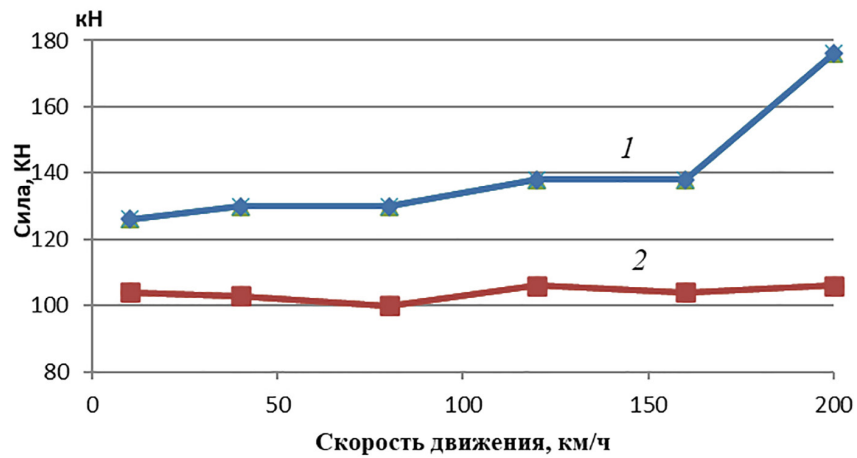
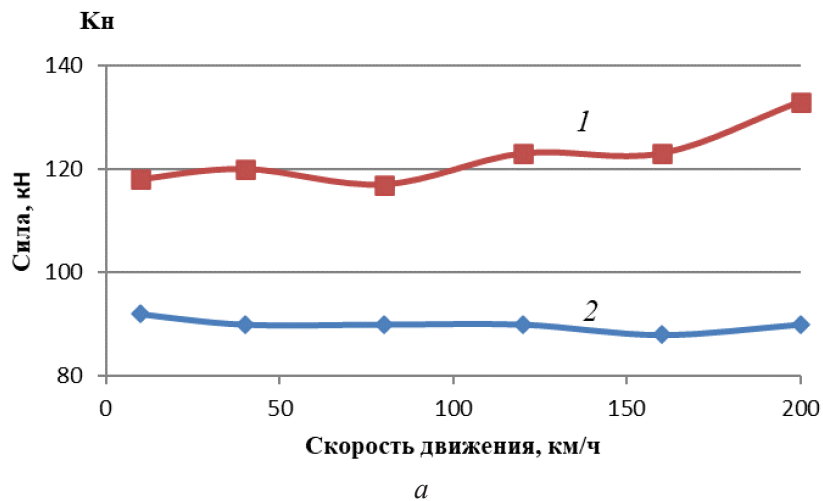
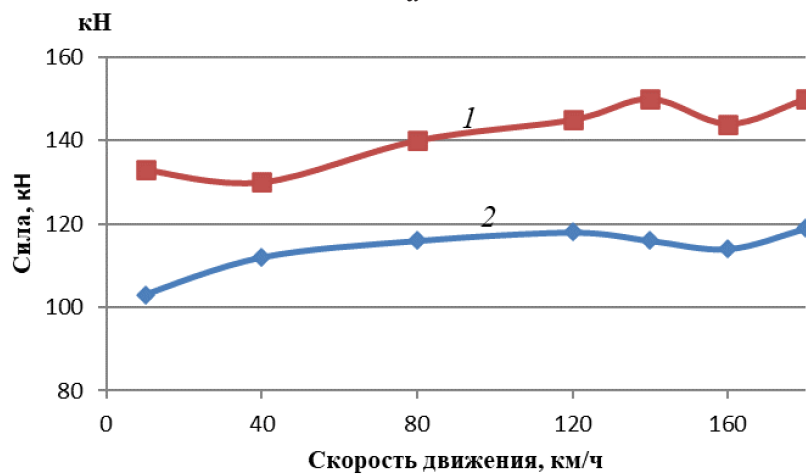


Рис. 3. Взаимосвязь между средней и расчетной вертикальной силами в зависимости от скорости движения для локомотива поезда Talgo-250 ($P_{ст} = 105,5$ кН):
 1 — среднее значение силы; 2 — расчетное значение силы



a



б

Рис. 4. Взаимосвязь между средней и расчетной вертикальной силой в зависимости от скорости движения для пассажирского вагона поезда:
a — Talgo-250 ($P_{ст} = 85$ кН); *б* — Skoda ($P_{ст} = 99$ кН): 1 — среднее значение силы; 2 — расчетное значение)

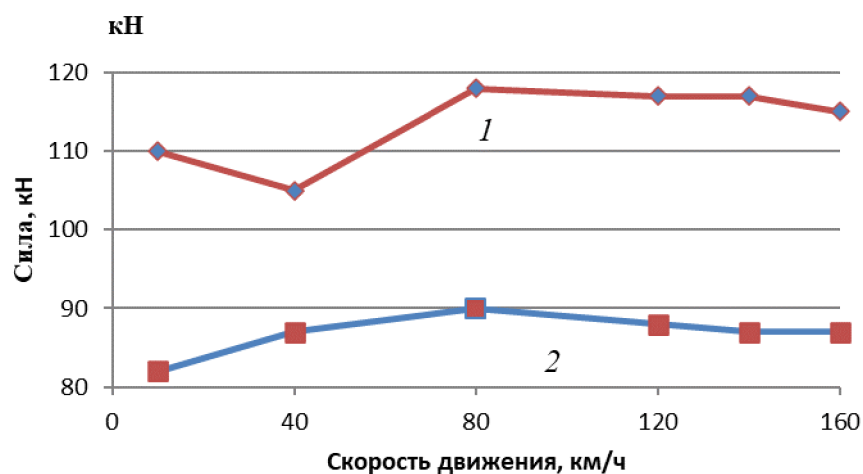


Рис. 5. Взаимосвязь между средней и расчетной вертикальной силами в зависимости от скорости движения для прицепного вагона поезда Skoda ($P_{ст} = 84$ кН):
1 — среднее значение силы; 2 — расчетное значение силы

чения количественных характеристик влияния различных факторов на значение вертикальной силы, которая действует от колеса на рельс, были выполнены факторные дисперсионные анализы с использованием результатов достаточного количества измерений для экспериментального поезда Talgo-250 [9–11].

Таким же образом было установлено влияние числа осей на значение вертикальной силы действия колеса на рельс, что характеризует влияние колебаний кузова и неровностей на колесах (в качестве примера рассмотрено 8 осей пассажирских вагонов с примерно одинаковой нагрузкой) (рис. 4, а).

Также было проанализировано влияние места перереза рельса на значение вертикальной силы действия колеса на рельс, что характеризует влияние движения колеса по динамическим неровностям колеи, возникающим в результате колебаний рельса (в качестве примера рассмотрено 8 сечений на обоих нитях с разными расстояниями на участке с общей длиной 42 метра без наличия существенных отклонений в удержании) (рис. 4, б).

Аналогичные расчеты были выполнены для прицепного вагона поезда Skoda при $P_{ст} = 84$ кН. Взаимосвязь между средней и расчетной верти-

кальной силами в зависимости от скорости движения для прицепного вагона изображена на рис. 5.

Анализ влияния вертикальных сил от скорости движения поездов на основе моделирования движения высокоскоростного поезда Talgo-250 в Узбекистане

Для исследования взаимосвязи между вертикальными силами и скоростью движения поездов было проведено моделирование движения высокоскоростного поезда Talgo-250 при различных скоростях и при постоянной осевой нагрузке от локомотива. Общее количество измерений в матрице расчетов менялось в зависимости от уровня скорости движения. Например, при скорости 200 км/ч было проведено 420 измерений. Результаты полученных данных подчиняются нормальному закону распределения, что позволяет выявить закономерности влияния вертикальных сил на скорость движения поездов.

На рис. 6 приведены примеры законов распределения, полученных по экспериментальным данным, для скоростей движения 80 и 200 км/ч с шагом дискретизации сигнала 12,5 кН.

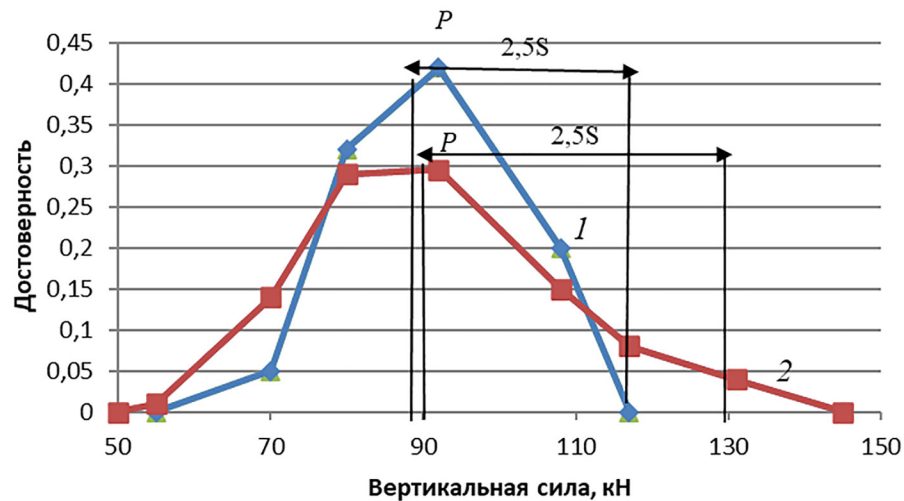


Рис. 6. Закон распределения вертикальной силы от колеса на рейку по экспериментальным измерениям для пассажирского вагона поезда Talgo-250:

1 — скорость движения 80 км/ч; 2 — скорость движения 200 км/ч

Для скорости движения 200 км/ч была установлена степень воздействия (по коэффициенту Фишера), число оси вагона на уровне 1,696; степень воздействия номера сечения рельса — 122,4 при уровне критического значения коэффициента Фишера 2,02. Для других значений скорости движения соотношение приведенных показателей принципиально не меняется. К примеру, при скорости движения 80 км/ч получены коэффициенты Фишера 0,296 и 120,1 для оси и сечения рельса соответственно.

Таким образом, можно сделать вывод, что в современных пассажирских вагонах эффективно гасятся колебания кузова и они не приводят к значительному увеличению вертикальной силы давления колеса на рельсы. Основным фактором, который вызывает возмущение динамической силы, является прохождение колесом динамических неровностей колеи, которые образуются даже при отсутствии значительных геометрических неровностей вследствие колебаний рельса на упругой подрельсовой основе.

Поэтому целесообразно рассмотреть методику определения именно динамической силы от прохождения колеса по рельсовой неровности.

В первичном виде формулу (5) можно представить следующим образом:

$$S_{\text{рн}} = 0,707\alpha \frac{n^2}{\sqrt{2g}} \sqrt{\frac{Uq_k}{k}} Vi, \quad (8)$$

где 0,707 — коэффициент перехода от максимального значения силы к ее среднеквадратичному отклонению, соответствующий тригонометрической функции, закладываемой для описания гармонических колебаний;

g — ускорение свободного падения;

i — динамический уклон рельсовой неровности;

α_0 — коэффициент, вошедший в формулу впоследствии, определяется отношением массы колеса и массы колеи, приведенных к точке их контакта.

Формула (8) является результатом обработки данных решения дифференциального уравнения колебаний механического пара «колесо — рельс», первично полученного для подрельсового основания с деревянными шпалами. Для железобетонных шпал была предложена другая формула [12, 13]:

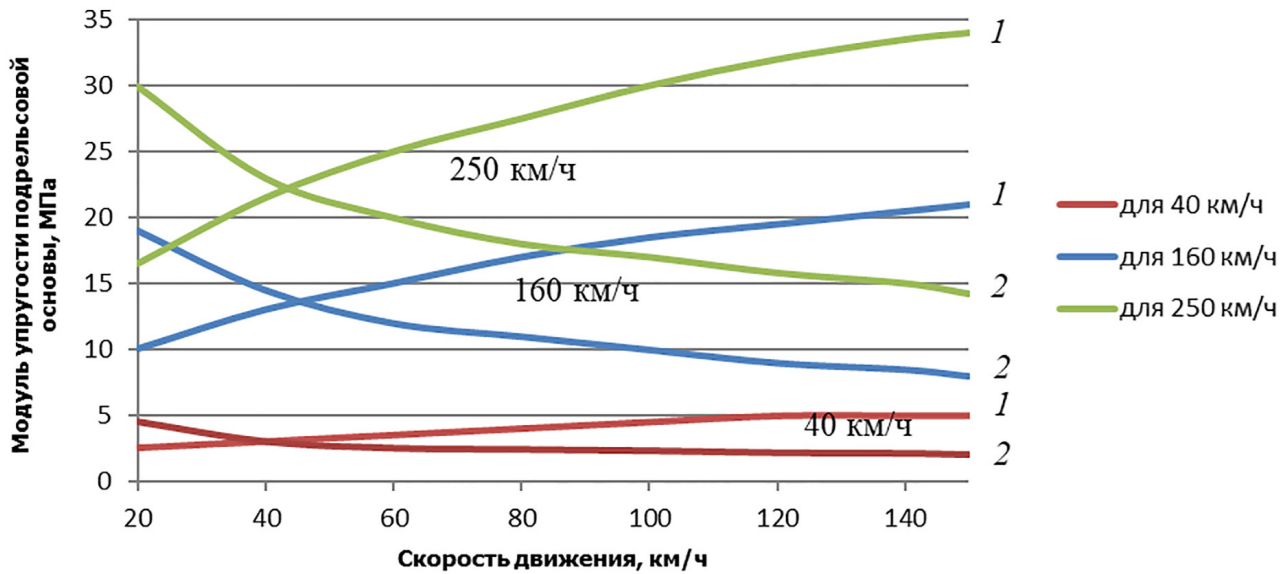


Рис. 7. Изменение среднеквадратического отклонения силы при движении колеса по неровной рельсовой основе относительно модуля упругости подрельсовой основы можно оценить двумя способами: первый — с использованием формулы (5), второй — с применением формулы (8) при скоростях движения 40, 160 и 250 км/ч

$$S_{\text{рн}} = \frac{9,1 \cdot 10^{-3} \bar{P} V \sqrt{q_k}}{\sqrt[8]{EIU^3}} \quad (9)$$

где E — модуль упругости рельсовой стали;
 I — момент инерции рельса.

Однако в современных практических расчетах пути на прочность [5] используется формула (8), полученная из формулы (5) с соответствующими коэффициентами, учитывающими прежде всего изменение параметров динамического неравенства при применении железобетонных шпал, вызванное увеличением жесткости подрельсовой основы и изменением приведенной массы пути:

$$\begin{cases} i = A \alpha_1 \beta \epsilon \gamma \bar{P} \\ A = \frac{1,788 \cdot 10^4 \sqrt{2g}}{n^2 \alpha_0} \end{cases} \quad (10)$$

Кривые зависимостей среднеквадратического отклонения силы при прохождении по рельсовому неравенству от модуля упругости

подрельсового основания рассчитаны по формулам (5) и (8). Данные результаты для уровней скоростей движения поездов: 40, 160 и 250 км/ч представлены на рис. 7. Проведенный анализ полученных результатов (см. рис. 7) показывает, что при низких скоростях движения различия в расчетах являются незначительными. Модули упругости подрельсовой основы, вычисленные для разных уровней скорости с использованием формул (5) и (8), в диапазоне скоростей 40–50 км/ч совпадают с достаточной точностью. Существенное увеличение модуля упругости приводит к различию результатов, которое становится особенно ощутимым при высоких скоростях движения [14–16].

В данном исследовании не предполагается решать задачу определения приведенной массы пути. Напротив, приведенные рассуждения указывают на то, что такой параметр является искусственным и может быть использован только при низких скоростях движения в рамках статических схем расчета [7].

Выводы

Анализ результатов статистической обработки данных расчетных исследований движения современных пассажирских поездов со скоростями движения до 200 км/ч относительно уровня динамической вертикальной силы действия колеса на рельс позволил установить степень влияния вышеприведенных факторов на формирование значения этой силы. Обнаружение расхождений между полученными расчетными значениями и теоретическими данными указывает на необходимость пересмотра методики определения расчетной силы для практических расчетов прочности пути в условиях движения пассажирских поездов с высокими скоростями. Пересмотр должен состоять не только в корректировке существующих методов, но и в формировании новых подходов на основе современных математических моделей или соответствующих статистических данных с учетом зарубежного опыта [17].

Такой подход скрывает влияние детальных характеристик колеи и подвижного состава на формирование динамической силы, но позволяет получать адекватные численные значения для соответствующих расчетов прочности железнодорожного пути.

Представленные результаты открывают новые перспективы для научной задачи разработки современных методов расчета напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути при высоких скоростях движения. На основе проведенных теоретических исследований и расчетных измерений были установлены факторы, вызывающие динамическую составляющую вертикальной силы в современных пассажирских [18].

Полученные рекомендации значительно улучшают существующие методы расчета прочности пути и предлагают практическое решение для их применения при скоростях движения свыше 160 км/ч. Это способствует более точному определению напряженно-деформированного состояния

железнодорожного пути и позволяет эффективно решать практические задачи, связанные с проектированием и эксплуатацией железнодорожных магистралей для высоких скоростей движения [19–22].

Расчетная вертикальная сила, действующая от колеса на рельс, действительно зависит от множества факторов. При проведении практических расчетов прочности железнодорожного пути этот показатель формируется из нескольких составляющих, влияние которых на разных скоростях движения неодинаково. По анализу результатов аналитических расчетов установлено, что по влиянию разных динамических составляющих можно отделить следующие скоростные зоны: до 80–100 км/ч, 120–250 км/ч, более 250 км/ч.

Теоретические исследования, анализ статистических данных и экспериментальные измерения однозначно указывают, что основным фактором, вызывающим динамическую составляющую вертикальной силы для современных пассажирских поездов, движущихся со скоростью 120 км/ч и выше, являются колебания в системе «колесо — рельс» или так называемое прохождение колесом динамической рельсовой неровности.

Существующие методы расчета динамических сил требуют использования параметра, такого как приведенная масса пути. Однако проведенные исследования показывают, что такой параметр является искусственным и может быть применен только для низких скоростей движения, при использовании статических расчетных схем.

Библиографический список

1. Даниленко Е. И. Правила расчетов железнодорожного пути на прочность и устойчивость: ЦП-0117 1 / Е. И. Даниленко.
2. Джаббаров С. Т. Исследование напряженно-деформированного состояния рельсов при увеличении осевой нагрузки / С. Т. Джаббаров, Н. Б. Кодиров // *Universum: технические науки*. — 2022. — № 12-3(105). —

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-napryazhenno-deformirovannogo-sostoyaniya-relsov-pri-uvelichenii-osevoy-nagruzki> (дата обращения: 21.02.2023).

3. Djabbarov S. Potential and Problems of the Development of Speed Traffic on the Railways of Uzbekistan / S. Djabbarov, M. Mirakhmedov, A. Śladkowski // *Transport Systems and Delivery of Cargo on East-West Routes*. — Springer, Cham, 2018. — Pp. 369–421.
4. André José Maria C. S. A railway steering system guided by a reference ahead of the train / C. S. André José Maria // *Vehicle System Dynamics*. — 2013. — Vol. 51. — Iss. 3. — Pp. 481–496. — DOI: 10.1080/00423114.2012.757333.
5. Likhtberger B. Railway track / B. Likhtberger. — Hamburg, DVV Media Group GmbH Publ., 2010. — 434 p.
6. Даниленко Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість: ЦП-0117 / Е. І. Даниленко, В. В. Рибкін. — Київ: Транспорт України, 2004. — 64 с.
7. Курган Д. М. Особенности восприятия нагрузки элементами железнодорожного пути при высоких скоростях движения / Д. М. Курган // *Наука и прогресс трансп. Вестн. Днепропетр. нац. ун-та железн. трансп.* — 2015. — № 2(56). — С. 136–145. — DOI: 10.15802/stp2015/42172.
8. ЦПТ-52/14. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности. — М.: МПС РФ, 2000. — 40 с.
9. Даниленко И., Рыбкин В. В. — Киев: Транспорт Украины, 2004. — 64 с.
10. Djabbarov S. Potential and Problems of the Development of Speed Traffic on the Railways of Uzbekistan / S. Djabbarov, M. Mirakhmedov, A. Śladkowski // *Transport Systems and Delivery of Cargo on East-West Routes*. — 2018. — Pp. 369–421.
11. Яковлева Т. Г. Железнодорожный путь / Т. Г. Яковлева, Н. И. Карпущенко, С. И. Клинов и др. — М.: Транспорт, 1999. — 405 с.
12. Loktev A. Simulation of the Railway under Dynamic Loading / A. Loktev, E. A. Gridasova, E. V. Zapol'nova. — Part 1. Ray Method for Dynamic Problem.
13. Вериго М. Ф. Основные положения методики расчета сил, действующих на железобетонные шпалы / М. Ф. Вериго // *Тр. ВНИИЖТа*. — М., 1963. — С. 5–39.
14. *Contemporary Engineering Sciences*. — 2015. — Vol. 8. — Iss. 18. — Pp. 799–807
15. Cai Z. Modelling the dynamic response of railway track to wheel/rail impact loading / Z. Cai, G. P. Raymond // *Structural Engineering and Mechanics*. — 1994.
16. Djabbarov S. Device of road boards with compacting layers with rollers / S. Djabbarov, Z. Kakharov, N. Kodirov // *AIP Conference Proceedings*. — AIP Publishing LLC, 2022. — Vol. 2432. — Iss. 1. — P. 030036.
17. Roanes-Lozano E. The Geometry of Railway Geometric Overthrow Revisited Using Computer Algebra Methods / E. Roanes-Lozano.
18. *Mathematics in Computer Science*. — 2013. — Vol. 7. — Iss. 4. — Pp. 473–485. — DOI: 10.1007/s11786-013-0164-7.
19. Stukalina O. Problems of rail connections between Ukraine and its neighboring countries / O. Stukalina, A. Dzhaleva-Chonkova.
20. *Mechanics Transport Communications*. — 2012. — Vol. 10. — Iss. 3/2. — Pp. 3.4–3.8.
21. Agostinacchio M. Parametrical analysis of the railways dynamic response at high speed moving loads / M. Agostinacchio, D. Ciampa, M. Diomedei et al. // *Journal of Modern Transportation*. — 2013. — Vol. 21. — Iss. 3. — Pp. 169–181.
22. Talgo 250. Available at: http://www.talgo.com/pdf/t250_250H_en.pdf (дата обращения: 08.04.2015).

Дата поступления: 12.07.2023

Решение о публикации: 30.08.2023

Контактная информация:

ДЖАББАРОВ Саидбурхан Тулаганович — д-р техн. наук, проф.; _saidhon_@inbox.ru
КОДИРОВ Нодирбек Бахтиерович — докторант; nodir_kodirov_95@mail.ru

Analysis of the Impact of Wheel Dynamic Load on Rails under High-Speed Train Operations in Uzbekistan

S. T. Jabbarov, N. B. Kodirov

Tashkent University of Transport, 1, Temiryulchilar str., Tashkent, Republic of Uzbekistan

For citation: Jabbarov S. T., Kodirov N. B. Analysis of the Impact of Wheel Dynamic Load on Rails under High-Speed Train Operations in Uzbekistan // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 531–543. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-531-543

Summary

Purpose: Justification of choosing the factors influencing the formation of dynamic load on the railway track by modern rolling stock during high-speed and very high-speed operations. To achieve this goal, theoretical groundwork and experimental research have been conducted. As a result of the work, a methodology has been developed for determining the vertical calculated force exerted by the wheel on the rail. **Methods:** High-speed and very high-speed trains, due to their fundamental design and significant increase in speed, necessitate a reconsideration of methods for calculating the impact of rolling stock on the railway track. This includes the analysis of relationships between root-mean-square deviations of various dynamic forces and the assessment of the influence of different factors at different speeds of operation. **Results:** As part of the study, experimental measurements have been conducted to examine changes in dynamic load. As a result, dependencies between the average and calculated vertical forces and the speed of operation for modern passenger trains have been obtained. By using factorial analysis of variance, numerical characteristics of the influence of various factors on the value of the vertical force exerted by the wheel on the rail have been obtained. Additionally, the degrees of influence of different factors on the formation of this force have been determined.

Keywords: Track strength calculation, track superstructure, high-speed operation, track stress, dynamic force, dynamic inequality.

References

1. Danilenko E. I. *Pravila raschetov zheleznodorozhnogo puti na prochnost' i ustoychivost': TsP-0117 1* [Rules for calculating railway tracks for strength and stability: TsP-0117 1]. (In Russian)
2. Dzhabbarov S. T., Kodirov N. B. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya rel'sov pri uvelichenii osevoy nagruzki [Study of the stress-strain state of rails with increasing axial load]. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences]. 2022, Iss. 12-3(105). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-napryazhenno-deformirovannogo-sostoyaniya-relsov-pri-uvelichenii-osevoy-nagruzki> (accessed: February 21, 2023). (In Russian)
3. Djabbarov S., Mirakhmedov M., Śladkowski A. Potential and Problems of the Development of Speed Traffic on the Railways of Uzbekistan. *Transport Systems and Delivery of Cargo on East-West Routes*. Springer, Cham, 2018, pp. 369–421.
4. André José Maria C. S. A railway steering system guided by a reference ahead of the train. *Vehicle System Dynamics*, 2013, vol. 51, Iss. 3, pp. 481–496. DOI: 10.1080/00423114.2012.757333.
5. Likhberger B. *Railway track*. Hamburg, DVV Media Group GmbH Publ., 2010, 434 p.
6. Danilenko E. I., Ribkin V. V. *Pravila rozrakhunkiv zaliznichnoi kolii na mitsnist' i stiykist': TsP-0117* [Rules for assessing the size of the salinity for strength and durability: TsP-0117]. Kii'v: Transport Ukraïni Publ., 2004, 64 p.

7. Kurgan D. M. Osobennosti vospriyatiya nagruzki elementami zheleznodorozhnogo puti pri vysokikh skorostyakh dvizheniya [Features of load perception by elements of the railway track at high speeds]. *Nauka i progress transp. Vestn. Dnepropetr. nats. un-ta zhelezn. transp* [Science and progress of transport. Vestn. Dnepropetr. nat. University of Railways transport]. 2015, Iss. 2(56), pp. 136–145. DOI: 10.15802/stp2015/42172. (In Russian)
8. TsPT-52/14. Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti [TsPT-52/14. Methodology for assessing the impact of rolling stock on the track based on the conditions for ensuring its reliability]. Moscow: MPS RF Publ., 2000. 40 p. (In Russian)
9. Danilenko I., Rybkin V. V. Kiev: Transport Ukrainy Publ., 2004, 64 p.
10. Djabbarov S., Mirakhmedov M., Sładkowski A. Potential and Problems of the Development of Speed Traffic on the Railways of Uzbekistan. *Transport Systems and Delivery of Cargo on East-West Routes*, 2018, pp. 369–421.
11. Yakovleva T. G., Karpushchenko N. I., Klinov S. I. et al. *Zheleznodorozhnyy put'* [Railway route]. Moscow: Transport Publ., 1999, 405 p. (In Russian)
12. Loktev A., Gridasova E. A., Zapol'nova E. V. Simulation of the Railway under Dynamic Loading. Part 1. Ray Method for Dynamic Problem.
13. Verigo M. F. Osnovnye polozheniya metodiki rascheta sil, deystvuyushchikh na zhelezobetonnye shpaly [Basic provisions of the methodology for calculating forces acting on reinforced concrete sleepers]. *Tr. VNIIZhTa* [Tr. VNIIZhT]. Moscow, 1963, pp. 5–39. (In Russian)
14. Contemporary Engineering Sciences, 2015, vol. 8, Iss. 18, pp. 799–807.
15. Cai Z., Raymond G. P. Modelling the dynamic response of railway track to wheel/rail impact loading. *Structural Engineering and Mechanics*, 1994.
16. Djabbarov S., Kakharov Z., Kodirov N. Device of road boards with compacting layers with rollers. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2022, vol. 2432, Iss. 1, p. 030036.
17. Roanes-Lozano E. The Geometry of Railway Geometric Overthrow Revisited Using Computer Algebra Methods.
18. Mathematics in Computer Science, 2013, vol. 7, Iss. 4, pp. 473–485. DOI: 10.1007/s11786-013-0164-7.
19. Stukalina O., Dzhaleva-Chonkova A. Problems of rail connections between Ukraine and its neighboring countries. *Mechanics Transport Communications*, 2012, vol. 10, Iss. 3/2, pp. 3.4–3.8.
20. Agostinacchio M., Ciampa D., Diomedes M. et al. Parametrical analysis of the railways dynamic response at high speed moving loads. *Journal of Modern Transportation*, 2013, vol. 21, Iss. 3, pp. 169–181.
22. Talgo 250. Available at: http://www.talgo.com/pdf/t250_250H_en.pdf (accessed: April 8, 2015).

Received: July 12, 2023

Accepted: August 30, 2023

Author's information:

Saidburkhan T. DJABBAROV — PhD in Engineering, Professor; _saidhon_@inbox.ru

Nodirbek B. KODIROV — Doctoral Student; nodir_kodirov_95@mail.ru

УДК 656.2.07 + 06

Актуальные вопросы в грузовой и коммерческой работе на железнодорожных станциях

Н. М. Магомедова, В. В. Хан

Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

Для цитирования: Магомедова Н. М., Хан В. В. Актуальные вопросы в грузовой и коммерческой работе на железнодорожных станциях // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 544–553. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-544-553

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос взаимодействия перевозчиков и контрагентов с использованием новых подходов направленных на привлечение клиентов на рынок транспортных услуг, с созданием единого механизма на основе цифровизации. **Методы:** Целый ряд работ исследует вопросы расположения складских помещений. В них поставленная задача решается различными методами такими как эвристическое определение «центра тяжести» для предприятий, многокритериальный интеграл Шоке, метод анализа иерархий, заключающийся в попарных сравнениях, а также авторские методы экономико-географического моделирования транспортных систем, отражающие геометрическую идею подхода в транспортно-логистических исследованиях с разграничением «областей влияния». **Результаты:** Указана необходимость создания единого механизма взаимодействия перевозчика и контрагента. В реализации поставленных аспектов играет характер перевозки с учетом номенклатуры грузов. Предпочтение должно быть направлено на массовые категории. В решении поставленных целей возможно применение метода линейного программирования (равенства). Выявлена необходимость в проведении дополнительного изучения конъюнктуры хозяйствующего субъекта. **Практическая значимость:** Показана необходимость создание единой цифровой платформы взаимодействия участников перевозочного процесса, реализация которой позволит ускорить процесс решения задач, направленных на использование новых инструментов, способствующих улучшению работы хозяйствующего субъекта. Приведенные схемы расположения складов могут быть рекомендованы к практическому использованию.

Ключевые слова: Складская логистика, инфраструктура, станция, грузовой склад, транспорт, аутсорсер.

Железнодорожный транспорт играет огромную роль в жизнеобеспечении населения, в перевозках пассажиров, а также грузов. Особое значение имеют грузовые перевозки, так как основная часть прибыли и доходов приходится на них.

Взаимодействие перевозчиков и контрагентов носит особый характер. Специфика взаимоотношений требует использования новых подходов, которые будут направлены на привлечение клиентов на рынок транспортных услуг. Для условий клиентоориентированности необходимо:

- изучение конъюнктуры рынка транспортных услуг;
- расширение географического расположения участников перевозочного процесса;
- привлечение дополнительных объектов инфраструктуры;
- наличие широко развитой материально-технической базы;
- располагать достаточно квалифицированным персоналом;
- использование гибкой тарифной политики;
- развитие рекламной деятельности.

Выполнение вышеперечисленных условий позволит создать основу, которая расширит сферу влияния участников перевозочного процесса.

Анализируя деятельность инфраструктуры, можно сделать выбор с учетом предпочтений контрагентов.

Размещение складских помещений на территории транспортного узла представляет собой важную и комплексную задачу в грузовых перевозках, постановка и решение которой включает в себя обработку, анализ и расчет значительных массивов разнообразной информации. Целый ряд работ исследует вопросы расположения складских помещений. В них поставленная задача решается различными методами, такими как эвристическое определение «центра тяжести» для предприятий [1], многокритериальный интеграл Шоке [2], метод анализа иерархий [3], заключающийся в попарных сравнениях, а также авторские методы экономико-географического моделирования транспортных систем [4, 5], отражающие геометрическую идею подхода в транспортно-логистических исследованиях с разграничением «областей влияния» [6, 7].

В то же время в развитии грузового движения помимо определения местоположения распределительных центров и складов необходимы учет сбалансированных показателей экономической оценки состояния железнодорожных предприятий [8], внедрение современных подходов обслуживания клиентов [9, 10] с привлечением к перевозочному процессу аутсорсеров и реализацией единой цифровой платформы

Клиентам предпочтительней создание единых условий функционирования объектов инфраструктуры. Основными критериями являются:

- доступность;
- гибкость;
- сохранность;
- надежность;
- универсальность.

Также важно отметить, что важную роль играет то, насколько часто будет прибегать к услугам перевозчика клиент. Для создания единого механизма взаимодействия перевозчика и контрагента достаточно знать, какими объемами перевозимых грузов будет располагать грузоотправитель, на какой период будут запланированы заявки, подаваемые перевозчику грузоотправителями:

- прогнозируемый месяц;
- ежемесячно;
- по декадам;
- поквартально.

В реализации поставленных аспектов играет характер перевозки с учетом номенклатуры грузов. Предпочтение должно быть направлено на массовые категории. В решении поставленных целей возможно применение метода линейного программирования (равенства):

$A_1 A_2 A_3 A_4$ — станции отправления;
 $a_1 a_2 a_3 a_4$ — количество тонн груза;
 $B_1 B_2 B_3$ — станции назначения;
 $b_1 b_2 b_3$ — количество заявок.

$$b_1 + b_2 + b_3 = a_1 + a_2 + a_3 + a_4, \quad (1)$$

где C_{ij} — стоимость перевозки единицы груза со станции отправления A_i на станцию назначения B_j ;

i — номер станции отправления;

j — номер станции назначения.

Составим транспортную задачу.

Какой объем (m) количества груза откуда и куда отправить, при котором суммарные расходы на перевозки обращаются в минимум.

Метод линейного программирования.

x_{ij} — количество тонн груза, отправляемых из A_i -й станции отправления в B_j -ю станцию назначения.

Получаем всего 12 переменных элементов решения:

$$\left. \begin{array}{l} x_{11}, x_{12}, x_{13}, \\ x_{21}, x_{22}, x_{23}, \\ x_{31}, x_{32}, x_{33}, \\ x_{41}, x_{42}, x_{43}. \end{array} \right\} \quad (2)$$

Суммарная стоимость перевозок будет равна:

$$\begin{aligned} L = & C_{11}x_{11} + C_{12}x_{12} + C_{13}x_{13} + C_{21}x_{21} + \\ & + C_{22}x_{22} + C_{23}x_{23} + C_{31}x_{31} + C_{32}x_{32} + \\ & + C_{33}x_{33} + C_{41}x_{41} + C_{42}x_{42} + C_{43}x_{43}. \end{aligned} \quad (3)$$

1 — все заявки должны быть выполнены, т. е.:

$$\left. \begin{array}{l} x_{11} + x_{21} + x_{31} + x_{41} = b_1, \\ x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42} = b_2, \\ x_{13} + x_{23} + x_{33} + x_{43} = b_3. \end{array} \right\} \quad (4)$$

2 — все тонны груза должны быть загружены, т. е.:

$$\left. \begin{array}{l} x_{11} + x_{12} + x_{13} = a_1 \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} = a_2 \\ x_{31} + x_{32} + x_{33} = a_3 \\ x_{41} + x_{42} + x_{43} = a_4 \end{array} \right\}. \quad (5)$$

Выбрав неотрицательные значения переменных $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{43}$, получаем, что линейная функция этих переменных (3) обращалась в минимум.

Формируя маршруты с учетом технологии работы станции и путей необщего пользования, есть возможность предоставления отдельным клиентам скидок.

Проводя анализ конъюнктуры рынка транспортных услуг, стоит обратить внимание на грузоотправителей, имеющих долгосрочную перспективу.

Возникает необходимость создания базы, которая даст возможность сформировать единое русло, которое целенаправленно будет работать в одной трансформации.

Первоочередная задача заключается в построении модели, создание которой будет направлено на использование новых инструментов,

позволяющих улучшить работу хозяйствующего субъекта.

К рассмотрению существующей инфраструктуры стоит привлечь владельцев железнодорожных путей необщего пользования в зонах тяготения грузопотоков (рис. 1).

Реализация единой цифровой платформы позволит ускорить процесс решения следующих задач:

- выбор аутсорсера (рис. 2);
- кратчайший маршрут;
- сроки доставки груза;
- оформление документов;
- складская логистика;
- экспедиционное обслуживание.

Целесообразность внешнего аутсорсера заключается в использовании его технических мощностей, а использование внутреннего аутсорсера позволит выполнять различные технологические операции внутри хозяйствующего субъекта. Оба варианта используются в грузовой и коммерческой работе.

Главная задача выбора внешнего аутсорсера направлена на подбор высококвалифицированных работников, имеющих определенный опыт работы в сфере оказания транспортных услуг. Подбор внутреннего аутсорсера возможен среди работников структуры железнодорожного транспорта.

Аутсорсинговую деятельность широко можно использовать в сфере грузовых перевозок. Например, приемосдатчик груза может совмещать работу осмотрщика вагонов. Внешних аутсорсеров необходимо привлекать по доставке грузов «от двери до двери».

Выбирая аутсорсеров, учитываются:

- месторасположение;
- опыт работы;
- коммуникабельность;
- организаторские способности;
- знание языков;
- деловая этика;
- отсутствие задолженностей;
- платежеспособность.



Рис. 1. Структура единой цифровой платформы взаимодействия участников перевозочного процесса

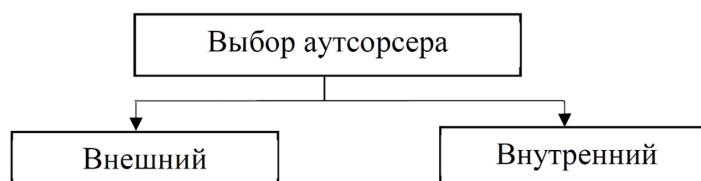


Рис. 2. Виды аутсорсеров

Аутсорсинговая деятельность позволяет усовершенствовать перевозочный процесс с учетом особенностей работы инфраструктуры железнодорожного транспорта.

При выборе аутсорсеров учитываются особенности его работы, качественное выполнение поставленных задач. Играть роль опыт работы, спектр выполняемых услуг. Месторасположение, дальность перевозки, техническое оснащение, квалифицированный персонал — это требования, выдвигаемые при выборе эффективного аутсорсера либо аутсорсинговой компании.

Суть использования единой цифровой платформы заключается в создании единого механизма, который ускоряет работу по взаимодействию перевозчиков, владельцев инфраструктур, контрагентов и аутсорсеров, тем самым создавая единые условия, максимально выгодные для развития деятельности всей инфраструктуры железнодорожного транспорта в целом.

Процесс перевозки грузов в настоящее время требует внимания. Современное состояние инфра-

структуры железнодорожного транспорта позволяет создать единую цифровую платформу. Заинтересованность клиентов — это главный инструмент, который обеспечит надежность и укрепит позиции на рынке транспортных услуг. Для привлечения клиентов необходимо широко развивать рекламную деятельность.

Наиболее актуальным остается использование различных рекламных проспектов, буклетов. При проведении выставок, семинаров, сетевых школ востребована сувенирная продукция.

Принимая грузы к перевозке, стоит обращать внимание на номенклатуру, вид отправки, свойства, характер. На грузы, обладающие специфическими свойствами, необходимо нанесение специальной маркировки.

Подвижной состав для перевозимых грузов необходимо выбирать с учетом взаимозаменяемости и рационализации. Также следует обращать внимание на перевозку грузов в контейнерах. Малотоннажные отправки грузов возможно принимать к перевозке в контейнерах. Учитывая

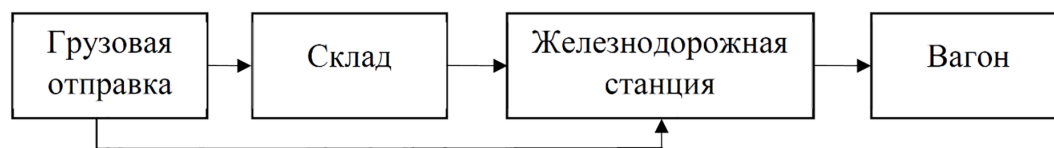


Рис. 3. Схема транспортирования грузовой отправки

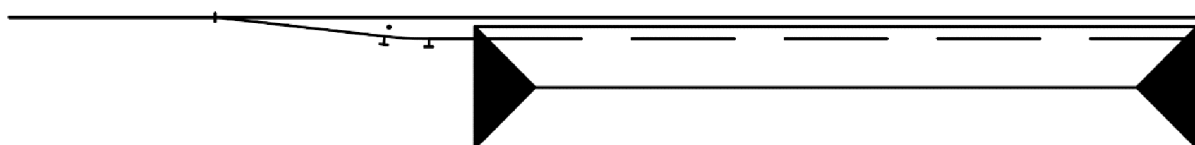


Рис. 4. Схема склада ангарного типа с внутренним вводом путей

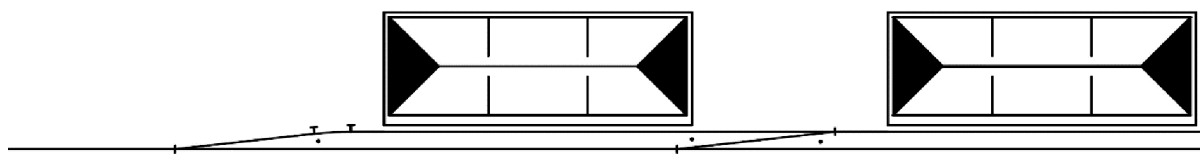


Рис. 5. Схема складов с боковым расположением путей

особые свойства грузов, необходимо подбирать соответствующие виды тары и упаковки. Также следует оформлять комплект перевозочных документов. В большей степени необходимо использовать систему ЭТРАН, которая сокращает время на оформление и передачу информации на расстоянии. К транспортной железнодорожной накладной должны прилагаться соответствующие документы, определяющие характер перевозимого груза. Если груз скоропортящийся, следует соблюдать температурный режим на основании Правил перевозок грузов железнодорожным транспортом, о чем делается отметка на оборотной стороне накладной в особых заявлениях отправителя груза.

Для грузов, перевозимых на открытом подвижном составе, подбирают типы крепления, разрабатывают схему размещения в вагоне. В перевозочном документе указываются глава, параграф, по которому груз размещен и закреплен. Также возможны варианты разработки индивидуальных схем размещения и крепления грузов по обращениям контрагентов.

Широкий спектр услуг, реализуемый на транспортном рынке, позволит привлечь клиентов и расширить сферу деятельности с учетом интересов всех участников перевозочного процесса.

В настоящее время грузоотправители чаще прибегают к паспорту груза, что дает широкие возможности установить все признаки, способствующие рациональной и эффективной перевозке (рис. 3). Это касается в первую очередь грузов, перевозимых в таре и упаковке. Для такой категории грузов возможно нанесение на тару или грузовую транспортную единицу маркировочного штрихкода, позволяющего установить номер партии, количество мест по данной отправки, порядковый номер одного грузового места. Это даст возможность ускорить процесс транспортировки грузов по прибытии на станцию назначения, а также при отправлении со станции погрузки.

Склады следует использовать ангарного типа с вводом пути внутрь (рис. 4) или с боковым расположением пути (рис. 5). Варианты расположения складов представлены на рис. 6.

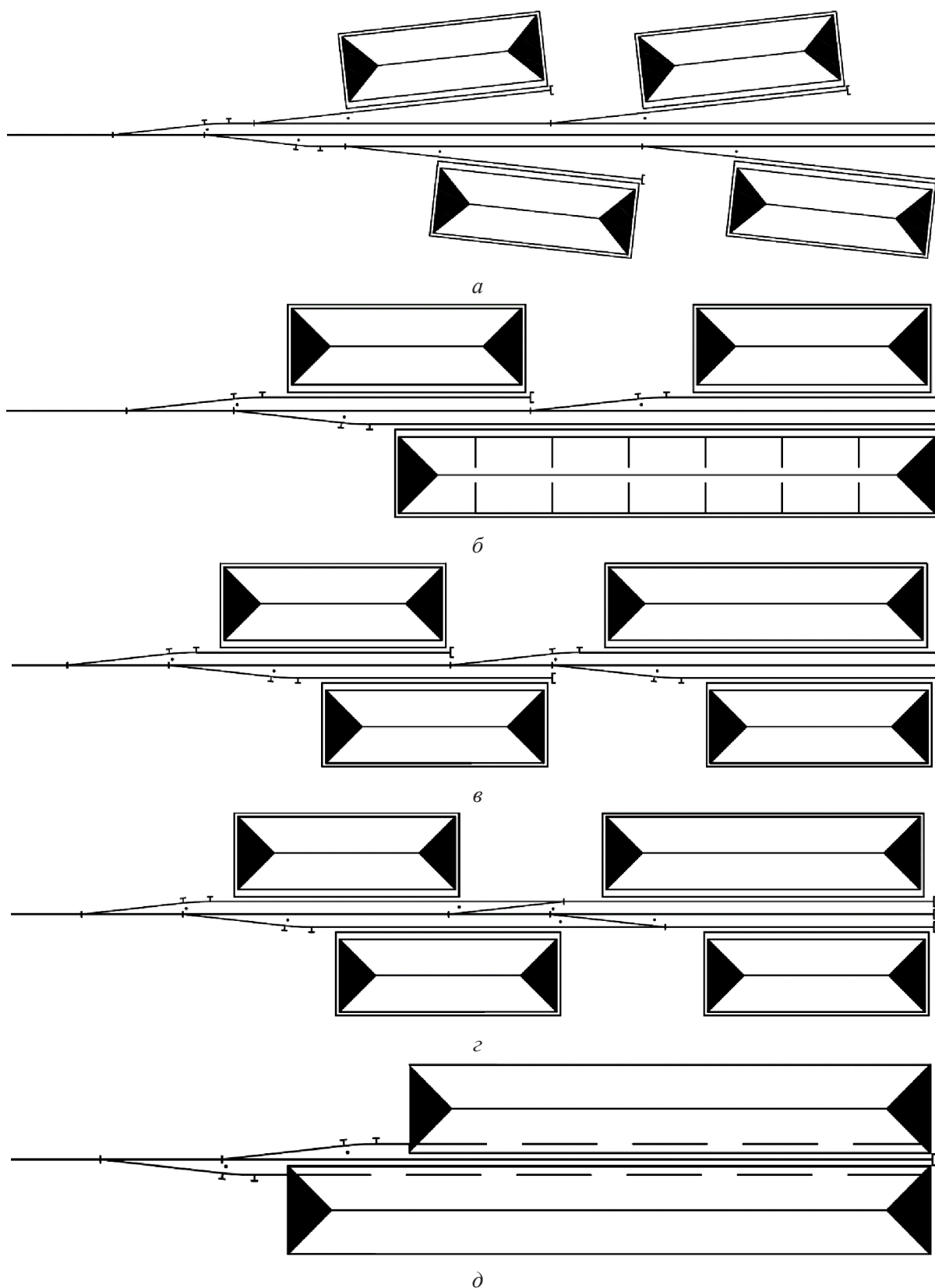


Рис. 6. Варианты взаимного расположения складов:
a-г — с наружным расположением погрузочно-выгрузочных путей (прирельсовые склады);
д — с внутренним вводом путей

При больших объемах и широкой номенклатуре перевозимых грузов целесообразно применять склады с боковым расположением путей. Также склады можно разграничивать на секции, которым будут присваиваться номера для простоты нахождения определенной номенклатуры грузов. Таким образом получаем номера транспортных грузовых единиц, а также секций для их хранения.

Что касается складов ангарного типа с внутренним вводом путей, то здесь хранится определенная группа грузов, например прибытие консервов овощных. Для создания единой цифровой платформы требования к складским устройствам играют определенную роль. Склады длительного хранения должны быть оснащены в техническом отношении. Для краткосрочного нахождения отправок грузов применимы обыкновенные ангары. При хранении грузов на складах также необходимо учитывать категории и виды отправок, их особенности и свойства.

На грузы, перевозимые в таре, возможно применение штрихкодов, наносимых на ящичную тару с торца, для считывания информации и быстрого доступа. На складах должны быть устройства для сканирования штрихкодов. Работник склада должен вести контроль и учет за грузовыми отправлениями. В складе возможно использование стеллажей для хранения мелкопартионных отправок в ящичной таре. Использование стеллажей упростит задачу внутри складского перемещения партий грузов. Использование различных технических средств и устройств создаст условия для динамичного развития хозяйствующих субъектов.

Тем самым позволит клиентам делать выбор для рационального использования необходимых технических средств, обеспечивающих возможности развития взаимовыгодных отношений.

На начальном этапе перевозочного процесса ведется согласование между перевозчиком и владельцем груза по предоставлению инфраструктуры железнодорожного транспорта, подвижного

состава и других технических средств, обеспечивающих полноценное функционирование.

В большинстве случаев перевозчики и владельцы инфраструктур соответствующих видов транспорта предлагают услуги грузоотправителям по обеспечению доставки грузов, хранению и последующему транспортированию. Отдельно предлагают транспортно-экспедиционные услуги, тогда заключается договор на транспортно-экспедиционное обслуживание.

Все операции, связанные с организацией перевозочного процесса, должны осуществляться последовательно. Взаимодействие перевозчиков с представителями других видов транспорта должно регулироваться на основании поступления заявок от грузоотправителей, в которых указываются планируемый период, количество вагонов, станции и дороги назначения. Все зависит от конкретных объемов и видов грузов. Характер перевозки определяет как перевозчик, так и владелец инфраструктуры. Для рационального использования подвижного состава необходимо подбирать универсальные средства для дальнейшей взаимозаменяемости. К примеру, использование универсального подвижного состава приводит к исключению порожнего пробега, что немаловажно в транспортной траектории. В перевозочном процессе необходимо использовать новые цифровые технологии, которые позволят в дальнейшем совершенствовать работу по рациональному использованию транспортных средств, складских устройств и своевременных доставки и транспортировки. Для грузоотправителей в качестве дополнительной услуги возможна разработка схемы размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах. Все это производится индивидуально — в зависимости от конкретного груза и объемов его перевозки.

Работе грузовых районов и грузовых дворов станций необходимо уделять особое внимание с учетом новых технологий организации работы.

Возможно создание единой технологии работы взаимодействия станций, железнодорожных путей необщего пользования в условиях цифровых технологий. Перевозочный процесс требует постоянного развития и совершенствования. Использование новых методов организации работы позволит ускорить большинство процессов, требующих значительных перемен.

Работники, осуществляющие основную деятельность на складах различных комплексов, должны соответствовать требованиям, соответствующим условиям перевозочного процесса, — повышать квалификацию, проходить стажировку для дальнейшего совершенствования инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Развитие грузовых устройств, их оснащение в условиях цифровизации играет значительную роль. Создание цифровых платформ, открытых площадок, крытых складов, которые будут оснащены специальными устройствами и оборудованием, обеспечит процесс ускоренного выполнения операций. Программное обеспечение должно соответствовать всем требованиям современных технологий. Оформление документов, применение новых устройств пломбирования вагонов, контейнеров, крепление грузов, размещение повагонных отправок в крытых вагонах с использованием поддонов — все это позволит усовершенствовать организацию и технологию работы станций, ускорить процессы, связанные с отправлением грузов, хранением и доставкой.

Следовательно, информационный аспект, оптимизируя работу грузовых районов за счет внедрения средств информатизации и автоматизации, при взаимодействии с другими аспектами создает экономический эффект.

При этом экономический эффект может быть лишь косвенным, так как внедренные средства информатизации и автоматизации не являются прямым источником дохода, а являются вспомогательным средством, минимизирующим затраты.

Библиографический список

1. Харитонов Д. М. Определение оптимального места расположения распределительных центров / Д. М. Харитонов // Наука в современном мире: приоритеты развития. — 2019. — № 1(5). — С. 124–129.
2. Demirel T. Multi-criteria warehouse location selection using Choquet integral / T. Demirel, N. Ç. Demirel, C. Kahraman // Expert Systems with Applications. — May 2010. — Vol. 37. — Iss. 5. — Pp. 3943–3952.
3. Кусраева Р. Ю. Выбор местоположения склада с помощью метода анализа иерархий / Р. Ю. Кусраева // Евразийское Научное Объединение. — 2017. — Т. 2. — № 6(28). — С. 122–128.
4. Chislov O. N. Methods of Analytical Modeling the Process of Freight Transportation Management in the Regional Transport Complex / O. N. Chislov, V. M. Zadorozhnyi, V. A. Bogachev et al. // Decision Support Methods in Modern Transportation Systems and Networks, Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, 2021. — Pp. 197–210. — DOI: 10.1007/978-3-030-71771-1_13.
5. Chislov O. N. Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation system / O. N. Chislov, V. Bogachev, V. Zadorozhnyi et al. // Transport Problems, SUT. — 2021. — Vol. 16. — Iss. 2. — Pp. 141–152. — DOI: 10.21307/tp-2021-031.
6. Chislov O. N. Modelling of the rail freight traffic by the methods of economic-geographical delimitation in the region of the south-easter coast of the Baltic sea / O. N. Chislov, V. A. Bogachev, V. M. Zadorozhnyi et al. // Transport Problems, SUT. — 2019. — Vol. 14. — Iss. 2. — Pp. 77–87. — DOI: 10.20858/tp. 2019.14.2.7.
7. Числов О. Н. Конфигурирование терминально-складской инфраструктуры транспортного узла на основе развития метода экономико-географического разграничения грузопотоков / О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. В. Трапенов и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 800–811. — DOI: 10.20295/1815-588X2022-4-800-811.
8. Числов О. Н. Железнодорожные узлы: схемные решения, транспортная работа и их оценка: монография /

О. Н. Числов, В. В. Хан, В. М. Задорожний и др. // ФГБОУ ВО «Рост. гос. ун-т путей сообщения». — Ростов-на-Дону, 2016. — 229 с.

9. Магомедова Н. М. Современные подходы обслуживания клиентов в перевозочном процессе / Н. М. Магомедова, Е. Е. Мизгирева // Альманах мировой науки. — М.: АР-Консалт, 2021. — № 3(46). — С. 9–11.

10. Магомедова Н. М. Грузовые перевозки одна из составляющих перевозочного процесса / Н. М. Магомедова, В. В. Трапенов, Г. А. Ковалев // Сб. науч. трудов «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России»

(«ТрансПромЭк-2019»). Том 2. Технические, экономические, естественные и гуманитарные науки. — Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т путей сообщения, 2019. — С. 71–74.

Дата поступления: 05.06.2023

Решение о публикации: 07.08.2023

Контактная информация:

МАГОМЕДОВА Наталья Мусаевна — канд. экон. наук, доц.; nata-vesna333@yandex.ru

ХАН Владимир Васильевич — канд. техн. наук, доц.; 1010900@mail.ru

Actual Issues in Cargo and Commercial Work at Railway Stations

N. M. Magomedova, V. V. Khan

Rostov State Transport University (RSTU), 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

For citation: Magomedova N. M., Khan V. V. Actual Issues in Cargo and Commercial Work at Railway Stations // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 544–553. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-544-553

Summary

Purpose: To consider the issue of interaction between carriers and counterparties using new approaches aimed at attracting customers to the transport services market, with the creation of a single mechanism based on digitalization. **Methods:** A number of works explore the issues of the location of warehouse areas. In them, the task is solved by various methods, such as the heuristic definition of the “center of gravity” for enterprises, the multi-criteria Choquet integral, the method of hierarchy analysis consisting in pairwise comparisons, as well as the author’s methods of economic and geographical modeling of transport systems, reflecting the geometric idea of the approach in transport and logistics research with the differentiation of “areas of influence”. **Results:** The necessity of creating a single mechanism of interaction between the carrier and the counterparty is indicated. The implementation of the set aspects is played by the nature of transportation, taking into account the nomenclature of goods. Preference should be directed to mass categories. In solving the set goals, it is possible to use the method of linear programming (equality). The necessity of conducting an additional study of the conjuncture of an economic entity has been identified. **Practical significance:** The necessity of creating a single digital platform for interaction of participants in the transportation process is shown, the implementation of which will speed up the process of solving problems aimed at using new tools that contribute to improving the work of an economic entity. The presented schemes of the location of warehouses can be recommended for practical use.

Keywords: Warehouse logistics, infrastructure, station, cargo warehouse, transport, outsourcer.

References

1. Kharitonov D. M. Opredelenie optimal'nogo mesta raspolozheniya raspredelitel'nykh tsentrov / D. M. Kharitonov [Determination of the optimal location of distribution centers]. *Nauka v sovremennom mire: priority razvitiya* [Science in the modern world: development priorities]. 2019, Iss. 1(5), pp. 124–129. (In Russian)
2. Demirel T., Demirel N. Ç., Kahraman C. Multi-criteria warehouse location selection using Choquet integral. *Expert Systems with Applications*. May 2010, vol. 37, Iss. 5, pp. 3943–3952.
3. Kusraeva R. Yu. Vybory mestopolozheniya sklada s pomoshch'yu metoda analiza ierarkhiy [Choosing a warehouse location using the hierarchy analysis method]. *Evraziyskoe Nauchnoe Ob"edinenie* [Eurasian Scientific Association]. 2017, vol. 2, Iss. 6(28), pp. 122–128. (In Russian)
4. Chislov O. N., Zadorozhniy V. M., Bogachev V. A. et al. Methods of Analytical Modeling the Process of Freight Transportation Management in the Regional Transport Complex. *Decision Support Methods in Modern Transportation Systems and Networks*, Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, 2021, pp. 197–210. DOI: 10.1007/978-3-030-71771-1_13.
5. Chislov O. N., Bogachev V., Zadorozhniy V. et al. Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation system. *Transport Problems, SUT*, 2021, vol. 16, Iss. 2, pp. 141–152. DOI: 10.21307/tp-2021-031.
6. Chislov O. N., Bogachev V. A., Zadorozhniy V. M. et al. Modelling of the rail freight traffic by the methods of economic-geographical delimitation in the region of the south-easter coast of the Baltic sea. *Transport Problems, SUT*, 2019, vol. 14, Iss. 2, pp. 77–87. DOI: 10.20858/tp.2019.14.2.7.
7. Chislov O. N., Bogachev V. A., Trapeznov V. V. Konfigurirovanie terminal'no-skladskoy infrastruktury transportnogo uzla na osnove razvitiya metoda ekonomiko-geograficheskogo razgranicheniya gruzopotokov [Configuring the terminal and warehouse infrastructure of a transport hub based on the development of the method of economic and geographical differentiation of cargo flows]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2022, vol. 19, Iss. 4, pp. 800–811. DOI: 10.20295/1815-588X2022-4-800-811. (In Russian)
8. Chislov O. N., Khan V. V., Zadorozhniy V. M. et al. *Zheleznodorozhnye uzly: skhemnye resheniya, transportnaya rabota i ikh otsenka: monografiya* [Railway junctions: circuit solutions, transport work and their assessment: monograph]. FGBOU VO “Rost. gos. un-t putey soobshcheniya”, Rostov-on-Don, 2016, 229 p. (In Russian)
9. Magomedova N. M., Mizgireva E. E. Sovremennye podkhody obsluzhivaniya klientov v perevozhnom protsesse [Modern approaches to customer service in the transportation process]. *Al'manakh mirovoy nauki* [Almanac of world science]. Moscow: AR-Konsalt Publ., 2021, Iss. 3(46), pp. 9–11. (In Russian)
10. Magomedova N. M., Trapeznov V. V., Kovalev G. A. Gruzovye perevozki odna iz sostavlyayushchikh perevozhnogo protsessa [Freight transportation is one of the components of the transportation process]. *Sb. nauch. trudov “Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya transporta, promyshlennosti i ekonomiki Rossii” (“TransPromEk-2019”). Tom 2. Tekhnicheskieskie, ekonomicheskieskie, estestvennyye i gumanitarnyye nauki* [Sat. scientific works “Actual problems and prospects for the development of transport, industry and the economy of Russia” (“TransPromEk-2019”). Vol. 2. Technical, economic, natural and human sciences]. Rostov-on-Don: Rost. gos. un-t putey soobshcheniya Publ., 2019, pp. 71–74. (In Russian)

Received: June 05, 2023

Accepted: August 07, 2023

Author's information:

Natalia M. MAGOMEDOVA — PhD in Economics, Associate Professor; nata-vesna333@yandex.ru;
Vladimir V. KHAN — PdD in Engineering, Associate Professor; 1010900@mail.ru

УДК 656.27

Методика повышения эффективности эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий на основе логистического подхода

К. Е. Ковалев¹, И. Л. Сакович², А. В. Новичихин¹

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

²Октябрьская железная дорога — филиал ОАО «Российские железные дороги», Российская Федерация, 191023, Санкт-Петербург, пл. Островского, 2

Для цитирования: Ковалев К. Е., Сакович И. Л., Новичихин А. В. Методика повышения эффективности эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий на основе логистического подхода // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 554–567. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-554-567

Аннотация

Цель: Разработка методики повышения эффективности эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий на основе использования комплекса инструментов планирования и оптимизации процессов функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий. **Методы:** Применены методы анализа и синтеза, линейного и динамического программирования. **Результаты:** Разработана методика повышения эффективности эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий на основе логистического подхода с оценкой транспортного потенциала линии и моделированием комплекса мероприятий по повышению эффективности их работы. **Практическая значимость:** Разработанная методика рекомендована для использования при составлении планов работы по повышению эффективности эксплуатации малоинтенсивных линий. Методика позволяет определить потенциал малоинтенсивных железнодорожных линий для грузовых и пассажирских перевозок, выбрать оптимальные сценарии функционирования по повышению эффективности работы линий при ограничении бюджета на их реализацию.

Ключевые слова: Железнодорожный транспорт, малоинтенсивные железнодорожные линии, логистический подход, грузопотоки.

Введение

Существующая методика планирования работы малоинтенсивных железнодорожных линий предполагает четыре сценария функционирования, к которым относятся: поиск грузовой базы; передача другим собственникам; закрытие; консервирование.

Анализ опыта функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий свидетельствует об убыточности и некупаемости функционирования ряда линий. При этом сценарий поиска грузовой базы реализуется в недостаточ-

ной степени и требует доработки в части поиска скрытого спроса на перевозки по таким линиям и разработки системы скидок на перевозки, способствующие привлечению грузовой базы. Сценарии закрытия и консервирования линий дают экономический эффект на короткий горизонт планирования, а на долгосрочный — приводят к затруднениям в перевозочной деятельности.

Исследование деятельности малоинтенсивных железнодорожных линий имеет несколько актуальных научных аспектов, к которым относятся: высокая значимость в транспортной инфраструк-

туре, особенно в регионах с низким пассажиропотоком и грузопотоком; значимость для устойчивого развития регионов, в которых расположены железнодорожные линии; использование новых экономически выгодных методов обслуживания линий, обеспечивающих безопасность, надежность и эффективность эксплуатации.

Исследование функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий способствует разработке новых технологий, методов и подходов к проектированию, строительству и управлению железнодорожными системами.

Таким образом, актуальной научной задачей является разработка методики повышения эффективности эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий на основе логистического подхода с использованием инструментов планирования.

1. Реализуемая программа повышения эффективности эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий

Повышение эффективности эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий (МИЛ) является сложно структурированной задачей. Экономически целесообразно убыточные линии консервировать или закрыть, но они имеют важное социальное и политическое значение.

Планирование работы МИЛ во многом определяется финансовым результатом эксплуатации линии. Под финансовым результатом понимается соотношение затрат на организацию перевозочной деятельности и содержание инфраструктуры к получаемому доходу от перевозочной деятельности.

К основным параметрам, характеризующим финансовый результат линии, относятся размеры грузовых, пассажирских, пригородных поездов, грузонапряженность, количество местных вагонов, количество работников различных служб.

На основе долгосрочных программ развития железнодорожного транспорта [1–3] основным направлением развития для МИЛ является повышение их экономической эффективности эксплуатации, достижение которой обеспечивается за счет комплекса мероприятий по увеличению доходности МИЛ.

Основными этапами существующего подхода к управлению МИЛ являются: 1) типизация линий по условиям работы и выполняемым функциям; 2) группировка линий по принципу финансового результата; 3) разработка предложений и мероприятий по сокращению расходов; 4) разработка мероприятий по увеличению доходов от эксплуатации линий.

Программа повышения эффективности эксплуатации МИЛ включает в себя типизацию линий по назначению и видам сообщения [4]. Структурная схема программы повышения эффективности эксплуатации МИЛ представлена на рис. 1.

В пассажирских перевозках основными статьями дохода являются: 1) организация перевозочного процесса; 2) предоставление услуг инфраструктуры.

По финансовому результату МИЛ можно классифицировать на следующие:

1. Убыточные (не менее 2 лет отрицательный финансовый результат).
2. Переменные показатели прибыли (два смежных календарных периода или в связи с потерей грузопотока или пассажиропотока).
3. Доходные (более 2 лет).

В зависимости от финансового результата для убыточных и линий с переменным показателем прибыли разрабатывается два комплекса мероприятий по повышению их доходности.

Первый комплекс мероприятий ориентирован на увеличение доходности и включает: увеличение грузовой базы с учетом существующих мощностей предприятий [5]; увеличение грузовой

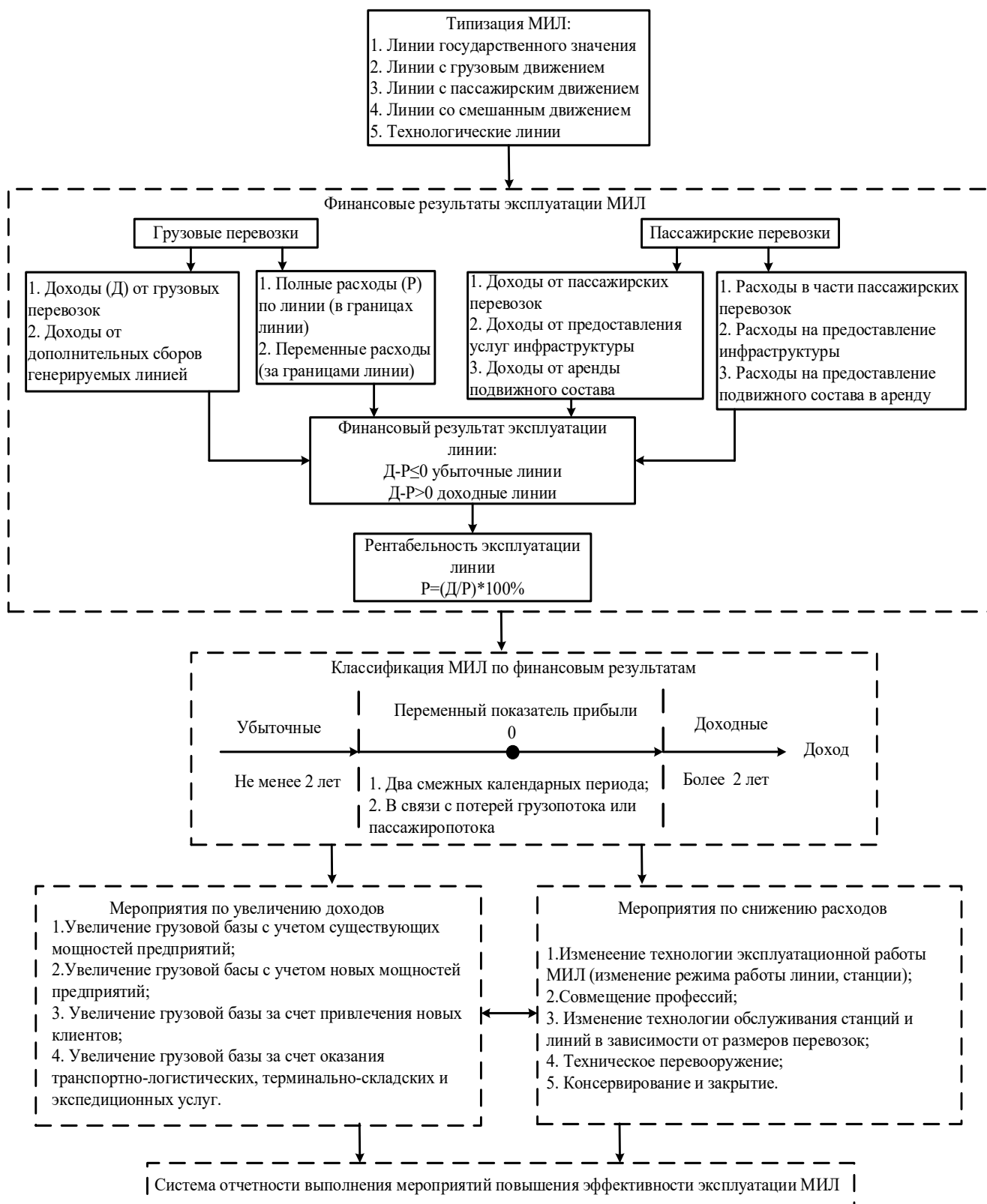


Рис. 1. Структурная схема реализуемой программы повышения эффективности эксплуатации МИЛ на сети ОАО «РЖД» в современных условиях

базы с учетом новых мощностей предприятий [6]; увеличение грузовой базы за счет привлечения новых клиентов; увеличение грузовой базы за счет оказания транспортно-логистических, терминально-складских и экспедиционных услуг.

Второй комплекс мероприятий направлен на снижение расходов: изменение технологии эксплуатационной работы МИЛ (изменение режима работы линии, станции) [7]; совмещение профессий [8]; изменение технологии обслуживания станций и линий в зависимости от размеров перевозок; техническое перевооружение [9, 10]; консервирование и закрытие участков МИЛ.

Финансовый результат эксплуатации МИЛ характеризуется грузовыми и пассажирскими перевозками, в которых выделены статьи доходов и расходов. В грузовых перевозках выделены доходы, получаемые на основании тарифов и дополнительных сборов [11]. Расходы линии делятся на полные (в границах линии) и переменные (за границами линии). Техничко-экономическое обоснование первого и второго комплексов мероприятий позволяет оценить финансовые результаты линии для дальнейшей корректировки мероприятий.

Несмотря на то, что реализуемая программа повышения эффективности эксплуатации МИЛ имеет преимущества перед предшествующими и эффективна, она имеет ряд недостатков, к которым относятся: 1) значительные финансовые вложения в поддержание и обновление инфраструктуры, техническое оснащение и обучение персонала; 2) сложность оценки эффективности реализуемой программы; 3) наличие противоречивых приоритетов у структурных подразделений, обслуживающих линию; 4) ограниченность в ресурсах; 5) отсутствие логистического подхода к эксплуатации МИЛ, основанного на базах данных ГИС для анализа пространственной структуры потоков и определения оптимальных маршрутов для перенаправления грузов и пассажиров [12].

Указанные недостатки также определяют актуальность разработки методики повышения эффективности эксплуатации МИЛ на основе логистического подхода.

2. Логистический подход к повышению эффективности эксплуатации МИЛ

Логистический подход основан на формировании системы управления МИЛ, включающей в себя комплекс механизмов диагностики, планирования, стимулирования и контроля. Механизмы управления формируются на основе принципов, процедур и моделей, позволяющих вырабатывать оптимизационные управляющие решения для повышения эффективности функционирования МИЛ.

Предлагаемый логистический подход к повышению эффективности эксплуатации МИЛ основан на данных об имеющихся параметрах МИЛ, к которым относятся: эксплуатационная длина, система СЦБ, размеры движения, грузонапряженность, количество вагонов под грузовыми операциями, количество пассажиров, количество работников по службам, расходы по службам и другие параметры.

Перечисленные параметры являются исходными данными для процедуры диагностики функционирования МИЛ. На основе результатов диагностики [13–15] формируются целевые показатели на предстоящий период работы МИЛ, к которым относятся финансовый результат эксплуатации и оценка значимости транспортного потенциала МИЛ, формируемая на основании матрицы существующих и перспективных пассажиропотоков и грузопотоков.

Оценка значимости транспортного потенциала позволяет наиболее точно осуществлять среднесрочное планирование параметров функционирования МИЛ и дать оценку возможности выполнения показателей на плановый период.

При необходимости корректировки целевых показателей работы МИЛ применяется модель-

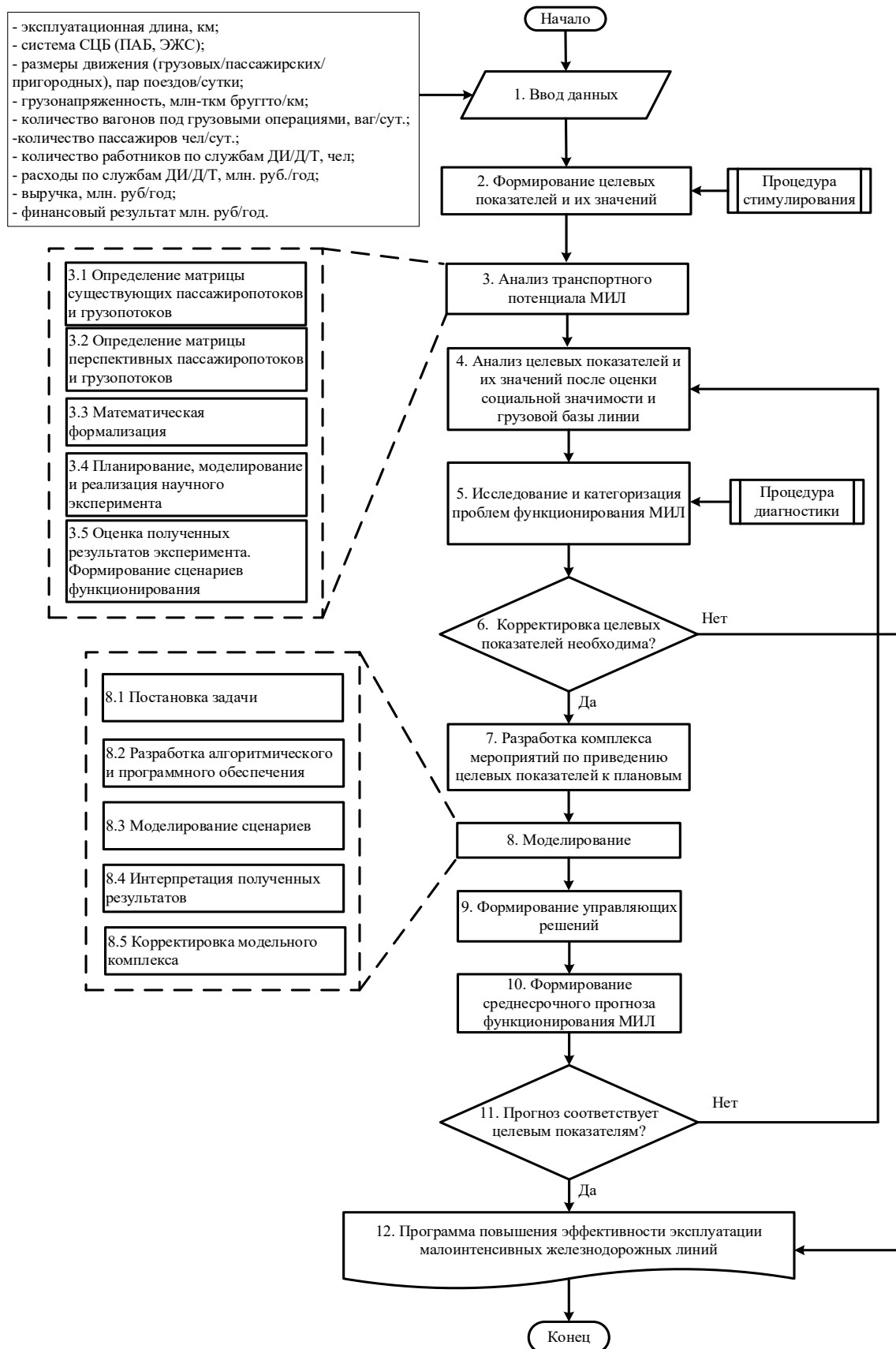


Рис. 2. Процедура планирования работы МИЛ на основе логистического подхода

ный комплекс для анализа реализации возможных сценариев и формирования программы повышения эффективности функционирования МИЛ. Предлагаемая методика реализуется на основе процедуры планирования работы МИЛ (рис. 2).

3. Анализ транспортного потенциала МИЛ

Важным элементом предлагаемой методики является оценка транспортного потенциала МИЛ, которая позволяет определить степень существующей и перспективной востребованности линии.

Рассмотрим реализацию блока на примере. Пусть имеется убыточная МИЛ на участке А — Б (рис. 3), на которой размеры движения не более 8 пар поездов в сутки. При этом имеются пункты (Π_i) на удалении от МИЛ, в которых есть перспективный грузопоток или пассажиропоток.

Необходимо определить такие населенные пункты Π_r , с которыми целесообразно наладить железнодорожное сообщение в части увеличения грузовой базы с учетом существующих и новых мощностей предприятий, привлечения новых клиентов или оказания транспортно-логистических, терминально-складских или экспедиционных услуг. При этом имеется ряд накладываемых ограничений, к которым относятся ограниченный размер финансирования, фиксированные размеры расходных ставок и тарифов.

Задача оценки транспортного потенциала МИЛ формализована с помощью метода линей-

ного программирования, который заключается в минимизации линейной функции от нескольких переменных, при условии, что эти переменные удовлетворяют ограничениям. Определяется вектор значений переменных, который оптимизирует целевую функцию и при этом удовлетворяет всем ограничениям.

К недостаткам математического метода линейного программирования, применяемого в существующих условиях, относятся: применение только для линейных задач оптимизации, что ограничивает его применимость в тех случаях, когда нелинейные или дискретные факторы также влияют на оптимальное решение; трудоемкость решения при большом количестве переменных; высокая чувствительность модели к входным данным; трудоемкость интерпретации и достоверности полученных результатов.

В связи с перечисленными недостатками данный метод применяется для среднесрочного (3–5 лет) и краткосрочного (1 год) горизонта планирования мероприятий повышения эффективности эксплуатации работы МИЛ. Рядом с МИЛ имеются населенные пункты Π_r , имеющие расчетные пассажиропотоки и грузопотоки, приведенные в табл. 1, 2.

Также известно расстояние Π_i от МИЛ (табл. 3) и расстояния между населенными пунктами по железной дороге (табл. 4).

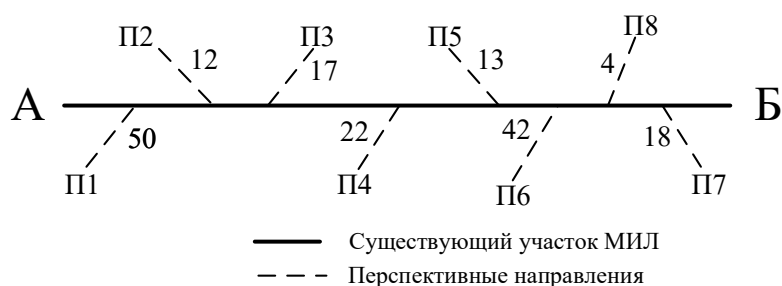


Рис. 3. Существующий участок МИЛ (А — Б) и перспективные направления с грузовой и пассажирской базой

ТАБЛИЦА 1. Грузопотоки между населенными пунктами, тыс. т/год

Населенные пункты	А	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	Б
А	0	0,2	0,2	6	0	0	1	6	1	1
П1	1	0	0,7	2	2	3	0,5	11	12	3
П2	0,6	0,7	0	2	5	0	4	0,4	1	0
П3	7	0,2	0,11	0	0,22	3	0	1	3	0
П4	2	0,2	0,5	12	0	1	0	5	0	0
П5	3	0,7	0,18	2	0,11	0	0	13	0	6
П6	4	0,6	0,20	0	0	11	0	3	4	7
П7	2	0,7	0,17	6	0,14	3	0	0	2	6
П8	8	0,9	0,18	7	3	5	0	3	0	4
Б	2	0,7	0,3	5	6	6	5	0	1	0

ТАБЛИЦА 2. Пассажиропотоки между населенными пунктами, тыс. пасс/год

Населенные пункты	А	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	Б
А	0	1	1	0	0	0,4	0,6	2	6	1
П1	0	0	3	17	12	7	1	12	2	0,4
П2	0,6	1	0	1	4	1	4	5	13	0,2
П3	0	7	0	0	8	6	1	22	0	0,4
П4	0,6	9	5	2	0	2	5	5	2	0,2
П5	0	6	2	12	11	0	3	3	1	0,4
П6	2	7	4	0	11	3	0	12	1	2
П7	0,2	2	9	1	4	1	12	0	3	0,4
П8	0,5	3	2	13	5	12	4	0	0	1
Б	0,5	0	0	1	0,6	0,2	0,8	2	3	0

ТАБЛИЦА 3. Удаленность населенных пунктов P_i от МИЛ, км

Населенные пункты	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8
Расстояние, км	50	12	17	22	13	42	18	4

ТАБЛИЦА 4. Расстояния между населенными пунктами P_p , км

Населенные пункты	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8
Расстояние, км	17	22	37	40	43	53	68	74

Постановка задачи

Пусть необходимо определить такие возможные населенные пункты x_{1z} , имеющие транспортную связь x_{2z} , места зарождения грузопотоков и заявки на перевозки x_{3g} и пассажиропотоки x_{4p} , при установленной ставке формирования пассажирского x_{5cgp} и грузового x_{6cgp} поезда и стоимости содержания инфраструктуры $x_{7T.RK}$, с которыми целесо-

образно организовать железнодорожное сообщение $f(x)$, при этом населенные пункты расположены на расстоянии l от существующей МИЛ.

Целевая функция имеет вид (1):

$$f(x) = f(x_{1z} + x_{2z} + x_{3g} + x_{4p} + x_{5cgp} + x_{6cgp} + x_{7(-T.RK)}) \rightarrow \min. \quad (1)$$

При системе ограничений:

$$\begin{cases} pp \leq 16; \\ gp \leq 16; \\ g \leq G; \\ p \leq P; \\ z \leq 1. \end{cases}$$

$$\begin{cases} Z(i, j) + Z(j, i) - z(i) - z(j) = 0; \\ Z(i, j) - Z(j, i) = 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} g - gp \cdot gpMax \leq 0; \\ p - pp \cdot ppMax \leq 0; \\ g(i, j) - Z(i, j) \cdot G(i, j) \leq 0; \\ p(i, j) - Z(i, j) \cdot P(i, j) \leq 0. \end{cases}$$

где x_{1z} — населенные пункты;
 x_{2z} — транспортные связи;
 x_{3g} — грузопотоки;
 x_{4p} — пассажиропотоки;
 x_{5cgp} — средняя тарифная ставка формирования пассажирского поезда;
 x_{6cpp} — средняя тарифная ставка формирования грузового поезда;
 $x_{7(-T.RK)}$ — затраты на содержание инфраструктуры;
 pp — количество пассажирских поездов;
 gp — количество грузовых поездов;
 G — спрос на грузовые перевозки;
 P — спрос на пассажирские перевозки;
 $gpMax$ — максимальная реализуемая пропускная способность в грузовом движении;
 $ppMax$ — максимальная реализуемая пропускная способность в пассажирском сообщении.
 Формализация решаемой задачи со стороны перевозчика состоит в том, что количество грузовых (gp) и пассажирских (pp) поездов не превышает установленных размеров на МИЛ (не более 8 пар поездов в сутки). Грузопоток и пассажиропоток не превышает или равен спросу на пассажирские (P) и грузовые (G) перевозки. Максимальная пропускная способность участка

для грузовых ($gpMax$) и пассажирских поездов ($ppMax$) больше нуля. Грузопоток g и пассажиропоток p между пунктами больше или равен нулю.

Стоимость организации железнодорожного сообщения при увеличении грузовой базы с учетом существующих и новых мощностей предприятий, за счет привлечения новых клиентов или за счет оказания транспортно-логистических, терминально-складских и экспедиционных услуг, состоит из суммы стоимости строительства ответвления RS и содержания ответвления Π , железной дороги RL с учетом горизонта планирования T . Доход от грузопотока g равен тарифной стоимости перевозки одной тонны грузов CGL . Доход от пассажиропотока p равен тарифной стоимости перевозки одного пассажира CPL .

Поставленная задача решена с использованием пакета визуального блочного имитационного моделирования MATLAB Simulink 7 матричной системы MATLAB R2021a (рис. 4).

При заданных параметрах целевой функции и ограничениях установлено, что при наличии грузопотока в населенный пункт П6 в размере 4000 тонн в год и пассажиропотока 3000 пассажиров/год, на расстоянии до МИЛ 42 километра, целесообразно проводить работу по увеличению грузовой базы. Результаты вычислений приведены в табл. 5, в тех случаях, когда $f(x_{opt}) > 0$, целесообразно организовать перевозочный процесс, если $f(x_{opt}) < 0$, то организовывать перевозочный процесс нецелесообразно.

Анализ транспортного потенциала МИЛ позволяет выявлять перспективные населенные пункты, с которыми целесообразно организовать железнодорожное сообщение с учетом существующих и новых мощностей предприятий, оказания транспортно-логистических, терминально-складских или экспедиционных услуг. Проведение анализа транспортного потенциала целесообразно проводить регулярно при формировании системы отчетности реализуемых мероприятий по повышению

```

189     %g(i,j) - Z(i,j)*G(i,j) <= 0
190     cnt = 3;
191     for i = 1:8
192         for j = 1:8
193             if (i ~= j)
194                 g = zeros(8,8);
195                 Z = zeros(8,8);
196                 g(i,j) = 1;
197                 Z(i,j) = -T*G(i,j);
198                 A(cnt,:) = [zeros(1,8), Z(:)'; g(:)', zeros(1,64), 0, 0, 0];
199                 cnt = cnt + 1;
200             end
201         end
202     end
203
204     %p(i,j) - Z(i,j)*P(i,j) <= 0
205     for i = 1:8
206         for j = 1:8
207             if (i ~= j)
208                 p = zeros(8,8);
209                 Z = zeros(8,8);
210                 p(i,j) = 1;
211                 Z(i,j) = -T*P(i,j);
212                 A(cnt,:) = [zeros(1,8), Z(:)'; zeros(1,64), p(:)', 0, 0, 0];
213                 cnt = cnt + 1;
214             end
215         end
216     end

```

Рис. 4. Фрагмент программного кода модели, разработанной в MATLAB Simulink 7

эффективности эксплуатации МИЛ для формирования встречных предложений по организации перевозочного процесса с грузовладельцами.

4. Моделирование комплекса мероприятий по повышению доходности МИЛ

Одним из блоков предлагаемой методики планирования функционирования МИЛ на основе логистического подхода (рис. 2) является моделирование комплекса мероприятий по повышению доходности МИЛ при имеющемся ограничении бюджета.

Пусть имеется N возможных мероприятий по повышению доходов МИЛ и снижению эксплуатационных расходов. Имеется ограниченный бюджет W на реализацию комплекса мероприятий. Набор положительных эффектов

$w = \{w_1, w_2 \dots w_N\}$, соответствующий выбранным мероприятиям из комплекса, и затраты на реализацию каждого мероприятия $p = \{p_1, p_2 \dots p_N\}$ были определены с помощью экспертных оценок. Требуется найти набор величин $B = \{b_1, b_2 \dots b_N\}$, где $b_i = 1$ — если мероприятие n_i включено в набор, $b_i = 0$ — если мероприятие n_i не включено. Целевая функция имеет вид:

$$b_1 p_1 + \dots + b_N p_N \rightarrow \max. \quad (2)$$

При этом имеется ограничение:

$$b_1 w_1 + \dots + b_N w_N \leq W.$$

Исходные данные для вычислений представлены в табл. 6.

Производится условная оптимизация без ограничений на количество выбранных мероприятий:

$$f_1(L) = \max(0, 5x_1); 0 < x_1 < 1;$$

$$f_2(L) = \max[0, 2x_2 + f_1(L - 0,1x_2)];$$

$$0 < x_2 < 1;$$

$$f_3(L) = \max[0, 45x_3 + f_2(L - 0,12x_3)];$$

$$0 < x_3 < 1;$$

$$f_4(L) = \max[0, 52x_4 + f_3(L - 0,12x_4)];$$

$$0 < x_4 < 1;$$

$$f_5(L) = \max[0, 7x_5 + f_4(L - 0,18x_5)];$$

$$0 < x_5 < 1;$$

$$f_6(L) = \max[0, x_6 + f_5(L - 0,05x_6)];$$

$$0 < x_6 < 1;$$

$$f_7(L) = \max[0, 1x_7 + f_6(L - 0,05x_7)];$$

$$0 < x_7 < 1;$$

$$f_8(L) = \max[0, 45x_8 + f_7(L - 0,12x_8)];$$

$$0 < x_8 < 1;$$

$$f_9(L) = \max[0, 3x_9 + f_8(L - 0,1x_9)];$$

$$0 < x_9 < 1.$$

ТАБЛИЦА 5. Полученные результаты вычислений $f(x_{opt})$

Пункты Π_i	$f(x_{opt})$	Результат
П1	0	Нецелесообразно привлечение грузопотока и пассажиропотока
П2	0	Нецелесообразно привлечение грузопотока и пассажиропотока
П3	0	Нецелесообразно привлечение грузопотока и пассажиропотока
П4	0	Нецелесообразно привлечение грузопотока и пассажиропотока
П5	0	Нецелесообразно привлечение грузопотока и пассажиропотока
П6	1	Целесообразно привлечение грузопотока и пассажиропотока
П7	0	Нецелесообразно привлечение грузопотока и пассажиропотока
П8	0	Нецелесообразно привлечение грузопотока и пассажиропотока

ТАБЛИЦА 6. Комплекс мероприятий по повышению эффективности эксплуатации МИЛ

Мероприятия (N)	Затраты (p)	Ожидаемый мультипликативный эффект (w)	Количество проводимых мероприятий на участке
Увеличение доходности			
1. Увеличение грузовой базы с учетом существующих мощностей предприятий	0,5	0,16	1
2. Увеличение грузовой базы с учетом новых мощностей предприятий	0,2	0,1	1
3. Увеличение грузовой базы за счет привлечения новых клиентов	0,45	0,12	1
4. Увеличение грузовой базы за счет оказания транспортно-логистических, терминально-складских и экспедиционных услуг	0,52	0,12	1
Снижение расходов			
1. Изменение технологии эксплуатационной работы МИЛ (изменение режима работы линии, станции)	0,7	0,18	1
2. Совмещение профессий	0,1	0,05	1
3. Изменение технологии обслуживания станций и линий в зависимости от размеров перевозок	0,1	0,05	1
4. Техническое перевооружение	0,45	0,12	1
5. RFID-навигации для управления движением поездов	0,3	0,10	1

ТАБЛИЦА 7. Расчет значения функции $f_9(L)$

L	0	1	2
$f_9(L)$	0	0,7	1,22
x_1	0	0	0

Фрагмент вычислений значения функции для $f_9(L)$ представлен в табл. 7.

Установлено, что максимальный размер требуемых инвестиций $f_9(L) = 1,22$, при этом $x_1 = 0$. Из набора полученных решений исключаются решения, не удовлетворяющие ограничениям (размер финансирования). Реализация остальных мероприятий распределена следующим образом:

$$N = 2 - 0,1 \cdot 0 = 2;$$

$$f_8(2) = 1,22 \text{ достигается при } x_8 = 0;$$

$$N = 2 - 0,12 \cdot 0 = 2;$$

$$f_7(2) = 1,22 \text{ достигается при } x_7 = 0;$$

$$N = 2 - 0,05 \cdot 0 = 2;$$

$$f_6(2) = 1,22 \text{ достигается при } x_6 = 0;$$

$$N = 2 - 0,05 \cdot 0 = 2;$$

$$f_5(2) = 1,22 \text{ достигается при } x_5 = 1;$$

$$N = 2 - 0,18 \cdot 1 = 1,82;$$

$$f_4(1,82) = 0,52 \text{ достигается при } x_4 = 1;$$

$$N = 1,82 - 0,12 \cdot 1 = 1,7;$$

$$f_3(1,7) = 0,5 \text{ достигается при } x_3 = 0;$$

$$N = 1,7 - 0,12 \cdot 0 = 1,7;$$

$$f_2(1,7) = 0,5 \text{ достигается при } x_2 = 0;$$

$$N = 1,7 - 0,1 \cdot 0 = 1,7;$$

$$f_1(1,7) = 0,5 \text{ достигается при } x_1 = 1.$$

При имеющемся ограничении бюджета оптимальным вариантом, по набору критериев, реализации комплекса мероприятий по повышению доходности и снижению эксплуатационных расходов МИЛ достигается при значениях: $x_1 = 1, x_2 = 0, x_3 = 0, x_4 = 1, x_5 = 1, x_6 = 0, x_7 = 0, x_8 = 1, x_9 = 1$.

На основе результатов моделирования целесообразна реализация мероприятий увеличения грузовой базы с учетом существующих мощно-

стей предприятий ($x_1 = 1$), увеличение грузовой базы за счет оказания транспортно-логистических, терминально-складских и экспедиционных услуг ($x_4 = 1$), изменение технологии эксплуатационной работы МИЛ, изменение режима работы линии, станции ($x_5 = 1$), техническое перевооружение ($x_8 = 1$), RFID-навигации для управления движением поездов ($x_9 = 1$).

Разработанная модель по повышению доходности МИЛ позволяет формировать комплекс мероприятий, который при ограничении бюджета максимизирует финансовый результат от их реализации.

Заключение

Проведен анализ реализуемой программы повышения эффективности эксплуатации МИЛ, представлена ее структура, выявлены достоинства и недостатки.

Предложена методика повышения эффективности эксплуатации МИЛ на основе логистического подхода. Логистический подход состоит в формировании системы управления МИЛ, включающей в себя комплекс механизмов диагностики, планирования, стимулирования и контроля.

Разработана процедура планирования работы МИЛ, состоящая из инструментов анализа транспортного потенциала линии и моделирования комплекса мероприятий по повышению доходности. Анализ транспортного потенциала линии заключается в определении пунктов, с которыми целесообразно организовать транспортный процесс в части увеличения грузовой базы с учетом существующих и новых мощностей предприятий, привлечения новых клиентов или оказания транспортно-логистических, терминально-складских или экспедиционных услуг.

Комплексное применение методики повышения эффективности эксплуатации МИЛ позволит существенно улучшить финансовый результат функционирования МИЛ.

Библиографический список

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года. — Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р. — 86 с.

2. Программа инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 года. — Утверждена советом директоров ОАО «РЖД» (протокол № 13 от 24 июня 2011 г.). — М., 2011. — 63 с.

3. Распоряжение ОАО «РЖД» от 13 января 2020 г. № 28/р «Об утверждении Методики классификации и специализации железнодорожных линий ОАО «РЖД»». — Москва. — 8 с.

4. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-р. — 74 с.

5. Прошкина Е. С. Модернизация малодеятельных железнодорожных линий России и повышение эффективности их использования в пассажирском сообщении: дис. ... канд. экон. наук / Е. С. Прошкина. — М., 2008 — 160 с.

6. Вакуленко С. П. Эффективность эксплуатации и обслуживания малоинтенсивных железнодорожных линий / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евреенова и др. — М., 2018. — 218 с.

7. Кириленко О. Н. Экономическая эффективность методов эксплуатации малодеятельных линий / О. Н. Кириленко // Экономика железных дорог. — 2014. — № 8. — С. 79–85.

8. Кокурин И. М. Выбор варианта распределения функций и зон управления между оперативным персоналом технических станций на основе оценки по разнонаправленным критериям / И. М. Кокурин, К. Е. Ковалев // Вестник транспорта Поволжья. — 2015. — № 2(50). — С. 55–64.

9. Вакуленко С. П. Малодеятельные линии: состояние и варианты оптимизации / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евреенова // Мир транспорта. — 2017. — Т. 15. — № 3(70). — С. 174–180. — DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-4-1.

10. Никитин А. Б. Возможность внедрения цифровой радиосвязи и организации передачи данных между станциями на малодеятельных линиях / А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль // Автоматика на транспорте. — 2019. — Т. 5. — № 1. — С. 45–61. — DOI: 10.20295/2412-9186-2019-1-45-61.

11. Прейскурант № 10-01. Тарифы на перевозку грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами (утв. постановлением ФЭК РФ от 17 июня 2003 г. № 47-т/5). — 463 с.

12. Кычкин А. В. Программно-аппаратный комплекс для энергомониторинга с применением ГИС-технологий / А. В. Кычкин, С. А. Артемов // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 8-1. — С. 120–125.

13. Ковалев К. Е. Механизм диагностики эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий на основе нечеткого когнитивного моделирования / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин, И. Л. Сакович // Автоматика на транспорте. — 2023. — Т. 9. — № 1. — С. 72–86.

14. Ковалев К.Е., Новичихин А.В., Медведь О.А. Разработка механизмов повышения эффективности функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин, О. А. Медведь // Автоматика на транспорте. — 2022. — Т. 8. — № 2. — С. 150–161.

15. Kovalev K., Novichikhin A. Interaction of intensive and low-density lines: management approach and models / K. Kovalev, A. Novichikhin // Lecture Notes in Networks and Systems. — 2022. — Vol. 402 LNNS. — Pp. 701–709. — DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_76.

Дата поступления: 01.08.2023

Решение о публикации: 24.08.2023

Контактная информация:

КОВАЛЕВ Константин Евгеньевич — канд. техн. наук;
kovalev@pgups.ru

САКОВИЧ Игорь Леонтьевич — канд. экон. наук;
logist@pgups.ru

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — д-р техн. наук,
доц.; novichihin@bk.ru

Methodology for Improving the Efficiency of Operation of Low-Intensity Railway Lines Based on a Logistic Approach

K. E. Kovalev¹, I. L. Sakovich², A. V. Novichikhin¹

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

²Oktyabrskaya Railway — a branch of JSC “Russian Railways”, 2, Ostrovsky Sq., Saint Petersburg, 191023, Russian Federation

For citation: Kovalev K. E., Sakovich I. L., Novichikhin A. V. Methodology for Improving the Efficiency of Operation of Low-Intensity Railway Lines Based on a Logistic Approach // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 554–567. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-554-567

Summary

Purpose: It consists in developing a methodology for improving the efficiency of operation of low-intensity railway lines based on the use of a set of planning and optimization tools for the functioning of low-intensity railway lines. **Methods:** Methods of analysis and synthesis, linear and dynamic programming have been applied. **Results:** A methodology has been developed to improve the efficiency of operation of low-intensity railway lines based on a logistic approach with an assessment of the transport potential of the line and modeling a set of measures to improve the efficiency of their work. **Practical significance:** The developed methodology is recommended for use in the preparation of work plans to improve the efficiency of operation of low-intensity lines. The methodology makes it possible to determine the potential of low-intensity railway lines for freight and passenger traffic, to select optimal operating scenarios to improve the efficiency of the lines while limiting the budget for their implementation.

Keywords: Railway transport, low-intensity railway lines, logistics approach, cargo flows.

References

1. *Strategiya razvitiya zhelezodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 17 iyunya 2008 g. № 877-r* [Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated June 17, 2008 № 877-r]. 86 p. (In Russian)

2. *Programma innovatsionnogo razvitiya OAO “Rossiyskie zheleznye dorogi” na period do 2015 goda. Utverzhdena sovetom direktorov OAO “RZhD” (protokol № 13 ot 24 iyunya 2011 g.)* [Innovative development program of JSC Russian Railways for the period up to 2015 Approved by the Board of Directors of JSC Russian Railways (Minutes № 13 dated June 24, 2011)]. Moscow, 2011, 63 p. (In Russian)

3. *Rasporyazhenie OAO “RZhD” ot 13 yanvarya 2020 g. № 28/r “Ob utverzhenii Metodiki klassifikatsii i*

spetsializatsii zhelezodorozhnykh liniy OAO “RZhD” [Order of Russian Railways dated January 13, 2020 № 28/r “On Approval of the Methodology for Classification and Specialization of Railway Lines of Russian Railways”]. Moscow, 8 p. (In Russian)

4. *Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo aktsionernogo obshchestva “Rossiyskie zheleznye dorogi” do 2025 goda rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 19 marta 2019 g. № 466-r* [Long-term development program of the open joint-stock company “Russian Railways” until 2025 by order of the Government of the Russian Federation dated March 19, 2019 № 466-r]. 74 p. (In Russian)

5. Proshkina E. S. *Modernizatsiya malodeyatel'nykh zhelezodorozhnykh liniy Rossii i povyshenie effektivnosti ikh ispol'zovaniya v passazhirskom soobshchenii: dis. ... kand. ekon. nauk* [Modernization of low-density railway lines

in Russia and increasing the efficiency of their use in passenger traffic: dis. ... cand. economy Sciences]. Moscow, 2008, 160 p. (In Russian)

6. Vakulenko S. P., Kolin A. V., Evreenova N. Yu. et al. *Effektivnost' ekspluatatsii i obsluzhivaniya malointensivnykh zheleznodorozhnykh liniy* [Efficiency of operation and maintenance of low-intensity railway lines]. Moscow, 2018, 218 p. (In Russian)

7. Kirilenko O. N. *Ekonomicheskaya effektivnost' metodov ekspluatatsii malodeyatel'nykh liniy* [Economic efficiency of operating methods for low-capacity lines]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Economics of Railways]. 2014, Iss. 8, pp. 79–85. (In Russian)

8. Kokurin I. M., Kovalev K. E. *Vybor varianta raspredeleniya funktsiy i zon upravleniya mezhdru operativnym personalom tekhnicheskikh stantsiy na osnove otsenki po raznonapravlenным kriteriyam* [Choice of the variant of distribution of functions and control zones between the operational personnel of technical stations based on assessment by multidirectional criteria]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga Region]. 2015, Iss. 2(50), pp. 55–64. (In Russian)

9. Vakulenko S. P., Kolin A. V., Evreenova N. Yu. *Malodeyatel'nye linii: sostoyanie i varianty optimizatsii* [Inactive lines: state and optimization options]. *Mir transporta* [World of transport]. 2017, vol. 15, Iss. 3(70), pp. 174–180. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-4-1. (In Russian)

10. Nikitin A. B., Kushpil I. V. *Vozmozhnost' vnedreniya tsifrovoy radiosvyazi i organizatsii peredachi dannykh mezhdru stantsiyami na malodeyatel'nykh liniyakh* [The possibility of introducing digital radio communication and organizing data transmission between stations on low-density lines]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2019, vol. 5, Iss. 1, pp. 45–61. DOI: 10.20295/2412-9186-2019-1-45-61. (In Russian)

11. *Preyskurant № 10-01. Tarify na perevozku грузов i uslugi infrastruktury, vypolnyaemye rossiyskimi zheleznymi dorogami (utv. postanovleniem FEK RF ot 17 iyunya 2003*

g. № 47-t/5) [Price list № 10-01. Tariffs for the transportation of goods and infrastructure services performed by Russian railways (approved by the Decree of the FEC of the Russian Federation of June 17, 2003 № 47-t/5)]. 463 p. (In Russian)

12. Kychkin A. V., Artemov S. A. *Programmno-apparatnyy kompleks dlya energomonitoringa s primeneniem GIS-tekhnologiy* [Hardware-software complex for energy monitoring using GIS technologies]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research]. 2015, Iss. 8-1, pp. 120–125. (In Russian)

13. Kovalev K. E., Novichikhin A. V., Sakovich I. L. et al. *Mekhanizm diagnostiki ekspluatatsii malointensivnykh zheleznodorozhnykh liniy na osnove nechetkogo kognitivnogo modelirovaniya* [Mechanism for diagnosing the operation of low-intensity railway lines based on fuzzy cognitive modeling]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2023, vol. 9, Iss. 1, pp. 72–86. (In Russian)

14. Kovalev K. E., Novichikhin A. V., Medved' O. A. *Razrabotka mekhanizmov povysheniya effektivnosti funktsionirovaniya malointensivnykh zheleznodorozhnykh liniy* [Development of mechanisms for improving the efficiency of low-intensity railway lines]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2022, vol. 8, Iss. 2, pp. 150–161. (In Russian)

15. Kovalev K., Novichikhin A. *Interaction of intensive and low-density lines: management approach and models. Lecture Notes in Networks and Systems. 2022, vol. 402 LNNS, pp. 701–709. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_76.*

Received: August 01, 2023

Accepted: August 24, 2023

Author's information:

Konstantin E. KOVALEV — PhD in Engineering; kovalev@pgups.ru

Igor L. SAKOVICH — PhD in Economics; logist@pgups.ru

Alexey V. NOVICHIKHIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; novichihin@bk.ru

УДК 656

Понятие, признаки и особенности использования инновационных видов транспортно-логистических услуг

М. Ван

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

Для цитирования: Ван М. Понятие, признаки и особенности использования инновационных видов транспортно-логистических услуг // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 568–576. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-568-576

Аннотация

Цель: В научной статье представлены результаты анализа характеристики и основных тенденций при использовании инновационных технологий в формировании транспортно-логистических услуг. Актуальность исследования обусловлена этапом цифровой трансформации и развития инновационных технологий, результаты которого способствуют формированию и распространению инновационных видов транспортно-логистических услуг. **Методы:** В работе применены субъектно-объектный, структурно-функциональный подходы, методы системного анализа, приемы сравнительного анализа, статистические методы исследования. Информационная база исследования научной работы состоит из отчетов и публикаций федеральной службы государственной статистики, материалов периодических издательств и научной платформы elibrary.ru. **Результаты:** В работе рассмотрены основные факторы, стимулирующие развитие инновационных видов транспортно-логистических услуг. Определены их характеристика и особенности использования. Проанализированы положительные стороны и преимущества от развития инноваций в сфере транспортной логистики. Рассмотрены основные проблемы и трудности при использовании инновационных видов транспортно-логистических услуг. Приведены примеры инновационных технологий, которые используются при совершенствовании услуг транспортной логистики. Предложен алгоритм создания технологического кластера транспортно-логистической системы в России. **Практическая значимость:** В научной статье показано, что современные компании стоят перед важностью принятия решений, направленных на совершенствование стратегического управления транспортной логистикой. Для них важны изменения, позволяющие провести оптимизацию транспортно-логистической стратегии и ориентацию на создание новых цепей поставок. Только так возможно обеспечение условий внутри организации по развитию бизнеса в период внешней турбулентности и логистического кризиса. Цифровая трансформация в транспортной логистике обеспечивает повышение экономической эффективности логистической деятельности организаций, сокращая издержки и улучшая качество услуг по управлению цепями поставок. С учетом стремительного развития высоких технологий цифровизация транспортно-логистической системы будет только ускоряться.

Ключевые слова: Транспортно-логистические услуги, транспортная логистика, инновационные технологии, инновационные транспортно-логистические услуги, инновации, цифровизация транспортной логистики, транспортно-логистическая система.

Введение

Практическая важность обеспечения конкурентоспособности предприятия в текущих условиях экономической нестабильности вынуждает разрабатывать стратегические изменения, направленные на совершенствование транспор-

тно-логистической деятельности. Данная стратегическая линия актуальна и ввиду появления новых технологий, формируемых в условиях цифровой трансформации экономики и инновационного развития рынка транспортно-логистических услуг.

Актуальность научного исследования на тему «Понятие, признаки и особенности использования инновационных видов транспортно-логистических услуг» обусловлена этапом цифровой трансформации и развития инновационных технологий, результаты которого способствуют формированию и распространению инновационных видов транспортно-логистических услуг.

По этой причине целью статьи выступает проведение анализа характеристики и основных тенденций при использовании инновационных технологий в формировании транспортно-логистических услуг.

Для этого необходимо решение следующих задач:

- рассмотреть основные факторы, стимулирующие развитие инновационных видов транспортно-логистических услуг;
- определить их характеристику и особенности использования;
- проанализировать положительные стороны и преимущества от развития инноваций в сфере транспортной логистики;
- рассмотреть основные проблемы и трудности при использовании инновационных видов транспортно-логистических услуг;
- привести примеры инновационных технологий, которые используются при совершенствовании услуг транспортной логистики;
- предложить алгоритм создания технологического кластера транспортно-логистической системы в России.

Материалы и методы

В работе применены субъектно-объектный, структурно-функциональный подходы, методы системного анализа, статистические методы исследования.

Информационная база исследования научной работы состоит из отчетов и публикаций федеральной службы государственной статистики,

материалов периодических издательств и научной платформы elibrary.ru.

Результаты и обсуждение

Многие компании выбирают логистические стратегии, которые способствуют созданию комплекса стратегических решений, приемов и планов, направленных на управление транспортной логистикой через ее цифровизацию. В 2022 году практическая роль транспортно-логистической деятельности для хозяйствующих субъектов в России и зарубежных странах крайне важна. Она обеспечивает эффективность и стабильность функционирования всех бизнес-процессов операционного цикла, начиная со снабжения производственных подразделений и заканчивая поставкой готовой продукции до торгового дистрибьютора или конечного покупателя.

И чтобы обеспечить успешное выполнение поставленных задач в рамках транспортной логистики, предприятиям необходимо преодолеть острые проблемы, такие как неоптимальное построение цепи поставок, дефицит кадров логистического менеджмента, использование устаревших технологий и транспортных средств, а также высокий износ фондов.

Практическую значимость транспортно-логистической отрасли для экономики Российской Федерации подтверждают данные из графика рис. 1, где изображена динамика грузоперевозок.

Основным транспортным средством для перевозок является автомобильный. Так, в 2020 году из 7960 млн т грузоперевозок 5405 млн т были осуществлены с помощью автомобильного транспорта.

В период санкционных ограничений 2022 года для обеспечения эффективности транспортно-логистической деятельности важными являются такие факторы внутренней среды, как стратегия компании, ее ресурсный потенциал, продуктовый портфель, рынки сбыта и основные фонды транспортно-логистической системы.

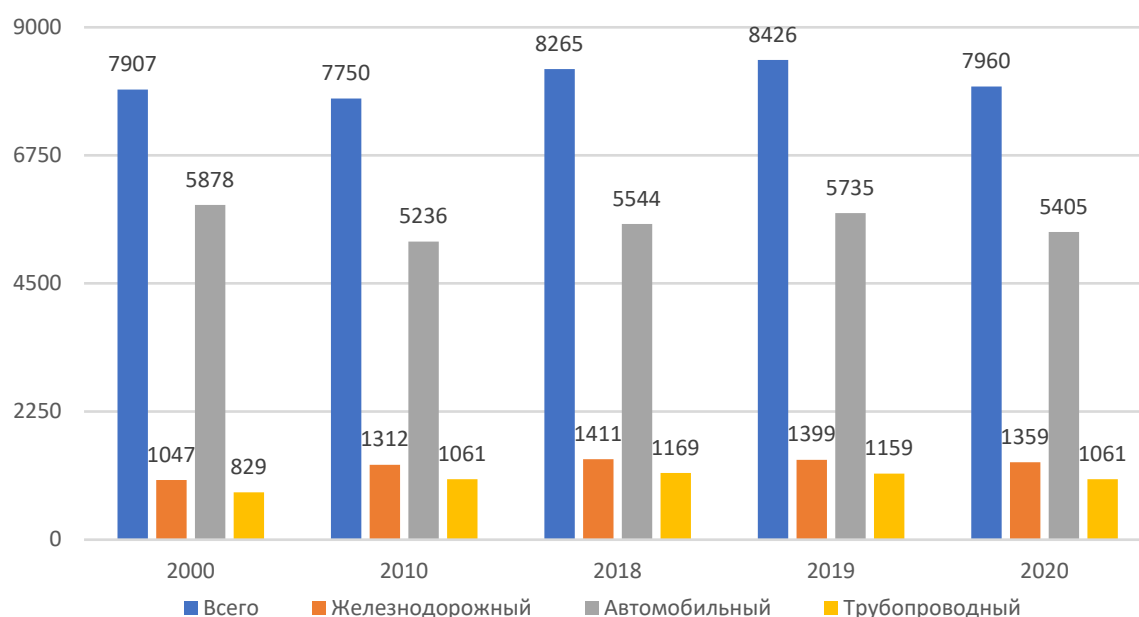


Рис. 1. Динамика объема грузовых перевозок в России, в млн тоннах [1]

К основным внешним факторам формирования транспортной логистики российских предприятий относятся макроэкономическая ситуация на рынках. Есть высокая зависимость эффективности цепочек поставок от потребительских тенденций и покупательной способности населения.

Поскольку социально-экономические индикаторы развития России в 2022 году будут подвержены негативному влиянию санкций, то покупательная способность клиентов снизится. Это требует выбора оптимальной транспортно-логистической стратегии, исходя из критерия минимума издержек и капитальных затрат.

В своей работе Сун Бинь проводит анализ влияния нового коронавируса на производственную цепочку поставок. Автор обращает внимание на то, что при выборе транспортно-логистической стратегии компании менеджмент может ориентироваться на анализ факторов внутренней и внешней среды, которые примерно в одинаковой степени оказывают воздействие на дальнейшие перспективы транспортно-логистической деятельности, и условий, направленных на эффективное выполнение функций транспортной логи-

стики [2]. Сильными сторонами данной научной работы является то, что Сун Бинь раскрывает коронавирус как важный фактор и отправную точку трансформации логистики и цепочки поставок в России. В качестве слабых сторон можно обратить внимание на узкий взгляд в отношении основных задач мониторинга устойчивости и надежности цепочки поставок. С точки зрения актуальности применения данного материала на сегодняшний день, после СВО на Украине и последствий антироссийских санкций выявлены дополнительные угрозы макросреды, которые оказывают негативное влияние на деятельность отечественных предприятия отрасли транспортно-логистических услуг.

Кроме того, Сун Бинь выделяет следующие негативные тенденции и условия внешней среды, с которыми сталкиваются предприятия:

- происходит снижение макроэкономических показателей;
- растет стоимость топливно-энергетических ресурсов на мировых рынках;
- введены новые экономические санкции и ограничения [2].

Цепочки поставок ответственны за реализацию следующих функций предпринимательской деятельности, как [3, 4]:

- реализационная политика и продажи продукции;
- закупочная деятельность и закупка необходимых товарно-материальных ценностей.

Транспортно-логистическая деятельность в условиях форс-мажорных обстоятельств имеет свою специфику [5]:

- во-первых, снижается стабильность существующих цепочек поставок, формируется необходимость их постоянно оптимизировать;
- во-вторых, меняется себестоимость транспортно-логистических услуг, из-за чего стоимость логистики увеличивается.

Российские предприятия оказываются вынуждены разрабатывать новую транспортно-логистическую стратегию и ориентироваться на новые цепи поставок. Необходимо совершенствование транспортно-логистических процессов с целью сокращения времени поставок товарно-материальных ценностей и обеспечения экономической эффективности транспортно-логистической деятельности [6].

Перспективы развития транспортной логистики формируются под воздействием цифровизации, цифровой экономики и высоких технологий на трансформационные процессы, которые актуальны в связи с уложившимся шестым технологическим укладом. Немаловажное значение имеет работа М. М. Мишкиной, сильными сторонами которой является обзор основных ошибок и неактуальных способов менеджмента в сфере транспортно-логистической деятельности. Слабыми сторонами научной работы является отсутствие выделения конкретных проблем логистической деятельности, обзор только вопроса традиционных и устаревших методологий и концепций менеджмента. Автор отмечает, что если предыдущая (третья) промышленная революция была нацелена на автоматизацию транспор-

тно-логистических процессов предприятий, то четвертая промышленная революция ставит за задачу процесс цифровизации всех бизнес-процессов и операционных систем [7].

К принципам цифровой трансформации в транспортной логистике в период шестого технологического уклада можно отнести следующие [8]:

1. Формируется возможность принятия системных автономных решений при помощи технологии искусственного интеллекта.

2. Повышается уровень функциональной совместимости между машинами, роботизированными системами, цифровыми технологиями с человеком, коммуникация которых настроена через Интернет.

3. Обеспечивается прозрачность информации и возможность цифровых технологий создавать копии физических объектов при управлении информационно-аналитическими данными транспортной логистики.

4. Совершенствование человеческой деятельности специалистов логистического менеджмента при решении высокоинтеллектуальных задач, которые не решаемы без цифровых технологий.

На основании этого мы можем сформулировать признаки инновационных видов транспортно-логистических услуг:

1. Внедрение цифровых продуктов в транспортно-логистическую услугу (не менее 20 % от всего используемого ПО).

2. Возможность использования искусственного интеллекта при работе транспортно-логистической услуги (не менее 20 % от всего используемого ПО).

Глобализация и интеграция являются основными трендами при развитии инновационных видов транспортно-логистических услуг. Инновационная транспортная логистика идет по пути повышения уровня управления транспортно-логистическими процессами в связи с применением различных технологий и инноваций, кото-

рые направлены на улучшение качества услуг, на снижение издержек и рост эффективности процессов транспортной логистики [9].

Цифровые технологии активно разрабатываются и внедряются в отрасль перевозок, что способствует снижению временных издержек. На данный момент их очень много и все они разнообразны [10].

В рамках построения новых цепей поставок многие компании России ориентируются на цифровизацию транспортной логистики, что способствует использованию инновационных видов транспортно-логистических услуг. К преимуществам цифровой трансформации транспортно-логистической деятельности стоит отнести [11]:

- автоматизацию транспортно-логистических процессов;
- оптимизацию транспортно-логистических издержек на администрирование;
- увеличение степени загруженности транспортного парка;
- улучшение экологической безопасности транспортной логистики;
- совершенствование транспортно-логистического обслуживания клиентов.

В своей работе Н.С. Громова обращает внимание на то, что внедрение инструментов цифровизации в процесс функционирования транспортно-логистических систем позволяет повысить прозрачность работы организации, открывает возможности внедрения новейших сервисов, отвечающих запросам современного общества, способствует снижению затрат в долгосрочной перспективе, унифицирует глобальные транспортно-логистические процессы [12]. Данная научная работа может использоваться в целях разработки основных направлений применения инновационных видов транспортно-логистических услуг, так как охватывает вопросы правовых, технических и социальных аспектов перехода отечественных предприятий на новые макро- и

микроусловия в сфере транспортной логистики. Слабыми сторонами работы является снижение ее актуальности ввиду того, что в 2022–2023 гг. на отечественные предприятия и их транспортно-логистическую деятельность оказывают сильное влияние политические факторы.

Инновации в управлении логистикой в транспортной системе будут способствовать ускорению работы, позволяя при этом людям сконцентрироваться на весьма важных функциях, которые связаны с принятием определенных решений, аналитикой и инновациями [13].

На сегодняшний день цифровизация транспортной логистики на территории России в первую очередь развита в крупных городах. Например, российскими предприятиями активно применяются технологии искусственного интеллекта. В.М. Какаджанов и С.С. Кудрявцева считают, что это отдельное направление развития интеллектуальной логистики, основными преимуществами которой выступают:

- повышение качества транспортно-логистического обслуживания клиентов;
- улучшение точности прогнозирования цепочек поставок, планирования транспортных маршрутов и т.д.;
- оптимизация финансовых расходов;
- формирование операционной модернизации автомобильной транспортной логистики [14].

Другой цифровой технологией при цифровизации транспортной логистики может выступать управление цепочками поставок в режиме реального времени, что возможно при помощи внедрения продуктов «Интернета вещей». Сильной стороной научной работы является то, что авторы отмечают возможность увеличения эффективности логистических процессов транспортной логистики за счет инновационного подхода. Оптимизируется цепочка поставок, что ускоряет процесс доставки грузов и других товарно-материальных ценностей транспортом [14].

Наиболее перспективным же направлением развития инновационных видов услуг транспортной логистики в России с 2022 года будет выступать внедрение подхода «зеленой логистики». С целью повышения экономической эффективности от применения принципов концепции «зеленой логистики» необходимо принятие таких решений, как привлечение внешнего финансирования для реализации инвестиционных проектов, задачей которых выступает экологизация логистики, а также разработка внутреннего стандарта соблюдения принципов экологической безопасности.

В своем исследовании А. С. Лебедева и Л. И. Рогавичене отмечают, что основная доля внедряемых инноваций — заимствованные технологии, адаптированные к российским условиям. Поддерживать определенный уровень инновационной активности в неблагоприятный экономический период способны только крупные отечественные компании с государственной поддержкой и значительным объемом финансовых и материально-технических ресурсов [15].

Для развития инновационных видов транспортно-логистических услуг необходимо создание транспортно-логистического технологического кластера, который будет способствовать разработке и внедрению новых технологий. С этой целью можно использовать следующий алгоритм действий (рис. 2).

Этапы рис. 2 выделены по критериям логичности и целесообразности использования именно этих процессов для создания транспортно-логистического кластера.

Для расчета интегрального показателя макроэкономической эффективности от комплекса проектов развития кластера предложена формула

$$PI = (\Sigma_{\text{муниципальный}} + \Sigma_{\text{региональный}} + \Sigma_{\text{косвенный}} + \Sigma_{\text{федеральный}} + \Sigma_{\text{прямой}}) - (I_{\text{российские}} + I_{\text{иностранные}}),$$

где PI — макроэкономическая эффективность инвестиций;

$\Sigma_{\text{муниципальный}}$ — муниципальный эффект от создания кластера;

$\Sigma_{\text{региональный}}$ — региональный эффект от создания кластера;

$\Sigma_{\text{косвенный}}$ — косвенный эффект от создания кластера;

$\Sigma_{\text{федеральный}}$ — федеральный эффект от создания кластера;

$\Sigma_{\text{прямой}}$ — прямой эффект от создания кластера;

$I_{\text{российские}}$ — отечественные инвестиции для создания кластера;

$I_{\text{иностранные}}$ — иностранные отечественные инвестиции для создания кластера.

Экономический смысл правой части уравнения заключается в том, что она показывает макроэкономическую эффективность инвестиций по каждой группе проектов, связанных с формируемым отраслевым кластером. Левая часть уравнения отражает прибыль государства в результате комплекса инвестиционных проектов минус расходы на его создание.



Рис. 2. Алгоритм создания транспортно-логистического технологического кластера в России

Таким образом, создание транспортно-логистического кластера состоит из трех основных этапов, плавная очередность реализации которых позволит простимулировать условия для развития инновационных видов услуг транспортной логистики в России.

Выводы

Таким образом, современные компании российской экономики стоят перед важностью принятия решений, направленных на совершенствование стратегического управления транспортной логистикой. Для них важны изменения, позволяющие провести оптимизацию транспортно-логистической стратегии и ориентацию на создание новых цепей поставок. Только так возможно обеспечение условий внутри организации по развитию бизнеса в период внешней турбулентности и логистического кризиса.

Цифровая трансформация в транспортной логистике обеспечивает повышение экономической эффективности логистической деятельности организаций, сокращая издержки и улучшая качество услуг по управлению цепями поставок. С учетом стремительного развития высоких технологий цифровизация транспортно-логистической системы будет только ускоряться.

Мы расписали алгоритм создания кластера, а также вывели формулу, которая поможет рассчитать его эффективность.

Библиографический список

1. Российский статистический ежегодник 2021. — URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ejegovodnik_2021.pdf (дата обращения: 10.11.2022).
2. Сун Б. Анализ влияния нового коронавируса на производственную цепочку поставок / Б. Сун // *Russian Economic Bulletin*. — 2022. — № 5. — С. 22–6232.
3. Сергеев В. И. Логистика и управление цепями поставок — специальность 21 века / В. И. Сергеев // *Логистика и управление цепями поставок*. — 2018. — № 6(89). — С. 3–30.
4. Дыбская В. В. Мировые тренды развития управления цепями поставок / В. В. Дыбская, В. И. Сергеев // *Логистика и управление цепями поставок*. — 2018. — № 2(85). — С. 3–14.
5. Спешилов Е. А. Автоматизация, цифровизация и инновации в транспортной логистике / Е. А. Спешилов // *Научное обозрение*. — 2021. — С. 6–8.
6. Горин В. А. Инновационные формы логистического обслуживания в строительстве / В. А. Горин, Ю. С. Крутелева, А. В. Орлова // *Инновации. Наука. Образование*. — 2020. — № 15. — С. 398–406.
7. Мишкина М. М. Устаревшие методы в логистик / М. М. Мишкина // *Студенческий вестник*. — 2021. — № 23-6(168). — С. 21–22.
8. Гашкова Л. В. Понятие и сущность цифровизации в транспортно-логистических процессах / Л. В. Гашкова, О. Ю. Морозова // *Вестник Алтайской академии экономики и права*. — 2022. — № 4-1. — С. 44–51.
9. Скоробогатько А. О. Влияния инновационных технологий на логистическую деятельность организации / А. О. Скоробогатько // *Парадигма устойчивости разноразмерных социально-экономических систем*. — 2020. — С. 202–206.
10. Грищук П. А. Современные технологические инновации на международных перевозках / П. А. Грищук, И. И. Кравец // *Развитие логистики и управления цепями поставок*. — 2022. — С. 92–97.
11. Борисевич Я. Р. Основные направления цифровой трансформации в логистике и управлении цепями поставок / Я. Р. Борисевич, Д. О. Пильковский, Е. С. Прокопеня // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. — 2022. — № 1(31).
12. Громова Н. С. Проблемы и перспективы цифровизации транспортно-логистических систем / Н. С. Громова // *Управление цепями поставок в транспортно-логистических системах*. — 2021. — С. 52–56.
13. Царегородцева Е. Ю. Инновационные подходы в управлении логистикой на транспорте / Е. Ю. Царе-

городцева, Р. Ю. Упырь // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. — 2021. — № 1(26). — С. 14–17.

14. Какаджанов В. М. Использование инвестиций как ресурса развития интеллектуальной логистики / В. М. Какаджанов, С. С. Кудрявцева // Интеллектуальная логистика. — 2021. — С. 102–105.

15. Лебедева А. С. Инновационное развитие рынка транспортных услуг: кластерный подход / А. С. Лебедева, Л. И. Рогавичене // Проблемы прогнозирования. — 2018. — № 4(169).

Дата поступления: 12.04.2023

Решение о публикации: 15.06.2023

Контактная информация:

ВАН Мэйлунь — аспирант;

vesper2944451773@gmail.com

Concept, Features and Characteristics of Innovative Types of Transport and Logistics Services Utilization

M. Wang

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

For citation: Wang M. Concept, Features and Characteristics of Innovative Types of Transport and Logistics Services Utilization // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 568–576. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-568-576

Abstract

Purpose: The scientific article presents the results of the analysis of the characteristics and main trends in the use of innovative technologies in the formation of transport and logistics services. The relevance of the study is determined by the stage of digital transformation and development of innovative technologies, the results of which contribute to the formation and dissemination of innovative types of transport and logistics services. **Methods:** Subject-object, structural-functional approaches, methods of system analysis, comparative methods, statistical methods of research are applied in the work. The information base for the study of scientific work consists of reports and publications of the Federal State Statistics Service, materials from periodicals and the scientific platform elibrary.ru. **Results:** The paper considers the main factors stimulating the development of innovative types of transport and logistics services. Their characteristics and features of use are determined. The positive aspects and benefits of the development of innovations in the field of transport logistics are analyzed. The main problems and difficulties in the use of innovative types of transport and logistics services are considered. Examples of innovative technologies that are used to improve transport logistics services are given. An algorithm for creating a technological cluster of the transport and logistics system in Russia is proposed. **Practical significance:** The scientific article shows that modern companies face the importance of making decisions aimed at improving the strategic management of transport logistics. For them, changes are important to optimize the transport and logistics strategy and focus on creating new supply chains. Only in this way is it possible to ensure conditions within the business development organization during the period of external turbulence and logistical crisis. Digital transformation in transport logistics provides an increase in the economic efficiency of the logistics activities of organizations, reducing costs and improving the quality of supply chain management services. Given the rapid development of high technologies, the digitalization of the transport and logistics system will only accelerate.

Keywords: Transport and logistics services, transport logistics, innovative technologies, innovative transport and logistics services, innovation, digitalization of transport logistics, transport and logistics system.

References

1. Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik 2021 [Russian Statistical Yearbook 2021]. Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ejegovodnik_2021.pdf (accessed: November 10, 2022). (In Russian)
2. Cun B. *Analiz vliyaniya novogo koronavirusa na proizvodstvennyuyu tsepyami postavok* [Analysis of the impact of the new coronavirus on the industrial supply chain]. Russian Economic Bulletin, 2022, Iss. 5, pp. 226–232. (In Russian)
3. Sergeev V. I. *Logistika i upravlenie tsepyami postavok — spetsial’nost’ 21 veka* [Logistics and supply chain management — a specialty of the 21st century]. *Logistika i upravlenie tsepyami postavok* [Logistics and supply chain management]. 2018, Iss. 6(89), pp. 3–30. (In Russian)
4. Dybskaya V. V., Sergeev V. I. *Mirovye trendy razvitiya upravleniya tsepyami postavok* [Global trends in the development of supply chain management]. *Logistika i upravlenie tsepyami postavok* [Logistics and supply chain management]. 2018, Iss. 2(85), pp. 3–14. (In Russian)
5. Speshilov E. A. *Avtomatizatsiya, tsifrovizatsiya i innovatsii v transportnoy logistike* [Automation, digitalization and innovation in transport logistics]. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review]. 2021, pp. 6–8. (In Russian)
6. Gorin V. A., Kruteleva Yu. S., Orlova A. V. *Innovatsionnye formy logisticheskogo obsluzhivaniya v stroitel’stve* [Innovative forms of logistics service in construction]. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie* [Innovations. The science. Education]. 2020, Iss. 15, pp. 398–406. (In Russian)
7. Mishkina M. M. *Ustarevshie metody v logistik* [Obsolete methods in logistics]. *Studencheskiy vestnik* [Student Bulletin]. 2021, Iss. 23-6(168), pp. 21–22. (In Russian)
8. Gashkova L. V., Morozova O. Yu. *Ponyatie i sushchnost’ tsifrovizatsii v transportno-logisticheskikh protsessakh* [The concept and essence of digitalization in transport and logistics processes]. *Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava* [Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law]. 2022, Iss. 4-1, pp. 44–51. (In Russian)
9. Skorobogatko A. O. *Vliyaniya innovatsionnykh tekhnologiy na logisticheskuyu deyatel’nost’ organizatsii* [Influence of innovative technologies on the logistics activity of the organization]. *Paradigma ustoychivosti raznourovnevnykh sotsial’no-ekonomicheskikh sistem* [Paradigm of stability of different levels of socio-economic systems]. 2020, pp. 202–206. (In Russian)
10. Grischuk P. A., Kravets I. I. *Sovremennye tekhnologicheskie innovatsii na mezhdunarodnykh perevozkakh* [Modern technological innovations in international transportation]. *Razvitie logistiki i upravleniya tsepyami postavok* [Development of logistics and supply chain management]. 2022, pp. 92–97. (In Russian)
11. Borisevich Ya. R., Pilkovsky D. O., Prokopenya E. S. *Osnovnye napravleniya tsifrovoy transformatsii v logistike i upravlenii tsepyami postavok* [The main directions of digital transformation in logistics and supply chain management]. *Avtomobil’. Doroga. Infrastruktura* [Automobile. Road. Infrastructure]. 2022, Iss. 1(31). (In Russian)
12. Gromova N. S. *Problemy i perspektivy tsifrovizatsii transportno-logisticheskikh sistem* [Problems and prospects of digitalization of transport and logistics systems]. *Upravlenie tsepyami postavok v transportno-logisticheskikh sistemakh* [Supply chain management in transport and logistics systems]. 2021, pp. 52–56. (In Russian)
13. Tsaregorodtseva E. Yu., Upyr R. Yu. *Innovatsionnye podkhody v upravlenii logistikoy na transporte* [Innovative approaches to logistics management in transport]. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona* [Transport of the Asia-Pacific region]. 2021, Iss. 1(26), pp. 14–17. (In Russian)
14. Kakadzhyanov V. M., Kudryavtseva S. S. *Ispol’zovanie investitsiy kak resursa razvitiya intellektual’noy logistiki* [The use of investments as a resource for the development of intellectual logistics]. *Intellektual’naya logistika* [Intellectual Logistics]. 2021, pp. 102–105. (In Russian)
15. Lebedeva A. S., Rogavichene L. I. *Innovatsionnoe razvitie rynka transportnykh uslug: klasternyy podkhod* [Innovative development of the market of transport services: a cluster approach]. *Problemy prognozirovaniya* [Problems of forecasting]. 2018, Iss. 4(169). (In Russian)

Received: April 12, 2023

Accepted: June 15, 2023

Author’s information:

Meilun WANG — Postgraduate Student;
vesper2944451773@gmail.com

УДК 621.436

Оценка качества работы тепловозного дизеля применением управляемых клапанов

О. Р. Хамидов, Б. Т. Кулманов

Ташкентский государственный университет транспорта, Республика Узбекистан, 100022, Ташкент, ул. Темирийулчилар, 1

Для цитирования: Для цитирования: *Хамидов О. Р., Кулманов Б. Т.* Оценка качества работы тепловозного дизеля применением управляемых клапанов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 577–585. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-577-585

Аннотация

Цель: Оценка качества работы тепловозного дизеля с применением управляемых клапанов. **Методы:** Используются программное обеспечение и методы анализа данных для оценки качества работы тепловозного дизеля путем регулирования и управления фаз газораспределения. В процессе оптимизации управления приводом значения эффективного КПД рассматривались в качестве критерия оптимальности управления. **Результаты:** Были исследованы режимы работы дизеля реального тепловоза, и анализировано распределение его рабочего времени по позициям контроллера машиниста. С помощью математической модели дизеля рассчитаны основные технико-экономические параметры исследуемого объекта с изменением фаз газораспределения и расхода воздуха. Анализированы и составлены графики, характеризующие эффективность изменения фаз газораспределения в виде зависимости относительного эффективного КПД от цикловой подачи для двух промежуточных режимов работы дизеля с варьированием расхода воздуха. **Практическая значимость:** Результаты проведенных исследований могут быть использованы в инженерно-конструкторских работах по замене серийных приводов газораспределения на автоматические управляемые приводы.

Ключевые слова: Управляемые приводы газораспределения, эффективный КПД, фазы газораспределения, дизель, клапан.

Введение

При проектировании тепловозных дизелей все основные технико-экономические показатели рассчитываются на номинальных режимах двигателя. К сожалению, двигатели внутреннего сгорания тепловозов в основном работают не в номинальных режимах. Режимы работы дизеля зависят от многих факторов, таких как состояние подвижного состава, состояние профиля пути, способ организации перевозочных работ, ведение режима локомотива и др. Для основных силовых агрегатов и узлов тепловоза ненорми-

нальные режимы являются нерасчетными и неоптимальными. Как следствие — рабочие процессы работы поршневой машины на этих режимах тоже протекают неоптимально [1].

Для показательного представления на рис. 1 приведен режим работы дизеля реального тепловоза UzTE16M3 № 034 секции «А» приписки локомотивного депо Карши. Длительность экспериментальной поездки — 10 часов.

График наглядно показывает долю рабочего времени дизеля на всех позициях контроллера машиниста.



Рис. 1. Распределение рабочего времени дизеля по позициям КМ

Диаграмма показывает, что существенная доля рабочего времени дизеля тепловоза не совпадает с номинальным режимом, что приводит к ухудшению газообменного процесса, снижению эффективного КПД и качества смесеобразования на промежуточных позициях.

При «жестких» фазах газораспределения пропускная способность клапанов, характеризуемая величиной «время — сечение», при увеличении n_d уменьшается, что отрицательно сказывается на процессах газообмена, особенно для высокооборотных двигателей.

Наиболее распространены механизмы с механическим клапаным пружинным приводом и нерегулируемыми фазами газораспределения. При проектировании клапанного механизма необходимо по возможности выполнить условия получения максимально возможного проходного сечения клапанов и снизить поступательно движущиеся массы. Взаимная противоречивость этих требований предопределяет компромиссность выбора окончательного решения. При механическом приводе закон движения клапанов определяется исключительно профилем кулачка распределительного вала, а фазы подбираются из условия оптимального протекания процессов газообмена в двигателе на номинальном режиме. Естественно, что для других эксплуатационных

режимов выбранные фазы являются неоптимальными, что существенно ухудшает среднеэксплуатационные технико-экономические показатели транспортного дизеля.

Дело в том, что в зависимости от режимов работы дизеля меняется характер поведения газов (топливовоздушной смеси и выхлопных газов) в цилиндре и во впускном и выпускном трактах. В процессе работы двигателя постоянно меняется скорость течения, происходят колебания упругой газовой среды различного рода, которые приводят к резонансным положительным или, наоборот, отрицательным застойным явлениям, вследствие чего эффективность и скорость наполнения цилиндров при разных режимах работы двигателя неодинаковы [2–4].

Автор [5] в ряду недостатков двигателей с механическим приводом клапанов отнес следующее.

Во-первых, для каждой новой конструкции двигателя требуется экспериментально подбирать соотношение фаз газораспределения и создать распределительный вал с таким профилем и взаимным расположением толкающих кулачков относительно остальных элементов ГМР, которые наиболее оптимально обеспечивали требования конструкции и назначения разрабатываемого двигателя. Это связано с тем, что в поршневых двигателях, различных по мощности, степени сжатия,

оборотистости, способу смесеобразования и другим конструктивным особенностям, фазы газораспределения также совершенно различны.

Во-вторых, для двигателей с распределительным валом сложность выполнения перечисленных требований в их трудно устранимой противоречивости.

В-третьих, длительная эксплуатация транспортных дизелей на частичных нагрузках и холостом ходу, т. е. при работе на неоптимальных фазах газораспределения, приводит к увеличению забросов газа во впускной ресивер, отложению нагара и в результате к перегреву деталей при переводе двигателя на номинальный режим.

Процессы газообмена занимают до 65–70 % времени, отводимого на рабочий процесс в четырехтактном двигателе. В связи с этим совершенствование механизма газораспределения является эффективным способом увеличения экономичности тепловозных дизелей в эксплуатации [5].

Частично задача управления фаз газораспределения решается с применением сложной механической системы управления раздвижным распредвалом или разнопрофильными кулачками. Но и такие ГРМ тоже не находят широкого применения из-за высокой конструктивной сложности и недостаточно эксплуатационной надежности.

Учесть все параметры, определяющие качество работы системы газообмена во всем диапазоне работы двигателя, представляется возможным при принципиально новом подходе к управлению органами газообмена.

Анализ качества работы дизеля в зависимости от изменения фаз газораспределения

Одним из наиболее эффективных способов повышения протекания рабочих процессов поршневой части дизеля является замена серийных приводов газораспределения на автоматические управляемые приводы.

При внедрении автоматических регулируемых приводов клапанов появится возможность полностью регулировать фазы газораспределения и закон регулирования. Обеспечиваются оптимальные процессы газообмена в зависимости от режима работы дизеля. Появится возможность индивидуально управлять цилиндрами [6–9].

С целью проверки эффективности и целесообразности управления приводом органов газораспределения тепловозного дизеля выполнено математическое моделирование рабочего процесса дизеля в режимах его работы по нагрузочным характеристикам.

Моделирование выполнялось для характеристик, соответствующих частотам вращения коленчатого вала 600 и 800 об/мин. С целью повышения достоверности и обеспечения необходимой универсальности применения результатов каждая из характеристик моделировалась для различных фиксированных значений расходов воздуха. План проведения вычислительного эксперимента представлен в таблице.

Перечень режимов, в которых выполнялось математическое моделирование рабочего процесса

Фиксирование расхода воздуха при изменении цикловых подач топлива обуславливает его работу в режимах, существенно отличающихся от номинальных. По этой причине численные значения ряда параметров могут выходить за пределы их аппроксимации в ходе моделирования. Поскольку основной задачей, решаемой в ходе моделирования, является определение качественных характеристик, влияния различных факторов на рабочий процесс дизеля, часть результатов, получаемых в ходе моделирования, анализировалась в относительных единицах. Кроме того, главной задачей моделирования было изучение влияния изменения фаз газораспределения на основные технико-экономические показатели двигателя.

План проведения вычислительного эксперимента

Начало подъема впускных клапанов									
Обороты КВ (об/мин)		800			600				
Расход воздуха		$G_1 = 1,38$ кг/с (ном.)	$G_2 = 1,24$ кг/с (-10 %)	$G_3 = 1,1$ кг/с (-20 %)	$G_1 = 0,78$ кг/с (ном.)	$G_2 = 0,7$ кг/с (-10 %)	$G_3 = 0,62$ кг/с (-20 %)		
Изменения фазы									
1. Раньше на 10°	2. Раньше на 20°	3. Позже на 10°	4. Позже на 20°	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00025$	$g_1 = 0,00025$	$g_1 = 0,00025$
				$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00029$	$g_2 = 0,00029$	$g_2 = 0,00029$
				$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00032$	$g_3 = 0,00032$	$g_3 = 0,00032$
				$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00036$	$g_4 = 0,00036$	$g_4 = 0,00036$
				$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,0004$	$g_5 = 0,0004$	$g_5 = 0,0004$
				$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,00043$	$g_6 = 0,00043$	$g_6 = 0,00043$
Окончания посадки впускных клапанов									
1. Раньше на 10°	2. Раньше на 20°	3. Позже на 10°	4. Позже на 20°	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00025$	$g_1 = 0,00025$	$g_1 = 0,00025$
				$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00029$	$g_2 = 0,00029$	$g_2 = 0,00029$
				$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00032$	$g_3 = 0,00032$	$g_3 = 0,00032$
				$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00036$	$g_4 = 0,00036$	$g_4 = 0,00036$
				$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,0004$	$g_5 = 0,0004$	$g_5 = 0,0004$
				$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,00043$	$g_6 = 0,00043$	$g_6 = 0,00043$
Начало подъема выпускных клапанов									
1. Раньше на 10°	2. Раньше на 20°	3. Позже на 10°	4. Позже на 20°	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00025$	$g_1 = 0,00025$	$g_1 = 0,00025$
				$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00029$	$g_2 = 0,00029$	$g_2 = 0,00029$
				$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00032$	$g_3 = 0,00032$	$g_3 = 0,00032$
				$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00036$	$g_4 = 0,00036$	$g_4 = 0,00036$
				$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,0004$	$g_5 = 0,0004$	$g_5 = 0,0004$
				$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,00043$	$g_6 = 0,00043$	$g_6 = 0,00043$
Окончания посадки выпускных клапанов									
1. Раньше на 10°	2. Раньше на 20°	3. Позже на 10°	4. Позже на 20°	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00041$	$g_1 = 0,00025$	$g_1 = 0,00025$	$g_1 = 0,00025$
				$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00046$	$g_2 = 0,00029$	$g_2 = 0,00029$	$g_2 = 0,00029$
				$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00052$	$g_3 = 0,00032$	$g_3 = 0,00032$	$g_3 = 0,00032$
				$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00058$	$g_4 = 0,00036$	$g_4 = 0,00036$	$g_4 = 0,00036$
				$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,00064$	$g_5 = 0,0004$	$g_5 = 0,0004$	$g_5 = 0,0004$
				$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,0007$	$g_6 = 0,00043$	$g_6 = 0,00043$	$g_6 = 0,00043$

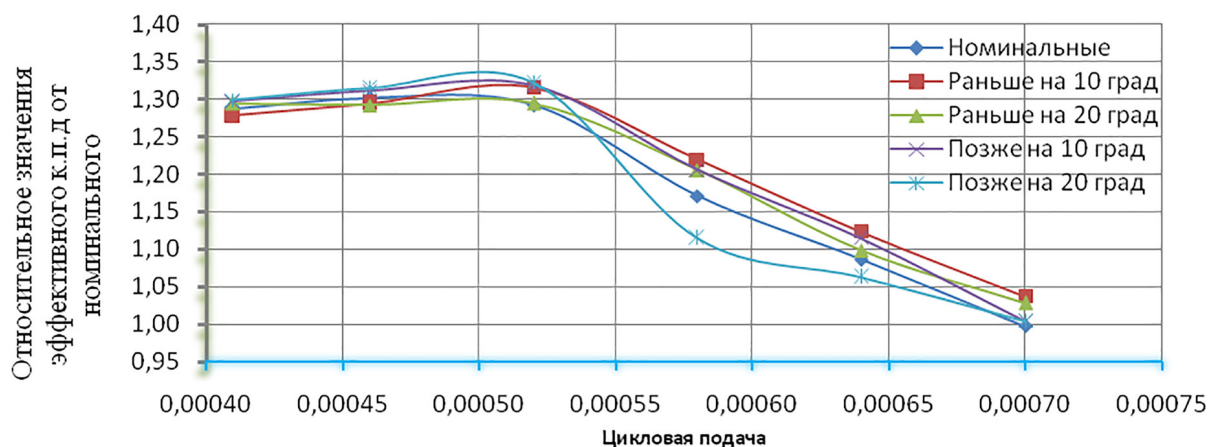


Рис. 1. Изменение параметров рабочего процесса дизеля по нагрузочной характеристике при различных углах начала открытия впускных клапанов.

Расход воздуха — 1,24 кг/с, частота вращения коленчатого вала — 800 об/мин

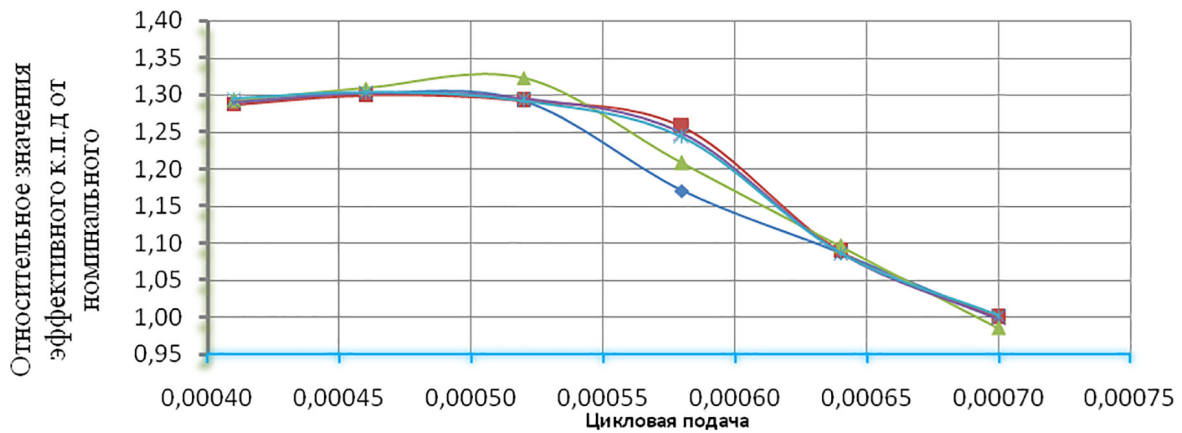


Рис. 2. Изменение параметров рабочего процесса дизеля по нагрузочной характеристике при различных углах окончания закрытия (посадки) выпускных клапанов. Расход воздуха — 1,24 кг/с, частота вращения коленчатого вала — 800 об/мин

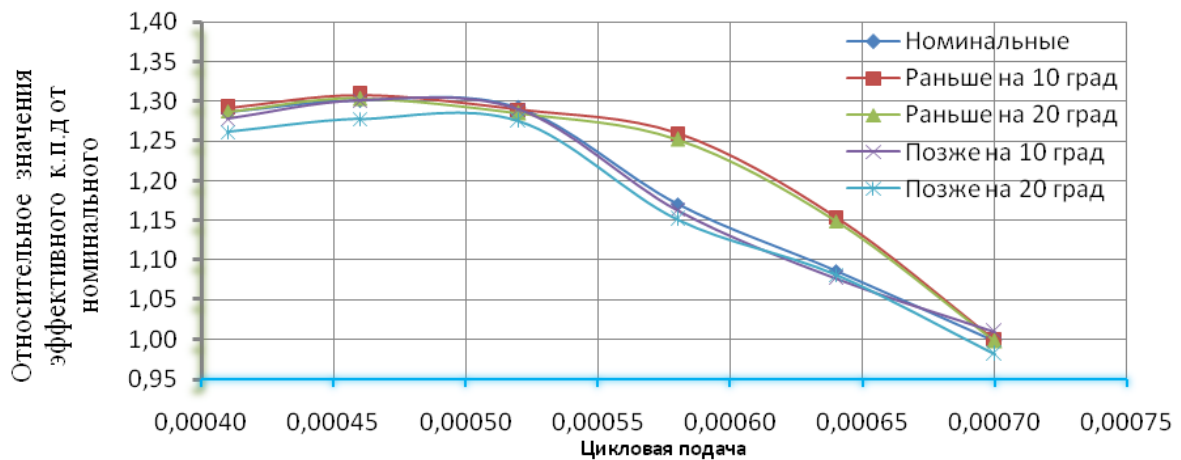


Рис. 3. Изменение параметров рабочего процесса дизеля по нагрузочной характеристике при различных углах начала открытия выпускных клапанов. Расход воздуха — 1,24 кг/с, частота вращения коленчатого вала — 800 об/мин

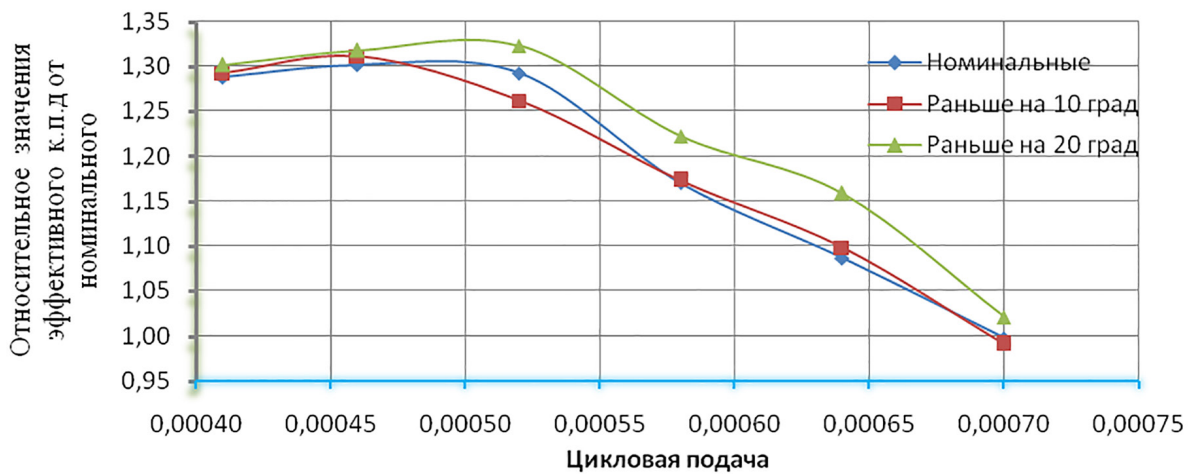


Рис. 4. Изменение параметров рабочего процесса дизеля по нагрузочной характеристике при различных углах окончания закрытия (посадки) выпускных клапанов. Расход воздуха — 1,24 кг/с, частота вращения коленчатого вала — 800 об/мин

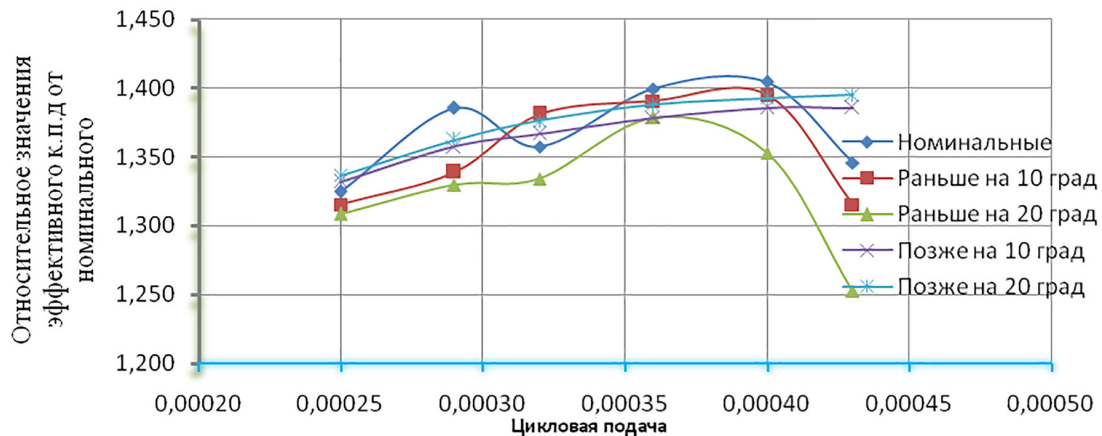


Рис. 5. Изменение параметров рабочего процесса дизеля по нагрузочной характеристике при различных углах начала открытия впускных клапанов.

Расход воздуха — 0,78 кг/с, частота вращения коленчатого вала — 600 об/мин

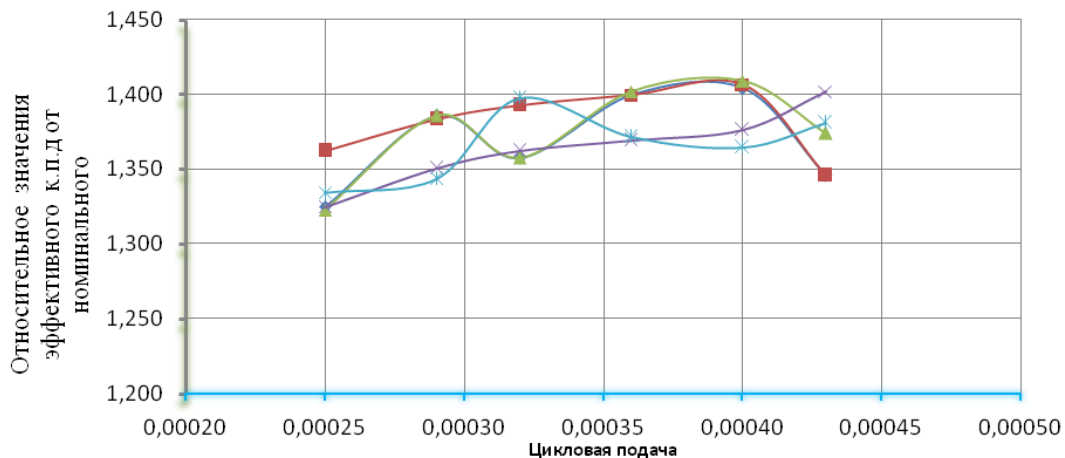


Рис. 6. Изменение параметров рабочего процесса дизеля по нагрузочной характеристике при различных углах окончания закрытия (посадки) впускных клапанов.

Расход воздуха — 0,78 кг/с, частота вращения коленчатого вала — 600 об/мин

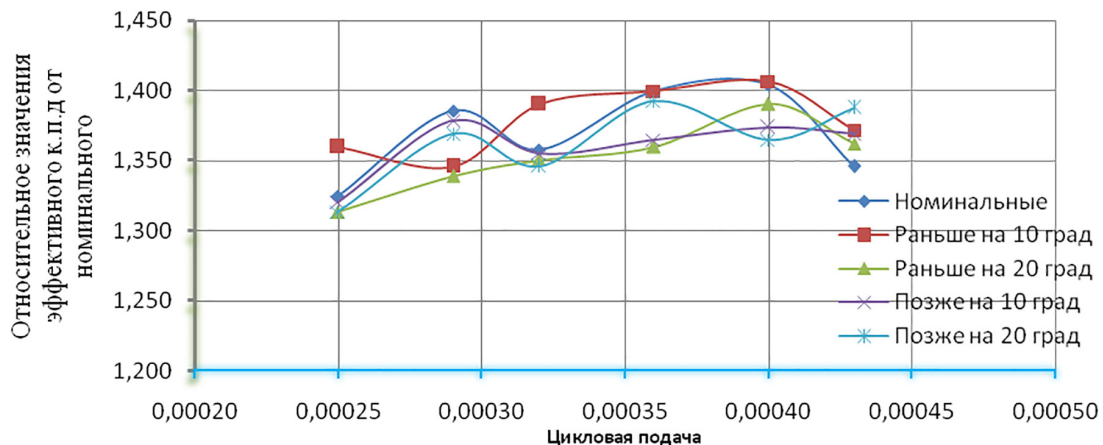


Рис. 7. Изменение параметров рабочего процесса дизеля по нагрузочной характеристике при различных углах начала открытия выпускных клапанов.

Расход воздуха — 0,78 кг/с, частота вращения коленчатого вала — 600 об/мин

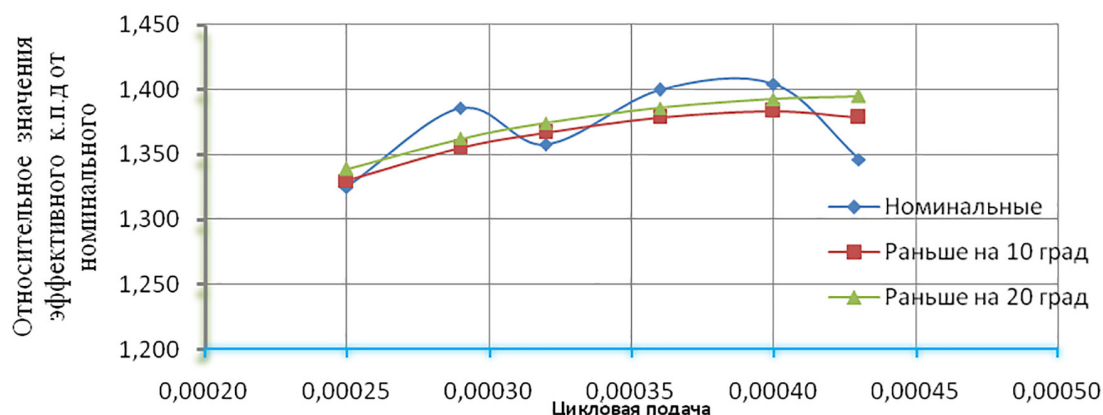


Рис. 8. Изменение параметров рабочего процесса дизеля по нагрузочной характеристике при различных углах окончания закрытия (посадки) выпускных клапанов. Расход воздуха — 0,78 кг/с, частота вращения коленчатого вала — 600 об/мин

В процессе оптимизации управления приводом значения эффективного КПД рассматривались в качестве критерия оптимальности управления.

Часть результатов моделирования рабочего процесса дизеля представлены на рис. 1–8, которые наглядно показывают изменения эффективного КПД в зависимости от фаз газораспределения.

Заключение

Из анализа результатов можно сделать следующие выводы:

Изменение фаз газораспределения оказывает существенное влияние на показатели рабочего процесса дизельного двигателя во всех режимах его работы.

Номинальные значения фаз газораспределения не обеспечивают оптимального качества рабочего процесса дизеля в режимах, отличных от номинальных.

Применение управляемого привода органов газораспределения и оптимизация закона управления ими позволит повысить среднеэксплуатационное значение эффективного КПД дизеля.

Библиографический список

1. Хамидов О. Р. Совершенствование качества работы тепловозного дизеля путем внедрения управляемых кла-

панов газораспределения / О. Р. Хамидов, Б. Т. Кулманов // DEVELOPMENT AND INNOVATIONS IN SCIENCE. International scientific-online conference. — С. 30–32.

2. Грачев В. В. Локомотивные энергетические установки: основы теории рабочих процессов тепловозных дизелей / В. В. Грачев, В. А. Кручек, А. В. Грищенко и др. — СПб.: Петербургский государственный университет путей Императора Александра сообщений I, 2022.

3. Совин К. Г. Изменяемые фазы газораспределения / К. Г. Совин, Н. О. Богатова // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. — 2018. — № 1-2.

4. Кабышев В. Зачем менять фазы газораспределения / В. Кабышев // Драйв. — 11.07.2007.

5. Соснин Д. А. Автоматизированный электромагнитный привод газораспределительных клапанов поршневого ДВС: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Д. А. Соснин. — М., 2005. — 204 с.

6. Балабин В. Н. Научные основы создания регулируемых приводов газораспределения локомотивных двигателей внутреннего сгорания нового поколения: дисс. ... д-ра техн. наук / В. Н. Балабин. — М.: Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), 2010.

7. Кузнецов А. Г. Исследование методов интенсификации переходных процессов дизель-генератора / А. Г. Кузнецов, С. В. Харитонов, Ин Лю // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2018. — № 6. — С. 50–58.

8. Лю Ин Анализ индикаторных диаграмм дизельного двигателя при отключении цилиндров / Ин Лю, А. Г. Кузнецов, С. В. Харитонов // *Двигателестроение*. — 2019. — № 2. — С. 9–16.

9. Лю Ин Анализ рабочего процесса дизельного двигателя при отключении цилиндров / Ин Лю, А. Г. Кузнецов // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. — 2019. — № 11. — С. 9–18.

Дата поступления: 25.05.2023

Решение о публикации: 15.06.2023

Контактная информация:

ХАМИДОВ Отабек Рустамович — д-р техн. наук, проф.;
otabek.rustamovich@yandex.ru

КУЛМАНОВ Баходир Тошболтаевич — докторант PhD;
mexanikuz1986@gmail.com

Evaluation of Diesel Locomotive Performance Using Controlled Valves

O. R. Khamidov, B. T. Kulmanov

Tashkent University of Transport, 1, Temiryulchilar str., Tashkent, Republic of Uzbekistan

For citation: Khamidov O. R., Kulmanov B. T. Evaluation of Diesel Locomotive Performance Using Controlled Valves // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 577–585. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-577-585

Summary

Purpose: Evaluation of the quality of diesel locomotive operation using controlled valves. **Methods:** Software and data analysis methods are used to evaluate the performance of a diesel locomotive by adjusting and controlling the valve timing. In the process of optimizing drive control, the efficiency values have been considered as a criterion for the optimality of control. **Results:** The operating modes of the diesel engine of a real diesel locomotive have been investigated and the distribution of its working time by the positions of the driver's controller has been analyzed. Using a mathematical model of a diesel engine, the main technical and economic parameters of the object under study have been calculated with a change in the valve timing and air flow. Graphs have been analyzed and compiled that characterize the efficiency of changing the valve timing in the form of a dependence of the relative efficiency from cyclic supply for two intermediate modes of diesel operation with varying air consumption. **Practical significance:** The results of the conducted research can be used in engineering and design work to replace serial gas distribution drives with automatic controlled drives.

Keywords: Controlled gas distribution drives, efficiency, valve timing, gas distribution phases, diesel, valve.

References

1. Grachev V. V., Kruchek V. A., Grishchenko A. V. et al. *Lokomotivnye energeticheskie ustanovki: osnovy teorii rabochikh protsessov teplovozykh dizeley* [Locomotive power plants: fundamentals of the theory of working processes of diesel engines]. Saint Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey Imperatora Aleksandra soobshcheniy I Publ., 2022. (In Russian)

2. Sovin K. G., Bogatova N. O. *Izmenyaemye fazy gazoraspredeleniya* [Variable valve timing].

Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont [Agricultural machinery: maintenance and repair]. 2018, Iss. 1-2. (In Russian)

3. Kabyshev V. *Zachem menyat' fazy gazoraspredeleniya* [Why change the valve timing]. *Drayv* [Drive]. 11.07.2007. (In Russian)

4. Sosnin D. A. *Avtomatizirovannyy elektromagnitnyy privod gazoraspredelitel'nykh klapанov porshnevoogo DVS: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.03* [Automated electromagnetic drive of gas distribution valves of a

reciprocating internal combustion engine: dis. ... cand. tech. Sciences]. Moscow, 2005, 204 p. (In Russian)

5. Balabin V. N. *Nauchnye osnovy sozdaniya reguliruemyykh privodov gazoraspredeleniya lokomotivnykh dvigateley vnutrennego sgoraniya novogo pokoleniya: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Scientific foundations for creating adjustable gas distribution drives for locomotive internal combustion engines of a new generation]. Moscow: Moskovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya (MIIT) Publ., 2010. (In Russian)

6. Khamidov O. R., Kulmanov B. T. *Sovershenstvovanie kachestva raboty teplovoznogo dizelya putem vnedreniya upravlyaemykh klapanov gazoraspredeleniya* [Improving the quality of diesel locomotive operation by introducing controlled gas distribution valves]. DEVELOPMENT AND INNOVATIONS IN SCIENCE. International scientific-online conference, pp. 30–32. (In Russian)

7. Kuznetsov A. G., Kharitonov S. V., Lyu In. *Issledovanie metodov intensivatsii perekhodnykh protsessov dizel'-generatora* [Research methods for intensification of diesel generator transient processes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*

[News of higher educational institutions. Mechanical engineering]. 2018, Iss. 6, pp. 50–58. (In Russian)

8. Lyu In, Kuznetsov A. G., Kharitonov S. V. *Analiz indikatornykh diagramm dizel'nogo dvigatelya pri otklyuchenii tsilindrov* [Analysis of indicator diagrams of a diesel engine when cylinders are turned off]. *Dvigatelsestroenie* [Engine building]. 2019, Iss. 2, pp. 9–16. (In Russian)

9. Lyu In, Kuznetsov A. G. *Analiz rabocheho protsessa dizel'nogo dvigatelya pri otklyuchenii tsilindrov* [Analysis of the working process of a diesel engine when the cylinders are turned off]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [News of higher educational institutions. Engineering]. 2019, Iss. 11, pp. 9–18. (In Russian)

Received: May 25, 2023

Accepted: June 15, 2023

Author's information:

Otabek R. KHAMIDOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; otabek.rustamovich@yandex.ru

Bakhodir T. KULMANOV — PhD Student; mexanikuz1986@gmail.com



УДК 338.28, 656.2

Секвестирование бюджета как способ повышения эффективности управления расходами в авиационной деятельности

Г. И. Паламарчук¹, П. Ю. Либерман², В. Н. Кузьменкова³

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

²Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Маршала Александра Новикова, Российская Федерация, 196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38

³Военный институт (Железнодорожных войск и военных сообщений) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева, Российская Федерация, 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Суворовская, 1

Для цитирования: Паламарчук Г. И., Либерман П. Ю., Кузьменкова В. Н. Секвестирование бюджета как способ повышения эффективности управления расходами в авиационной деятельности // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 586–594. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-586-594

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос определения и оценки эффективности управления расходами в авиационной деятельности. **Методы:** Применяются методы системного анализа управления рисками в авиационной деятельности и оценки эффективности управления расходами. **Результаты:** Проведено исследование по проблемам осуществления управления расходами в авиационной деятельности авиапредприятий. Предложена методика оценки эффективности секвестирования в авиационной деятельности. **Практическая значимость:** Предложена методика оценки и определения эффективности управления расходами в авиационной деятельности. Понимание крупнейших проблем в мире и в авиационной отрасли, а также управление расходами в организации в будущем позволит компаниям получить конкурентное преимущество и занять лидирующее положение на рынке авиауслуг.

Ключевые слова: Секвестирование, оптимизация, бюджет, риск-менеджмент.

Введение

Концепция управления расходами одинаково важна во всех секторах авиации и должна последовательно реализовываться в авиационной деятельности авиакомпаний. Секвестром в экономике называют сокращение расходов, обусловленное объективными причинами. Как следствие, речь идет о сокращении бюджетных расходов

авиакомпаний, то есть пересмотре финансового портфеля авиакомпании в сторону его сокращения [1].

Процесс секвестирования можно охарактеризовать с «сокращением» расходной части бюджета. Урезание расходов в большинстве случаев заключается в пересмотре бюджета авиакомпании в сторону его сокращения. Как следствие,

актуальными проблемами в авиационной деятельности становятся всевозможные непредвиденные обстоятельства и форс-мажоры, а также ошибки, допущенные при расчете и составлении бюджетного плана. Авиационная отрасль сталкивается с множеством уникальных проблем, когда речь заходит об управлении расходами. Управление финансами сопряжено со значительными затратами и требует правильного сочетания программного обеспечения для управления расходами, чтобы эффективно функционировать на рынке авиатранспортных услуг [2, 3].

Цена авиационного топлива является значительным расходом для авиакомпаний, и топливо может составлять до 30 % в структуре затрат авиакомпании. Авиационная промышленность трудоемка, для выполнения одного рейса требуется много сотрудников. Затраты на рабочую силу, включая заработную плату, пособия и пенсии, могут стать значительными расходами для авиакомпаний. Авиакомпании должны обслуживать свои воздушные суда, чтобы обеспечить их безопасную и эффективную эксплуатацию.

Расходы на техническое обслуживание могут быть высокими, особенно для старых самолетов или самолетов с более сложными системами. Авиакомпании должны либо арендовать, либо приобретать свои самолеты. Лизинг может быть значительной частью расходов, поскольку авиакомпании должны ежемесячно вносить плату за пользование воздушным судном или приобретать ВС. Покупка самолетов напрямую также является значительной суммой, и не все авиакомпании могут себе позволить такие расходы. Авиакомпании должны платить аэропортам сборы за использование их объектов, включая взлетно-посадочные полосы, выходы на посадку и терминалы. Эти сборы могут быть значительными расходами, особенно для авиакомпаний, которые работают в нескольких аэропортах. Авиакомпании должны иметь значительное страховое

покрытие для защиты от несчастных случаев и других инцидентов. Стоимость страхования может быть высокой, особенно для авиакомпаний с большим парком самолетов [4, 5].

В целом авиационные расходы сложны и бросаются в глаза, а это означает, что финансовые команды должны тщательно управлять расходами, чтобы поддерживать прибыльность, стабильность и даже безопасность авиакомпании. В то время как большинство отраслей имеют свою справедливую долю расходов, авиационная промышленность превосходит многие из них благодаря сверхвысокой стоимости таких вещей, как топливо. В последние годы цены на топливо резко колебались, что делало управление денежными потоками напряженным и непредсказуемым делом для финансовых команд.

Это далеко не единственная проблема, цены на топливо — лишь часть комплекса проблем, которые могут превратить управление коммерческими платежами в «головную боль» авиационных компаний. В авиационной отрасли высокие постоянные издержки, такие как покупка или лизинг самолетов, заработная плата пилотов, инженеров и наземного персонала, аэропортовые сборы и расходы на техническое обслуживание. И отрасль несет эти расходы независимо от количества пассажиров на рейсе или рейсах, что затрудняет приведение расходов в соответствие с доходами. Цены на топливо являются одной из наиболее значительных статей расходов авиакомпаний, и они могут быть нестабильными и подвержены внезапному повышению или снижению. Эти резкие колебания могут затруднить авиакомпаниям прогнозирование затрат и соответствующую корректировку своих операций. Авиационная отрасль подчиняется многочисленным нормативным актам, таким как требования безопасности, меры предосторожности и экологические стандарты, которые могут увеличить расходы [6].

В авиационной отрасли высокая конкуренция, и авиакомпании должны постоянно внедрять инновации, чтобы оставаться конкурентоспособными [7]. Стремление к инновациям также может привести к дополнительным расходам, таким как инвестиции в новые технологии, обновление парка воздушных судов или предоставление уникальных удобств пассажирам.

Глобальные и локальные события могут существенно повлиять на показатели авиационной отрасли. Учитывая, что Covid-19 свеж в наших воспоминаниях, стоит упомянуть, что такие события, как пандемии, стихийные бедствия и политические волнения, могут оказать огромное влияние на авиационную отрасль. Эти события могут привести к снижению спроса на перевозки, увеличению эксплуатационных расходов и потере доходов, что затруднит авиакомпаниям соответствующее управление своими денежными потоками и расходами.

Предпринимательская деятельность на транспорте обусловила возникновение коммерческого риска, как на стадии создания, так и при дальнейшем функционировании предприятий. Коммерческий риск практически не был характерен для деятельности транспортных предприятий в условиях командно-административной экономики и господства государственной собственности. Своим возникновением коммерческий риск обязан развитию предпринимательства. Высокая степень коммерческого риска подтверждается практикой развитых стран: США, Японии, Канады, Франции, Италии, где каждые 3–5 лет более половины предприятий, в основном малых, не выдерживая конкуренции, разоряются и сменяются новыми, готовыми рисковать ради утверждения в бизнесе [8].

Уровень риска зависит от действия различных факторов, как внешних, так и внутренних. Внешние факторы являются следствием воздействия на транспортное предприятие окружающей

среды: действующего законодательства, решений государственных органов власти, налоговой системы, взаимоотношений с клиентами и другими транспортными организациями, особенно при смешанных перевозках, природных стихийных явлениях, внутривластных и международных событиях.

Внутренние факторы порождаются на самом транспортном предприятии и связаны с низким уровнем организации труда и управления, недостаточной компетентностью руководителей и специалистов, отсутствием профессионального опыта у персонала, недобросовестным отношением к производственным обязанностям, финансовыми просчетами, утечкой конфиденциальной информации по вине работников предприятия и прочими причинами. Объектом управления в риск-менеджменте на транспорте являются рискованные ситуации, связанные с транспортной деятельностью, и экономические отношения между хозяйствующими субъектами в процессе возникновения и реализации риска [9].

Рискованные ситуации возникают при перевозке пассажиров и грузов (риск транспортных происшествий, риск, обусловленный несоблюдением международных и отечественных стандартов, требований в области экологии, и риск утраты или порчи перевозимых грузов), производственный риск, связанный с травматизмом и материальным ущербом в финансовой области (риск в связи с покупкой транспортным предприятием различных ценных бумаг, риск кредитных операций), при осуществлении инвестиций и инноваций (риск вложения капитала, который не обеспечит окупаемости [8]).

Оценить результат управления рисками предлагается по следующей формуле:

$$P_{yp} = \sum_{i=1}^N M_{oi} - \sum_{i=1}^N M_i, \quad (1)$$

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

M_{oi} — 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.

Деятельность по управлению рисками требует оценку результата управления рисками и оценку мероприятий по секвестированию расходов авиакомпании.

Инновационная деятельность на транспорте является трудным и рискованным делом. Это связано с большими размерами инвестиций в транспортном комплексе. Инвестиции могут не окупиться и привести к значительным убыткам, а также к неустойчивому состоянию авиакомпании на рынке авиауслуг.

Авиационная промышленность постоянно инвестирует в исследования и разработки (R & D) с целью внедрения инноваций и улучшения конструкции самолета, характеристик безопасности, топливной экономичности и комфорта пассажиров. Традиционно банки предоставляли кредиты авиационным компаниям для поддержки их исследований и разработок и продвижения технологических достижений. Авиационная отрасль вносит значительный вклад в экономику, создавая рабочие места, способствуя туризму и торговле, а также поддерживая смежные сектора, такие как гостиничный бизнес, логистика и производство. Авиационная индустрия глобальна, что означает, что она распространяется на множество стран и валют. Авиакомпании и авиационные компании должны управлять своими расходами и финансами за рубежом, чтобы работать эффективно. Многие представители авиационной отрасли уже начали использовать программное обеспечение для управления расходами для

оптимизации и автоматизации своих процессов управления расходами. Необходимость эффективного управления затратами заставляет авиакомпании обращаться к программным решениям, помогающим контролировать расходы, повышать точность и снижать нагрузку на административный персонал, многие из этих же компаний сейчас застряли на разрозненных устаревших решениях, которые еще не могут сделать управление расходами, контроль за расходами и платежи максимально простыми и эффективными.

Большинство авиакомпаний используют программное обеспечение для управления расходами и автоматизации процессов составления отчетов о расходах, включая отправку и возмещение расходов. Авиакомпании не используют инструменты, которые включают в себя практически мгновенное возмещение, соблюдение и внедрение политики, сбор и отслеживание квитанций и даже хорошо подключенные кредитные карты с высоким лимитом. В целом у многих игроков авиационной отрасли все еще есть огромная возможность подключиться ко второй волне цифровой трансформации, чтобы лучше управлять расходами, повысить эффективность, точность процессов управления расходами и избежать пропуска квитанций и потерянных возвратов НДС. Авиационная отрасль часто полагается на сложные и взаимосвязанные системы для управления своими операциями [10, 11].

Для эффективного управления различными аспектами своего бизнеса, включая инвентаризацию, техническое обслуживание и планирование, авиационным компаниям необходимо использовать программное обеспечение для планирования ресурсов предприятия (ERP) и бухгалтерского учета. Пользовательские интеграции API между этими системами и другими программными платформами могут принести значительную пользу авиационным компаниям, включая оптимизацию процессов, повышение точности и наглядности,

а также информирование о процессе принятия решений. Это различие повышает точность и снижает нагрузку на другом конце, что означает быструю безошибочную сверку счетов [12].

Отсутствие видимости расходов плохо сказывается на авиационном бизнесе по нескольким причинам, включая:

- неспособность контролировать расходы: когда авиационный бизнес не имеет представления о своих расходах, контролировать их становится трудно. Это может привести к перерасходу средств в определенных областях или видах деятельности, еще больше снижая и без того низкую маржу;

- неточную финансовую отчетность: недостаточная видимость расходов может привести к неправильной финансовой отчетности, что затруднит получение финансирования или принятие обоснованных решений авиационными компаниями. Это может еще больше повлиять на прибыльность и способность развивать бизнес;

- сложность определения возможностей экономии средств: становится непросто точно определить области для экономии без хорошей видимости. Авиационные компании должны выявлять и использовать эти возможности для повышения прибыльности.

В целом недостаточная видимость расходов может нанести ущерб авиационному бизнесу, приводя к увеличению затрат, снижению эффективности, неточной финансовой отчетности и упущенной возможности выявить пути экономии.

Авиационные компании должны отслеживать расходы по проекту, чтобы понимать, что они тратят, как управлять своими ресурсами, какие меры контроля затрат следует расходовать, как точно выставлять счета клиентам и обеспечивать соблюдение ими всех необходимых правил. Эффективный процесс возмещения расходов может помочь компаниям вести точный учет и соблюдать юридические и налоговые требования. Это также может помочь предотвратить мошенничество и

ошибки, экономя время и деньги компании в долгосрочной перспективе [7].

Таким образом, простые процессы возмещения расходов имеют решающее значение для работников авиационной отрасли, поскольку они могут снизить финансовую нагрузку на сотрудников, повысить удовлетворенность сотрудников и производительность, а также помочь компаниям вести точный учет и соблюдать юридические и налоговые требования.

Решения автоматизированных систем расходов SaaS особенно привлекательны для авиационной отрасли, поскольку они предлагают ряд преимуществ, в том числе:

1. **Экономия средств:** решения SaaS, как правило, основаны на подписке, что означает, что компании платят только за используемые ими услуги без необходимости в дорогостоящей инфраструктуре, оборудовании или ИТ-поддержке.

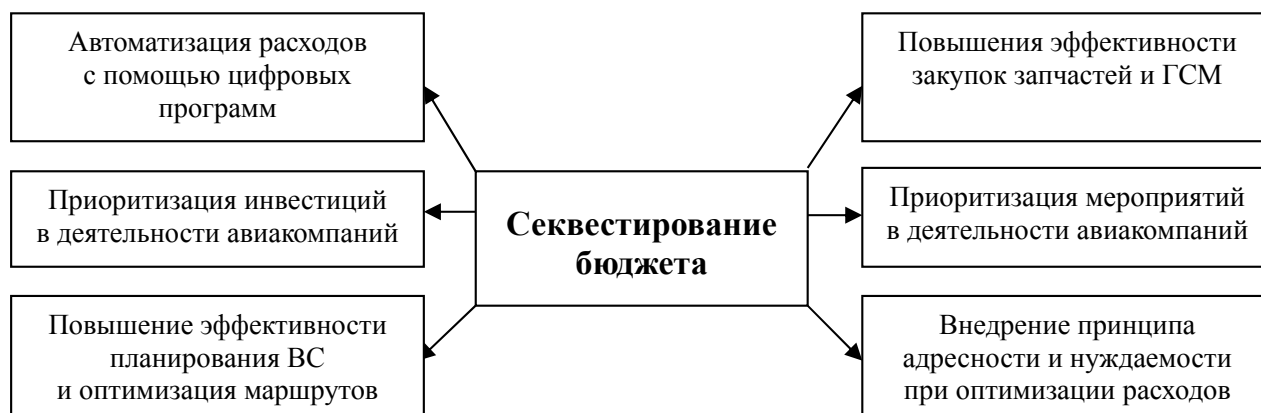
2. **Масштабируемость:** решения SaaS спроектированы так, чтобы их можно было масштабировать, поэтому компании могут легко добавлять или удалять пользователей или услуги по мере изменения потребностей их бизнеса.

3. **Гибкость:** доступ к решениям SaaS осуществляется через Интернет, что означает, что пользователи могут получить к ним доступ из любого места с подключением к Интернету, что делает их особенно полезными для компаний с несколькими филиалами или удаленных сотрудников.

4. **Безопасность:** поставщики SaaS-услуг обычно принимают надежные меры безопасности для защиты данных своих клиентов, что может быть особенно важно для авиационной отрасли, где безопасность является главным приоритетом.

5. **Управление полетными операциями:** решения SaaS помогают авиакомпаниям управлять своими полетными операциями, включая планирование, управление экипажами и отправку.

6. **Управление аэропортами:** решения SaaS помогают аэропортам управлять своей деятель-



Меры оптимизации в деятельности авиакомпаний при секвестировании бюджета

ностью, включая работу терминалов, пассажиропоток и обработку багажа.

7. Управление взаимоотношениями с клиентами: решения SaaS помогают авиакомпаниям управлять взаимоотношениями с клиентами, включая продажу билетов, бронирование и программы лояльности.

8. Управление авиационной безопасностью: решения SaaS помогают компаниям управлять своими программами обеспечения безопасности, включая управление рисками, отчетность об инцидентах и соблюдение требований.

Результаты

Авиационные компании могут помочь своим сотрудникам соблюдать политику и рекомендации за счет секвестирования в отношении расходов, сокращать расходы и эффективно распределять ресурсы. Секвестирование в авиационной деятельности за счет цифровых технологий и готовых программных решений позволит авиакомпаниям оптимизировать эффективность, масштабировать расходы и поддерживать гибкость за счет оптимизации ресурсов (рисунок).

Авиакомпании могут оценить результат секвестирования расходов по следующей формуле:

$$P_c = (\Pi / Z_c) \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где Π — прибыль, полученная от авиационной деятельности;

Z_c — затраты, понесенные авиакомпанией с помощью секвестирования.

Рыночная экономика характеризуется высокой динамикой всех процессов и явлений, постоянной сменой периодов подъема и спада. В этих условиях экономическим субъектам, то есть авиакомпаниям, необходим инструментарий, обеспечивающий стабильность ведения хозяйственной деятельности, позволяющий гибко маневрировать ресурсами для формирования активного поведения на рынке [9].

Выводы

В заключение хотелось бы отметить, что управление расходами в авиационной деятельности с помощью секвестирования будет давать положительный результат и поможет снизить риск до приемлемого уровня. В настоящее время оптимизация расходов для транспортных предприятий имеет важное значение в определении бюджета авиакомпании.

1. Управление расходами в авиационной деятельности — это стратегическая задача, которая

должна быть решена в ближайшем будущем и приведена в соответствие с международными стандартами.

2. Привлечение специалистов в этой области, ученых, исследователей, практиков должно быть одной из важных задач в управлении коммерческой деятельности авиакомпании. Необходимо эффективно оценивать результат оптимизации расходов от секвестирования авиационной деятельности, управления рисками и определять экономическую эффективность принятых мероприятий.

Библиографический список

1. Джанбекова А. З. Секвестр бюджета в Российской Федерации / А. З. Джанбекова, С. А. Чупрова // Экономика и социум. — 2022.
2. Мосс Д. Краткий курс макроэкономики. — М.: Манн, Иванов и Фербер, 2020. — 153 с.
3. 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.
4. Паламарчук Г. И. Императивы управления рисками в авиационной деятельности / Г. И. Паламарчук, П. Ю. Либерман // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 10. — DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-10-10.
5. Куклев Е. А. Аэрокосмические технологии Springer / Е. А. Куклев, В. С. Шапкин, В. Л. Филиппов и др. // Риски и безопасность авиационной системы. — 2019. — С. 1–4.
6. Safety Management Manual (SMM). ICAO Doc 9859, Order Number: 9859. — ICAO 2016. — Pp. 5–8.
7. 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.
8. Либерман П. Ю. Анализ и оценка эффективности управления рисками в авиационной деятельности / П. Ю. Либерман, А. П. Ястребов // Качество. Инновации. Образование. — 2020. — № 6(170). — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44701060>.
9. 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.
10. 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.
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. Качалов Р. М. IV научно-практическая конференция «Управление рисками в экономике: проблемы 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.

Дата поступления: 28.06.2023

Решение о публикации: 30.08.2023

Контактная информация:

ПАЛАМАРЧУК Геннадий Иванович — канд. техн.

наук, доц.; palamarchuk.67@mail.ru

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

КУЗЬМЕНКОВА Вероника Николаевна — канд. экон.
наук, доц.; veronicakuzmenkova@rambler.ru

Budget Sequestration As a Way to Increase the Efficiency of Cost Management in Aviation Activities

G. I. Palamarchuk¹, P. Yu. Liberman², V. N. Kuzmenkova³

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

²Marshal Alexander Novikov St. Petersburg State University of Civil Aviation, 38, Pilotov str., St. Petersburg, 196210, Russian Federation

³Military Institute (Railway Troops and Military Communications) of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev, 1, Suvorovskaya str., St. Petersburg, Peterhof, 198504, Russian Federation

For citation: Palamarchuk G. I., Liberman P. Yu., Kuzmenkova V. N. Budget Sequestration As a Way to Increase the Efficiency of Cost Management in Aviation Activities // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 586–594. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-586-594

Summary

Purpose: To consider the issue of determining and evaluating the effectiveness of cost management in aviation activities. **Methods:** Methods of systematic analysis of risk management in aviation activities and evaluation of the effectiveness of cost management are used. **Results:** A study on the problems of cost management in the aviation activities of aviation enterprises has been conducted. A methodology for evaluating the effectiveness of sequestration in aviation activities is proposed. **Practical significance:** A methodology for assessing and determining the effectiveness of cost management in aviation activities is proposed. Understanding the biggest problems in the world and the aviation industry, as well as cost management in the organization in the future will allow companies to gain a competitive advantage and take a leading position in the aviation services market.

Keywords: Sequestration, optimization, budget, risk management.

References

1. Dzhanbekova A. Z., Chuprova S. A. Sekvestr byudzheta v Rossiyskoy Federatsii [Budget sequestration in the Russian Federation]. *Ekonomika i sotsium* [Economics and society]. 2022. (In Russian)
2. Moss D. *Kratkiy kurs makroekonomiki* [Short course of macroeconomics]. Moscow: Mann, Ivanov i Ferber Publ., 2020, 153 p. (In Russian)
3. Kleyner G. B. Sotsial'no-ekonomicheskie ekosistemy v svete sistemnoy paradigmy [Socio-economic ecosystems in the light of the system paradigm]. *Sistemnyy analiz v ekonomike — 2018: sbornik trudov* [System analysis in economics — 2018: collection of works]. Moscow: Prometei Publ., 2018, pp. 6–11. (In Russian)
4. Palamarchuk G. I., Liberman P. Yu. Imperativy upravleniya riskami v aviatsionnoy deyatelnosti [Imperatives of risk management in aviation activities]. *Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2022, vol. 20, Iss. 1, p. 10. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-10-10. (In Russian)
5. Kuklev E. A., Shapkin V. S., Filippov V. L. *Aerokosmicheskie tekhnologii* Springer [Aerospace technologies Springer]. *Riski i bezopasnost' aviatsionnoy sistemy* [Risks and safety of the aviation system]. 2019, pp. 1–4. (In Russian)
6. Safety Management Manual (SMM). ICAO Doc 9859, Order Number: 9859. ICAO 2016, pp. 5–8.
7. Kuz'menkova V. N., Palamarchuk G. I., Katser N. N. Osobnosti marketinga na transporte [Features of marketing in transport]. *Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta* [Special equipment and transport technologies]. 2020, Iss. 7(45), pp. 215–219. (In Russian)

8. 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]. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education]. 2020, Iss. 6(170). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44701060>. (In Russian)
9. Bykov A. A. O postroenii sistem upravleniya riskami na predpriyatiyakh [On the construction of risk management systems at enterprises]. *Problemy analiza riska* [Problems of risk analysis]. 2019, Iss. 16-3, pp. 6–8. DOI: 10.32686/1812-5220-2019-16-3-8-9. (In Russian)
10. Palamarchuk G. I., Kuz'menkova V. N., Dadaev A. V. *Aspekty povysheniya konkurentosposobnosti logisticheskikh uslug rossiyskikh predpriyatiy* [Aspects of increasing the competitiveness of logistics services of Russian enterprises]. *Russian Journal of Logistics & Transport Management*, 2020, vol. 5, Iss. 1, pp. 19–27. (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 equipment and transport technologies]. 2019, Iss. 3(41), pp. 112–117. (In Russian)
12. Kachalov R. M., Oparin S. G. IV nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Upravlenie riskami v ekonomike: problemy i resheniya" [IV scientific-practical conference "Risk management in the economy: problems and solutions"]. *Ekonomicheskaya nauka sovremennoy Rossii* [Economic science of modern Russia]. 2019, Iss. 1(84), pp. 129–132. DOI: 10.33293/1609-1442-2019-1(84)-139-145. (In Russian)

Received: June 28, 2023

Accepted: August 30, 2023

Author's information:

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

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

Veronika N. KUZMENKOVA — PhD in Economics, Associate Professor; veronicakuzmenkova@rambler.ru

УДК 628.336.6

Система совместного использования обедненного метана угольных пластов и биогаза для выработки электроэнергии в угольных шахтах

А. Л. Харитоненко¹, А. Б. Завьялов¹, Я. В. Зачиняев²

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

² Петрозаводский государственный университет, Российская Федерация, 185910, Петрозаводск, пр. Ленина, 33

Для цитирования: Харитоненко А. Л., Завьялов А. Б., Зачиняев Я. В. Система совместного использования обедненного метана угольных пластов и биогаза для выработки электроэнергии в угольных шахтах // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 595–603. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-595-603

Аннотация

Цель: Обоснование и разработка новых ресурсосберегающих технологий, направленных на утилизацию метана угольных пластов. Проблема низкой эффективности утилизации бедных метановоздушных смесей обусловлена в первую очередь низким содержанием непосредственно самого метана в зависимости от вида угля или концентрацией, которая резко варьируется. В данной работе рассматривается концепция системы совместного производства, в которой смешиваются метановоздушные смеси с низким содержанием метана и биогаз для получения электроэнергии. **Методы:** Анализ возможных объемов утилизируемого метана, потребностей в биогазе и пригодности первичного сырья для целей совместного производства тепла и электроэнергии. Подбор соответствующих параметров процессов утилизации шахтного метана. Анализ достоинств предложенного способа использования бедного метана, извлекаемого из угольных шахт. **Результаты:** Рекомендуется добавлять биогаз, вырабатываемый сельским и лесным хозяйством вблизи шахт, в поток отбензиненного метана для получения необходимой концентрации газа с целью выработки электроэнергии. Также была проведена оценка потенциального производства электроэнергии и снижения выбросов парниковых газов. Результат показывает, что система совместного производства может значительно повысить эффективность использования бедных метановоздушных смесей на угольных шахтах. **Практическая значимость:** Совместное использование обедненного метана и биогаза из соломы имеет практическую выгоду — как в экономическом плане, обеспечивая достаточное энергоснабжение в шахтах, так и в качестве задела для широких перспектив на будущее, позволяющего уменьшить затраты энергии, снизить загрязнение окружающей среды, например сократив выбросы углекислого газа.

Ключевые слова: Метан угольных пластов, метановоздушные смеси, биогаз, производство электроэнергии, ресурсосбережение, сокращение выбросов, низкоуглеродные системы.

Введение

Производство и потребление угля как базового ресурса в течение многих лет серьезно влияет на экономику и социальное развитие в России. Несмотря на некоторый спад в использовании этого ресурса и увеличение роли природного газа

в промышленности страны за последние годы, уголь все также остается серьезным игроком на рынке природных ископаемых и имеет важное значение в развитии страны. Среди стран — лидеров по добыче угля наша страна многие годы занимает 6 место [1], а поскольку в энергетическом

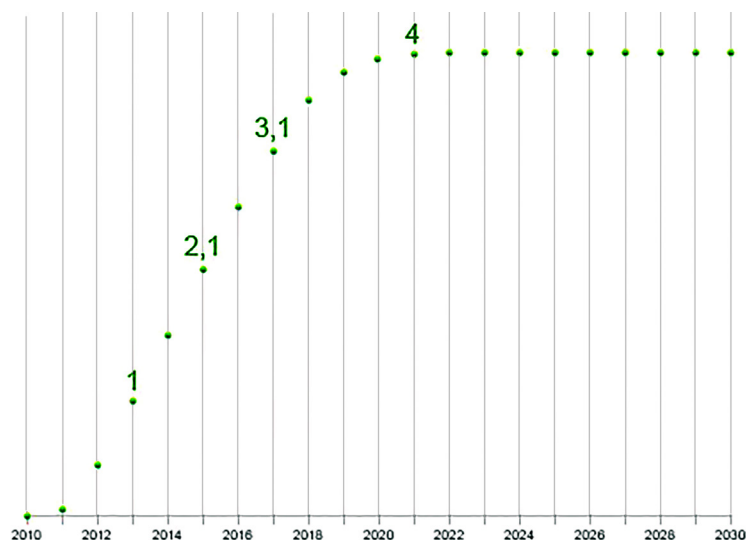


Рис. 1. Объемы добычи шахтного метана в Кузбассе, млрд м³/ год [4]

балансе страны доля угля составляет 11 % [2], то можно сделать вывод, что выбросы углекислого газа в процессе работы на этом топливе остаются внушительными. Стоит подчеркнуть, что эти выбросы помимо непосредственного сжигания угля появляются и при его добыче в виде низкоконцентрированного метана (< 10 %), который выбрасывается в атмосферу без эффективного дополнительного использования.

Метан, будучи антропогенным парниковым газом и обладающим громадным потенциалом для способствования глобальному потеплению в течение века по сравнению с углекислым газом [3], наносит огромный урон климату планеты — глобальное потепление уже стало экологической проблемой, требующей повышенного внимания. Бешеные темпы развития промышленности приводят к увеличению спроса на источники энергии, что, в свою очередь, вызывает дефицит легкодоступных источников топлива. Противопоставление экономики страны и окружающей среды — это проблема и вызов для развития России, но концепция низкоуглеродного перехода энергетики страны должна привести к сокращению вредных выбросов в атмосферу.

Рассмотрим шахтный метан, побочный продукт угледобычи, в качестве кандидата для низкоуглеродного перехода энергетической системы. Выбросы углерода при сжигании или утилизации шахтного метана, по сравнению с ископаемым топливом, намного ниже, есть возможность использовать как запасное топливо, компенсация нехватки возобновляемых источников энергии — вот 3 составляющих, которые позволят защитить окружающую среду и увеличить экономический эффект от его использования.

Прогнозируемые объемы метана в основных угольных бассейнах России, таких как Кузбасс и Печорский район, — 49 трлн м³, что составляет примерно 20 % от прогнозируемых ресурсов природного газа в России. На данный момент времени ежегодно только 0,5 млрд м³ метана/год удаляется системами шахтной дегазации [4].

Важно отметить, что процесс целенаправленной добычи шахтного метана все-таки был запущен в Кузбассе на одном из месторождений и начал давать свои плоды — за последние годы добыто более 10 млрд м³ шахтного метана. Подземная добыча метана угольных пластов, объем и коэффициент использования в России с 2008 по 2020 год показаны на рис. 1.

Итоговый объем потребления топливно-энергетических ресурсов в РФ

Топливо-энергетический ресурс	2017	2018	2019	2020
Всего (в том числе по видам топлива и энергии, процентов), млн т условного топлива в угольном эквиваленте	923	945	933	885
Электричество	36,5	36,7	37,0	38,2
Газообразное топливо	22,2	23,8	23,7	22,6
Тепло	18,2	18,1	17,8	18,4
Жидкое топливо	17,2	16,2	16,4	16,2
Кокс, уголь, торф	4,7	4,2	4,0	3,8
Биомасса и отходы	0,7	0,8	0,9	0,8

Низкоконцентрированный метан (< 30 об. %) из подземных шахт очень тяжело утилизировать ввиду переменчивых условий источника газа, а также сокращений обычных методов сжигания. Метановая генерация энергии в качестве ядра при реализации энергетической системы в угольной шахте уменьшает ее потребность в энергии, что дает экономическую и экологическую выгоду.

Одним из способов эффективного использования запаса отходов при производстве топлива является производство биогаза. Его производство не увеличивает концентрацию углекислого газа в атмосфере, а значит, целесообразно его применять для борьбы с глобальным потеплением и уничтожением отходов. Биогаз получается из биомассы, содержа в себе метан от 45 до 70 % [5]. Несмотря на то, что Российская Федерация обладает огромными ресурсами биомассы, страна их использует мало, как показано в табл. 1 [6].

И хотя на сегодняшний день и нет идеальной схемы развития энергетики страны, основанной на использовании биомассы, а также присутствуют финансовые трудности, использование биогаза как источника электроэнергии позволит быстро перерабатывать отходы сельского и лесного хозяйства, уменьшая выбросы углерода, а значит, сокращая риски потенциальных пожаров и вреда окружающей среде, что, несомненно, вызовет положительный эффект для экономики и экологии в стране.

Метан можно использовать как источник энергии, поэтому грамотное получение и применение его позволит сберечь как энергию, так и окружающую среду. Представим систему совместного производства на основе отбензиненного метана и биогаза для выработки электроэнергии в угольных шахтах. Биогаз в зависимости от концентрации метана (от низкой до достаточно большой) контролируется вводится в вышележащий поток метана, тем самым достигается нужная степень смешанного газа, который в дальнейшем производит электроэнергию. Также можно устранить затруднения с нестабильными источниками шахтного газа. Данный способ поможет сократить выбросы парниковых газов и повысить энергоэффективность, перейдя на чистую энергию.

Материалы и методы исследования

Шахтный метан, образующийся в процессе добычи угля, сохраняется в угольном пласте и прилегающих слоях породы. Количество газа, выделяемого в результате горных работ, определяется рангом угля и глубиной залегания в угольном пласте. Как чистая энергия с высокой теплотворной способностью он привлекает все большее внимание, но он также представляет большую опасность при добыче в угольных шахтах. Внезапные взрывы и вспышки газа представляют серьезную опасность для шахтеров, особенно в Кузбасском угольном бассейне. При

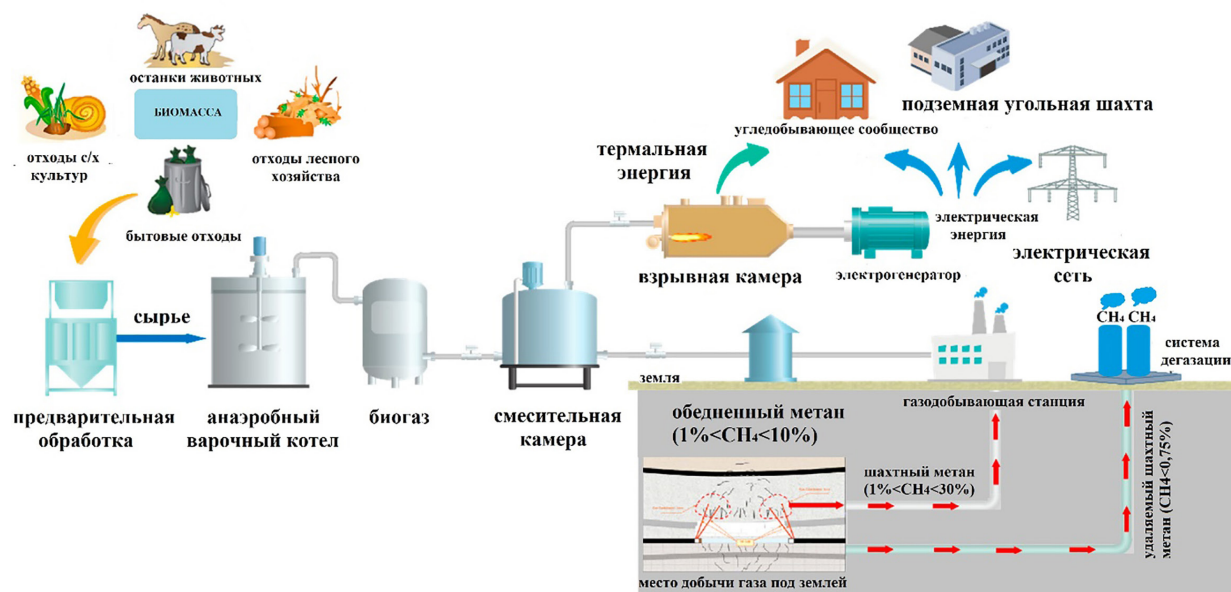


Рис. 2. Система совместного производства с бедным метаном и биогазом для выработки электроэнергии

стабильной подземной добыче угля в России в среднем 105 млн т в год [7] количество аварий доходило до 34 случаев. Поэтому добыча шахтного метана ведется в соответствии с правилами безопасности на угольных шахтах для обеспечения безопасности шахтеров.

Применимость технологий утилизации шахтного метана в основном зависит от концентрации метана. В целом его можно классифицировать следующим образом: метан высокой концентрации ($CH_4 > 80\%$), метан средней концентрации ($CH_4 > 30\%$), метан низкой концентрации ($10\% < CH_4 < 30\%$), метан обедненной концентрации ($1\% < CH_4 < 10\%$) и метан вентиляционного воздуха ($CH_4 < 1\%$).

Шахтный метан с концентрацией менее 10 % составляет 83 % от общего объема шахтного метана, но из-за риска взрыва и неудобства традиционного способа сжигания огромная часть этого неиспользованного метана попадает прямо в атмосферу, загрязняя воздух, при этом теряется большое количество чистой энергии. Необходимы мероприятия для повышения эффективности использования этого обедненного метана для

решения проблемы с энергетическим и экологическим ущербом.

Как страна с богатым сельскохозяйственным производством, Россия обладает богатыми ресурсами биомассы, которые в основном состоят из зерновых, лесных культур и их побочных продуктов, остатков животноводства и органических фракций твердых бытовых отходов (ТБО). Сельское хозяйство в России за 2020 год обеспечило 63 млн т CO_2 -эквивалента в год в виде выбросов в окружающую среду и составило почти столько же, как от добычи твердых ископаемых топлив [6], что говорит о серьезном потенциале для работы по снижению таких выбросов. Биогаз, образующийся с разными концентрациями в процессе ферментации (обычно содержание метана 45–70 %), — это возобновляемый источник энергии, при его использовании для получения энергии снижается зависимость от рынков ископаемого топлива. Его остатки можно использовать как удобрения, повышая урожайность, что, несомненно, положительно скажется на экологическом развитии страны. Анализ имеющихся биогазовых установок выявил, что солома как сырье для производ-

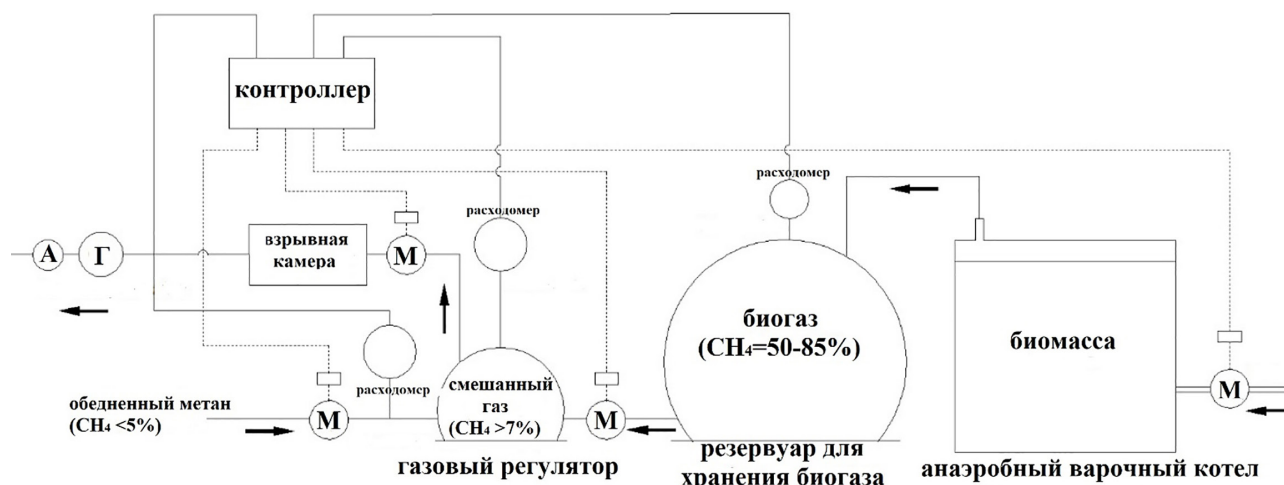


Рис. 3. Система управления совместным производством бедного метана и биогаза в угольных шахтах

ства биогаза — главная доминирующая культура, которая не загрязняет окружающую среду, а также защищает от лесных пожаров. Если использовать собранную в районе добычи топлива сельскохозяйственную солому как сырье для биомассы, можно получить значительный экономический эффект, экономя на транспортировке.

Система производства электроэнергии требует содержания метана до 7 % в смешанном газе. С практической точки зрения в большинстве случаев концентрация бедного метана ниже 5 %, а в части случаев концентрация метана резко меняется, вследствие чего значительная часть метана просто выбрасывается в атмосферный воздух и не будет эффективно использована.

Представим систему совместного производства на основе бедного метана и биогаза для выработки электроэнергии в угольных шахтах (рис. 2) для повышения энергоэффективности.

Данная система позволяет реализовывать полное использование энергии отходов, повышает процент использования обедненного метана, сокращает дефицит и создает устойчивое энергоснабжение. Принцип управления системой совместного производства показан на рис. 3.

Датчики расхода и концентрации непрерывно в режиме реального времени следят за колебани-

ями метана, аналогично происходит контроль за впрыскиваемой в анаэробный реактор биомассой и выходом биогаза.

После подмешивания в трубопровод биогаза с низкой концентрацией метана в резервуаре для хранения биогаза происходит его буферизация. Возможно постепенное открытие и закрытие клапана при помощи контроллера, что позволит системе следить и при необходимости менять концентрацию смешанного газа, необходимой для выработки двигателями, работающими на метане, электроэнергии. В случае изменения концентрации обедненного метана и биогаза система мониторинга газового регулятора будет регулировать скорость всасываемого потока, чтобы получить необходимую концентрацию метана. Это позволит обеспечить стабильную работу источника газа, а системе выработки электроэнергии функционировать без сбоев.

Производимый биогаз образуется из различного сырья, такого как зерновые и лесные культуры, отходы животноводства и бытовые отходы. С помощью анаэробного сбраживания данных отходов получается энергия, сокращающая вредные выбросы метана в окружающую среду. В зависимости от вида сырья меняется и потенциальная эффективность производства газа.

Россия является одним из крупнейших производителей зерна, выращивает его в том числе и в районах, богатых углем, поэтому недостатка в зерновых культурах, например в соломе, в стране нет. И хотя при ее сжигании образуются различные вредные вещества, такие как пыль, оксид азота и диоксид серы, солома, собранная рядом с местом добычи угля, может быть сырьем для поддержания поставок биогаза, что повысит эффективность использования биомассы. Одновременно снизится риск загрязнения атмосферы из-за сжигания соломы на открытом пространстве.

Теплотворная способность биогаза напрямую зависит от содержания в нем метана (теплотворная способность самого метана обычно равна 20–26 МДж/Нм³). В целом на каждую тонну произведенного зерна приходится 1,5 тонны соломы. Объем соломы, который может быть использован, равняется максимальному объему соломы, собранной с поля. Для целей добычи биогаза на угольных шахтах можно рассчитать общую урожайность соломы (1) как отношение всего объема таких ресурсов к коэффициенту их собираемости:

$$V_{\text{сол}} = V_{\text{с.б}}/K_{\text{соб}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{сол}}$ — общая урожайность соломы, т;

$V_{\text{с.б}}$ — требуемый объем ресурсов соломы для производства биогаза, т;

$K_{\text{соб}}$ — коэффициент собираемости соломы, равный 0,84 [8].

Общая же площадь сельхозугодий, необходимых для добычи биогаза из соломы, определяется как отношение общей урожайности, выраженной в тоннах соломы к урожайности с одного квадратного метра (2):

$$S_{\text{с/х}} = V_{\text{сол}}/V_{\text{ед}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{с/х}}$ — общая площадь сельскохозяйственных угодий, м²;

$V_{\text{сол}}$ — общая урожайность соломы, т;

$V_{\text{ед}}$ — единичная урожайность соломы, т/м².

Потенциал выработки электроэнергии можно определить следующим образом. Добыча угля считается энергоемким процессом, который требует значительных затрат электроэнергии для работы оборудования (горные машины, обогатительные устройства, конвейеры подачи угля), работающего круглосуточно. Установка метановых электростанций на шахтах повысит утилизацию выбросов метана и уменьшит электропотребление при производстве работ. Электрическая энергия (кВт·ч), которая может быть получена системой совместного производства, оценивается как:

$$P = (V_{\text{ут CH}_4} \cdot C_{\text{CH}_4} \cdot \rho \cdot Q \cdot \lambda \cdot \eta)/3,5, \quad (3)$$

где P — суммарная электрическая энергия при системе совместного производства;

Q — теплотворная способность топлива (для CH₄ принимается равным 48 МДж/кг [9]);

$V_{\text{ут CH}_4}$ — объем утилизации CH₄ в системе совместного производства, м³;

C_{CH_4} — содержание метана, об%;

ρ — плотность CH₄ (принимается равным 0,66 кг/м³);

λ — концентрация метана, 95 %;

3,5 — коэффициент преобразования из МДж в кВт·ч, где η задается 35 % как КПД генератора.

Результаты исследования и их обсуждение

Комплексный анализ системы совместного производства позволил установить следующие положения. Первое — это экономия энергии. Добыча угля потребляет много энергии во время производства и в то же время выбрасывает большое количество шахтного метана от дегазационных установок, который может быть использован для выработки электроэнергии через систему совместного производства энергии. Большинство основных угольных шахт в России являются шахтами

с высоким содержанием сопутствующих газов и относительно богаты метаном угольных пластов.

В отличие от шахтного метана с концентрацией более 30 %, который можно эффективно использовать сразу, обедненный метан из-за непостоянной концентрации метановой составляющей использовать затруднительно, вследствие чего большая часть потенциального ресурса выбрасывается в окружающую среду и загрязняет ее. С учетом больших объемов соломы и других сельскохозяйственных отходов поблизости от угольных разрезов необходимо развивать биогазовую систему и повышать коэффициент использования биогазовой энергии как альтернативных источников электроэнергии.

В заключение следует отметить, что организация системы, совмещающей использование бедного метана и биогаза, поможет достичь рационального использования ресурсов, их экономии, снижения выбросов парниковых газов, обеспечения промышленной безопасности при эксплуатации такого опасного производственного объекта, как угольная шахта. Также сбор органических отходов, в первую очередь представленных соломой, позволит снизить риск пожаров, сократить площади ее хранения, придать ценности энергии, полученной из отходов.

Экологическая составляющая представленной технологии также несомненна [10] ввиду рационального и бережного отношения к ресурсам, в том числе возобновляемым. Значительное использование ископаемых видов энергии приводит к сильному загрязнению окружающей среды, особенно к большим выбросам парниковых газов, таких как CO_2 , поэтому технологии, дающие низкий выброс углекислого газа и прочих парниковых газов, должны рассматриваться как приоритетные и способствующие сохранению природы планеты в целом.

Концепция зеленого перехода промышленности и экономики России планомерно развивается и нуждается в энергосберегающих малоотходных технологиях и технологиях, использующих невос-

требованное или вторичное сырье [11], таких как представленная система производства электроэнергии из биогаза и бедных метановоздушных смесей. Утилизация бедного метана в генераторе производства электроэнергии из биогаза – это очень хороший способ снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду, снизить эксплуатационные расходы, получить субсидии для реализации зеленых технологий, толчок к совершенствованию котельного оборудования, расположенного на шахтах, но рискованный с точки зрения взрывоопасности метановоздушных смесей, логистических цепочек, технологических особенностей, законодательства и прибыльности.

Выводы

Одним из главных источников выбросов газа в атмосферу является метан угольных шахт, обладающий высоким парниковым эффектом, поэтому необходимо провести экологические мероприятия по сокращению выбросов метана в атмосферу при добыче угля. Предлагается использовать систему совместного использования обедненного метана угольных пластов и биогаза для выработки электроэнергии на угольных шахтах — это позволит сберечь энергию, повысить эффективность развития производства и защитить атмосферу от вредных выбросов.

Было подобрано такое количество биогаза, которое необходимо для работы системы, а также соответствующая площадь сельскохозяйственных угодий и количество соломы, что доказывает целесообразность внедрения системы совместного производства в горнодобывающем районе. Кроме того, была проведена оценка потенциального производства электроэнергии и сокращения парникового эффекта. Рассмотренная система может эффективно интегрировать региональные ресурсы, превратить отходы в богатство, реализовать энергосбережение, сокращение выбросов и устойчивую чистую энергию на угольных шахтах.

Для энергосбережения в районах угольных шахт и замены нынешних источников тепла и электричества в шахтах рекомендуется использование системы совместного производства, что повысит эффективность использования электроэнергии изолированных ресурсов в районе угольных шахт, принесет экономический эффект угледобывающим предприятиям, сократит выбросы в атмосферу таких вредных веществ, как углерод и метан, и будет полностью соответствовать политике РФ в области экологии окружающей среды.

Библиографический список

1. Global coal production slumps in 2020. Yet looks to increase in 2021. — URL: <https://www.iea.org/reports/coal-2020/supply> (дата обращения: 12 января 2022).
2. Statistical Review of World Energy 2022/71st edition. — URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf> (дата обращения: 28.06.2022).
3. IPCC Climate Change 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III, Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014. — P. 151.
4. О перспективах добычи в России угольного газа. — URL: <https://www.gazprom.ru/about/production/extraction/metan/?ysclid=lh66my8nfp78333850> (дата обращения: 11.11.2022).
5. Биогaz из соломы. — URL: <https://zorg-biogaz.com/ru/blog/biogaz-iz-solomy> (дата обращения: 27.01.2023).
6. Охрана окружающей среды в России. — М.: Стат. сб. / Росстат, 2022. — 115 с.
7. Анализ аварийности и пожароопасности угольных шахт // Вестник. — 2018. — № 4. — 39 с.
8. Михалев С. С. Кормопроизводство с основами земледелия / С. С. Михалев, Н. Ф. Хохлов, Н. Н. Лазарев. — М.: ИНФРА-М, 2021. — С. 259–261.
9. Удельная теплота сгорания топлива и горючих материалов. — URL: <http://thermalinfo.ru/eto-interesno/udelnaya-teplota-sgoraniya-topliva-i-goryuchih-materialov#teplota-sgoraniya-gazoobraznogo-topliva> (дата обращения: 05.04.2023).
10. Харитоненко А. Л. Влияние технологий по очистке резервуаров от нефтепродуктов на окружающую / А. Л. Харитоненко, Я. В. Зачиняев, Т. С. Титова и др. // Экологическая химия. — 2013. — Т. 22. — № 4. — С. 198–202.
11. Машарский Б. Л. Безопасность жизнедеятельности. Законодательные и нормативно-правовые акты по промышленной безопасности, охране труда и экологии / Б. Л. Машарский, О. И. Тихомиров, А. Б. Завьялов // Электронный практикум. — СПб., 2022.

Дата поступления: 10.07.2023

Решение о публикации: 28.08.2023

Контактная информация:

ХАРИТОНЕНКО Александр Леонидович — канд. техн. наук, доц.; tsar-87@mail.ru
 ЗАВЬЯЛОВ Алексей Борисович — ассистент, аспирант; zenitpiter91@inbox.ru
 ЗАЧИНЯЕВ Ярослав Васильевич — д-р хим. наук, проф.; iaroslavas@hotmail.com

A System for the Joint Use of Coalbed Lean Methane and Biogas to Generate Electricity in Coal Mines

A. L. Kharitonenko¹, A. B. Zavyalov¹, Ya. V. Zachinyaev²

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

²Petrozavodsk State University, 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, 185910, Russian Federation

For citation: Kharitonenko A. L., Zavyalov A. B., Zachinyaev Ya. V. A System for the Joint Use of Coalbed Lean Methane and Biogas to Generate Electricity in Coal Mines // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 595–603. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-595-603

Summary

Purpose: Justification and development of new resource-saving technologies aimed at utilization of coal bed methane. The problem of low efficiency of utilization of lean methane-air mixtures is primarily due to the low content of methane itself, which varies significantly depending on the type of coal or concentration. This paper discusses the concept of a co-production system that mixes low-methane methane-air mixtures and biogas to generate power. **Methods:** Analysis of the possible volumes of utilized methane, biogas requirements and the suitability of the primary feedstock for co-generation of heat and electricity. Selection of appropriate parameters for the processes of utilization of mine methane. Analysis of the merits of the proposed method of utilization of lean coal mine methane. **Results:** It is recommended that biogas produced by agriculture and forestry in the vicinity of the mines be added to the dry methane stream to obtain the necessary gas concentration for electricity generation. Potential electricity production and greenhouse gas emission reductions have also been evaluated. The result shows that the co-production system can significantly improve the efficiency of poor methane-air mixtures in coal mines. **Practical significance:** The joint use of lean methane and biogas from straw offers practical advantages both economically, ensuring sufficient energy supply in mines, and as a foundation for broad future prospects. It allows for energy cost reduction and environmental pollution reduction, such as decreasing carbon dioxide emissions.

Keywords: Coalbed methane, methane-air mixtures, biogas, power generation, resource conservation, emission reduction, low-carbon systems.

References

1. Global coal production slumps in 2020. Yet looks to increase in 2021. Available at: <https://www.iea.org/reports/coal-2020/supply> (accessed: January 12, 2022).
2. Statistical Review of World Energy 2022/71st edition. Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf> (accessed: June 28, 2022).
3. IPCC Climate Change 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III, Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014, p. 151.
4. *O perspektivah dobychi v Rossii ugol'nogo gaza* [On the prospects for coal gas production in Russia]. Available at: <https://www.gazprom.ru/about/production/extraction/metan/?ysclid=lh66my8nfp78333850> (accessed: November 11, 2022).
5. *Biogaz iz solomy* [biogas from straw]. Available at: <https://zorg-biogaz.com/ru/blog/biogaz-iz-solomy> (accessed: January 27, 2022).
6. *Okhrana okruzhayushchey sredy v Rossii* [Environmental Protection in Russia]. Moscow: Stat. sb. / Rosstat, 2022, p. 115. (In Russian)
7. Analiz avariynosti i pozharoopasnosti ugol'nykh shakht [Analysis of accident rate and fire hazard in coal mines]. *Vestnik* [Bulletin]. 2018, Iss. 4, p. 39. (In Russian)
8. Mixalev S. S., Hohlov N. F., Lazarev N. N. *Kormo-proizvodstvo s osnovami zemledeliya* [Fodder production with the basics of farming]. Moscow: INFRA-M Publ., 2021, pp. 259–261. (In Russian)
9. *Udel'naya teplota sgoraniya topliva i goryuchih materialov* [Specific heat of combustion of fuel and combustibles]. Available at: <http://thermalinfo.ru/eto-interesno/udel'naya-teplota-sgoraniya-topliva-i-goryuchih-materialov#teplota-sgoraniya-gazobraznogo-topliva> (accessed: March 5, 2023).
10. Haritonenko A. L., Zachinyaev Ya. V., Titova T. S. et al. Vliyanie texnologij po ochistke rezervuarov ot nefteproduktov na okruzhayushchuyu [Impact of oil tank cleaning technologies on the environment]. *Ekologicheskaya khimiya* [Ecological chemistry]. 2013, vol. 22, Iss. 4, pp. 198–202. (In Russian)
11. Masharskij B. L., Tixomirov O. I., Zav'yalov A. B. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Zakonodatel'ny'e i normativno-pravovyye akty po promy'shlennoj bezopasnosti, ohrane truda i ekologii [Life safety. Legislative and Regulatory Acts on Industrial Safety, Labor Protection and Ecology]. *E'lektronnyj praktikum* [Electronic workshop]. St. Petersburg, 2022. (In Russian)

Received: July 10, 2023

Accepted: August 28, 2023

Author's information:

Alexander L. KHARITONENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; tsar-87@mail.ru

Alexey B. ZAVYALOV — Assistant, Postgraduate Student; zenitpiter91@inbox.ru

Yaroslav V. ZACHINYAEV — Dr. Sci. in Chemistry, Professor; iaroslavvas@hotmail.com

УДК 628.3

Рациональное соотношение качества воды водного объекта и качества сбрасываемых сточных вод

Н. А. Черников, А. В. Кудрявцев

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

Для цитирования: Черников Н. А., Кудрявцев А. В. Рациональное соотношение качества воды водного объекта и качества сбрасываемых сточных вод // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 604–613. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-604-613

Аннотация

Цель: Разработка методики определения рационального соотношения между качеством воды водных объектов и качеством сбрасываемых в них сточных вод при имеющихся инвестициях на реконструкцию систем обработки производственных сточных вод нескольких водопользователей одного водного бассейна. **Методы:** Аналитическое решение задачи определения оптимальной чистоты воды в реке в условиях реализации водоохраных мероприятий при ограниченных финансовых средствах и рациональном их распределении между водопользователями. **Результаты:** Относительные финансовые ресурсы на водоохраные мероприятия в Российской Федерации недостаточны и в то же время сокращаются на протяжении последних 30 лет. Несмотря на это, предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в сточных водах, сбрасываемых в водные объекты и в системы водоотведения, в Российской Федерации зачастую устанавливаются очень жесткие, иногда даже жестче, чем для питьевой воды, что приводит к неоправданным инвестиционным затратам. Отмечается также, что в настоящее время в Российской Федерации еще не сформированы полностью рыночные отношения в области природопользования, в том числе в области водопользования. Обозначены основные трудности реализации этих отношений в нашей стране. С помощью предложенной методики на конкретном примере определено обоснованное соотношение между качеством воды водотока и качеством сбрасываемых в них сточных вод, а также рациональное распределение финансирования между водопользователями. Показано, что экономически обоснованными требованиями к стокам, сбрасываемым в водный объект, являются фоновые концентрации загрязняющих веществ в воде данного водного объекта. **Практическая значимость:** На примере рассмотрена практическая реализуемость предложенной методики, которая может быть рекомендована к практическому применению.

Ключевые слова: Качество воды водных объектов, водотоки, водопользователи, индекс чистоты воды, концентрация загрязняющих веществ, показатель экологической эффективности, предельно допустимый сброс, финансирование водоохраных мероприятий.

Введение

При проведении любых мероприятий, а тем более таких дорогостоящих, как охрана водных ресурсов, нужно учитывать объем инвестиций, необходимых для реализации этих мероприятий.

Между тем в проекте Федеральной целевой программы развития транспорта Российской

Федерации до 2035 года [1], Федеральном законе №416-ФЗ «О водоснабжении и водоотведении» [2] и многих других действующих нормативных документах экономическое обоснование постоянно возрастающих требований по сбросу предварительно очищенных сточных вод в водные объекты, как правило, не приводится.

Основной аргументацией по внедрению этих требований является необходимость соблюдения в воде водных объектов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ (ПДК), то есть такого их количества, которое не влияет пагубно на здоровье человека, а также не нарушает равновесие биоценоза в водоеме [4–6].

Вопрос о нецелесообразности введения высоких требований к качеству сточных вод, сбрасываемых в водоемы, при недостаточном финансировании мероприятий по охране водных ресурсов, обсуждается в Российской Федерации на протяжении многих лет.

Авторы считают необходимым остановиться на основных негативных аспектах водоохранных мероприятий в Российской Федерации в настоящее время:

- недостаточное выделение финансовых средств на проведение мероприятий по охране водных ресурсов [3–7];
- очень жесткие требования к качеству предварительно очищенных сточных вод, сбрасываемых в водоемы, а также в водоотводящие системы [8–10];
- отсутствие рыночных отношений в водоохранной сфере деятельности [10].

Существующее мнение некоторых специалистов о том, что система штрафов может быть эффективной в современных условиях развития отрасли водоподготовки и охраны водных ресурсов, не выдерживает критики. Штрафная система может стать таковой только в том случае, если она будет стимулировать внедрение новых технологий, т. е. если водопользователи смогут выбирать между улучшением производства и уплатой штрафа. В настоящее время такой возможности нет из-за недостатка финансирования.

Целью данного исследования является разработка методики определения экономически обоснованного соотношения между качеством сточных вод и качеством воды водного объекта

при общих финансовых затратах на водоохраные мероприятия, доступных нескольким водопользователям в водном бассейне.

В ходе исследования были рассмотрены следующие вопросы [8, 10]:

- определение зависимости концентраций загрязняющих веществ в расчетном створе водного объекта C_p после разбавления и смешения очищенных стоков нескольких водопользователей с концентрациями загрязнений C_i и воды водных объектов с фоновыми концентрациями загрязнений C_{ϕ} ;
- определение экономически обоснованного качества очищенных сточных вод для каждого водопользователя водного бассейна в рамках общих финансовых затрат при их рациональном распределении между водопользователями;
- определение экономической эффективности предлагаемой методики при условии ее применения для очистки промышленных сточных вод вагонных и локомотивных депо в Российской Федерации.

Методика определения рационального соотношения между качеством воды водного объекта и качеством сбрасываемых сточных вод состоит в последовательной реализации следующих задач [10, 11]:

- выбрать лимитирующее загрязняющее вещество в сточных водах промышленных предприятий, т. е. такое, которое наиболее трудно удалить до предельно допустимой концентрации (ПДК). Например, в локомотивных и вагонных депо железнодорожного транспорта таким загрязняющим веществом обычно являются нефтепродукты;
- на основании известных зависимостей по определению смешения и разбавления сточных вод в водном объекте и финансовых затрат на очистку воды составляется таблица качества воды I_p водного объекта и общей суммы финансовых ресурсов, необходимых

для водопользователей на водоохранные мероприятия;

– определить показатель чистоты воды водного объекта I_p при различных значениях качества сточных вод водопользователей I_j и объеме финансовых средств, которыми располагают водопользователи Π [10]; занести результаты в таблицу;

– используя табличные данные, определить оптимальное значение показателя чистоты воды водного объекта после сброса сточных вод водопользователя, $I_p = f(I_j)$, млн руб/год, при имеющихся средствах и соответствующих параметрах (I_j, I_p, Π_j);

– построить график изменения показателя чистоты воды водного объекта после сброса сточных вод водопользователями I_p ;

– на основании этих данных определить рациональное качество воды водного объекта после проведения водопользователями мероприятий по охране водных ресурсов.

Концентрация i -го загрязняющего вещества в расчетном створе водного объекта после сброса сточных вод, разбавления и перемешивания определяется уравнением (мг/л):

$$C_{pi} = \frac{\sum_j^n c_i q_j + c_{i\phi} Q_p}{\sum_j^n q_j + Q_p}, \quad (1)$$

где c_i и $c_{i\phi}$ — концентрация i -го загрязняющего вещества в сточных водах водопользователя и его фоновая концентрация в воде реки, мг/л;

q_j и Q_p — расход сточных вод j -го водопользователя и водотока, м³/ч.

Вместо концентрации загрязняющего вещества C_i и индекса загрязнения воды можно использовать такое понятие, как индекс чистоты воды I [10]:

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{\text{ПДК}_i}{C_i}, \quad (2)$$

где ПДК_i и C_i — предельно допустимая и расчетная концентрации i -го загрязняющего вещества в воде.

Рассмотрим пример в соответствии с приведенной методикой расчета.

Исходные данные: в примере для удобства иллюстрации задачи рассматриваются два водопользователя и одно лимитирующее загрязняющее вещество (нефтепродукты с $\text{ПДК}_{\text{нп}} = 0,05$ мг/л) [11, 12].

Расход, м³/ч:

водоток до сброса в него сточных вод —

$$Q_p = 8000;$$

1-й водопользователь — $q_1 = 10$;

2-й водопользователь — $q_2 = 50$.

Предельно допустимая концентрация нефтепродуктов в воде ($\text{ПДК}_{\text{нп}} = 0,05$ мг/л).

Необходимо определить: наилучшее качество воды в водном объекте и рациональное распределение имеющихся финансовых затрат на водоохранные мероприятия (в примере $\Pi = 20$ млн р/год) между двумя водопользователями одного водного бассейна после сброса в него очищенных сточных вод:

ТАБЛИЦА 1

Вода	Концентрация нефтепродуктов, мг/л		Индекс чистоты воды (ИЧВ)	
В водотоке (в реке) до проведения водоохраных мероприятий (фон)	C_ϕ	0,05	I_ϕ	1
1-й водопользователь	C_1	0,25	I_1	0,2
2-й водопользователь	C_2	0,25	I_2	0,2

I_1 — индекс чистоты воды первого водопользователя;

I_2 — индекс чистоты воды второго водопользователя;

I_p — показатель чистоты воды водотока в контрольном створе;

Π_1 — годовые затраты на водоохранные мероприятия 1-го водопользователя, млн руб. в год;

Π_2 — годовые затраты на водоохранные мероприятия 2-го водопользователя, млн руб. в год;

$\Pi_1 + \Pi_2$ — суммарные годовые затраты на водоохранные мероприятия 1-го и 2-го водопользователей, млн руб/год.

Построить: график и гистограмму, содержащие показатели чистоты воды водотока после сброса сточных вод водопользователями I_p и суммарные инвестиции в водоохранные мероприятия первого и второго водопользователей $\Pi_1 + \Pi_2$.

Задача решается на основе целевой функции (3) и ограничений (4, 5) [8, 12]:

$$\text{Целевая функция } I_p = f(I_i) \rightarrow \max; \quad (3)$$

$$\text{Ограничения } \sum(P_i \cdot I_i) \leq \Pi; \quad (4)$$

$$I_i \geq 0. \quad (5)$$

Водопользователи стремятся к максимальному значению функции $I_p = f(I_i)$, где I_i — показатель чистоты стоков водопользователя. При этом на практике, как правило, предприятия ограничены в финансовых средствах на охрану водных ресурсов. Часть общих для водного бассейна инвестиций вкладывается в улучшение качества стоков одного предприятия, часть — в улучшение качества стоков другого предприятия и т. д. Предположим также, что P_i — это цена за улучшение «чистоты воды» сточных вод предприятий.

Концентрация i -го загрязняющего вещества в воде водотока после сброса сточных вод, их раз-

бавления и смешивания определяется по уравнению (1).

Приведенные затраты на реализацию водоохраных мероприятий для водопользователей (Π , млн руб/год) определяются в зависимости от производительности очистных сооружений и концентрации лимитирующего загрязняющего вещества после очистки сточных вод по следующей формуле [13]:

$$\Pi = K_{\text{и}}(a + bq_{\text{ос}}^c K_{\text{ост}}), \quad (6)$$

где $K_{\text{и}}$ — коэффициент инфляции, учитывающий изменение стоимости очистных сооружений; $q_{\text{ос}}^c$ — максимальный часовой расход сточных вод, поступающих на производственные очистные сооружения, м³/ч;

$K_{\text{ост}}$ — остаточная концентрация лимитирующего загрязняющего вещества (нефтепродуктов) в сточных водах, очищенных на очистных сооружениях водопользователей, мг/л;

a , b и c — эмпирические коэффициенты.

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

I_p водного объекта после сброса стоков водопользователями приведен в табл. 3.

В данном примере при имеющихся инвестициях $\Pi = 20$ млн руб/год наилучшее качество воды (I_p) водного объекта после сброса сточных вод может быть обеспечено за счет реализации мероприятий по реконструкции систем очистки сточных вод первого и второго водопользователей при данных, приведенных в табл. 4.

Взаимозависимость концентрации лимитирующего загрязняющего вещества в водном объекте до сброса сточных вод (фоновой концентрации), концентрации лимитирующего загрязняющего вещества в водном объекте после сброса сточных вод и финансовых затрат на реализацию мероприятий по охране чистоты воды представлена на рис. 2, а, б.

ТАБЛИЦА 2. I_p водного объекта (строка 1) и общий объем финансовых средств, необходимых для проведения мероприятий по охране водных ресурсов для водопользователей 1 и 2 (строка 2)

I_1 , млн.р./год	C_1 , мг/л	I_1	I_p при	I_p при	I_p при	I_p при	I_p при	I_p при	I_p при	I_p при	I_p при	I_p при	I_p при
			$I_2=0,1$	$I_2=0,2$	$I_2=0,3$	$I_2=0,4$	$I_2=0,5$	$I_2=0,6$	$I_2=0,7$	$I_2=0,8$	$I_2=0,9$	$I_2=1$	
8,90	0,025	$I_1 = 2,0$ $П_{2,0}$	0,948	0,976	0,986	0,991	0,994	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8,62	0,026	$I_1 = 1,9$ $П_{1,9}$	0,948	0,976	0,986	0,991	0,994	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8,34	0,028	$I_1 = 1,8$ $П_{1,8}$	0,948	0,976	0,986	0,991	0,994	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8,05	0,029	$I_1 = 1,7$ $П_{1,7}$	0,948	0,976	0,986	0,991	0,994	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7,75	0,031	$I_1 = 1,6$ $П_{1,6}$	0,948	0,976	0,986	0,991	0,994	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7,45	0,033	$I_1 = 1,5$ $П_{1,5}$	0,947	0,976	0,986	0,991	0,994	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7,14	0,036	$I_1 = 1,4$ $П_{1,4}$	0,947	0,976	0,986	0,991	0,994	0,996	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6,82	0,038	$I_1 = 1,3$ $П_{1,3}$	0,947	0,976	0,986	0,991	0,994	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6,49	0,042	$I_1 = 1,2$ $П_{1,2}$	0,947	0,976	0,986	0,991	0,994	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6,16	0,045	$I_1 = 1,1$ $П_{1,1}$	0,947	0,976	0,986	0,991	0,994	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5,81	0,050	$I_1 = 1,0$ $П_{1,0}$	0,947	0,976	0,986	0,991	0,994	1,00	0,997	1,00	1,00	1,00	1,00
5,44	0,056	$I_1 = 0,9$ $П_{0,9}$	0,947	0,976	0,986	0,991	0,994	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5,07	0,063	$I_1 = 0,8$ $П_{0,8}$	0,947	0,975	0,985	0,990	0,994	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4,67	0,071	$I_1 = 0,7$ $П_{0,7}$	0,947	0,975	0,985	0,990	0,993	0,995	0,997	0,998	0,999	0,999	0,999
4,26	0,083	$I_1 = 0,6$ $П_{0,6}$	0,946	0,975	0,985	0,990	0,993	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3,81	0,100	$I_1 = 0,5$ $П_{0,5}$	0,946	0,975	0,985	0,990	0,993	0,995	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3,34	0,125	$I_1 = 0,4$ $П_{0,4}$	0,945	0,974	0,984	0,989	0,992	0,994	1,00	1,00	0,997	1,00	1,00
2,81	0,167	$I_1 = 0,3$ $П_{0,3}$	0,945	0,973	0,983	0,988	0,991	0,993	0,994	1,00	1,00	1,00	1,00
2,22	0,250	$I_1 = 0,2$ $П_{0,2}$	0,943	0,971	0,981	0,986	0,989	0,991	0,992	0,994	0,994	0,995	0,995
1,50	0,500	$I_1 = 0,1$ $П_{0,1}$	0,94	0,965	0,975	0,980	0,983	0,985	0,986	0,987	0,988	0,989	0,989
		I_2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0
		C_2 , мг/л	0,500	0,250	0,167	0,125	0,100	0,083	0,071	0,063	0,056	0,050	0,050
		$П_2$, млн.р./год	4,22	6,44	8,26	9,87	11,34	12,71	13,99	15,21	16,37	17,49	17,49

ТАБЛИЦА 3

I_2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
I_p			0,991	0,994	0,996	0,997	0,998	0,997	0,995
Π_2			9,87	11,34	12,71	13,99	15,21	16,37	17,49

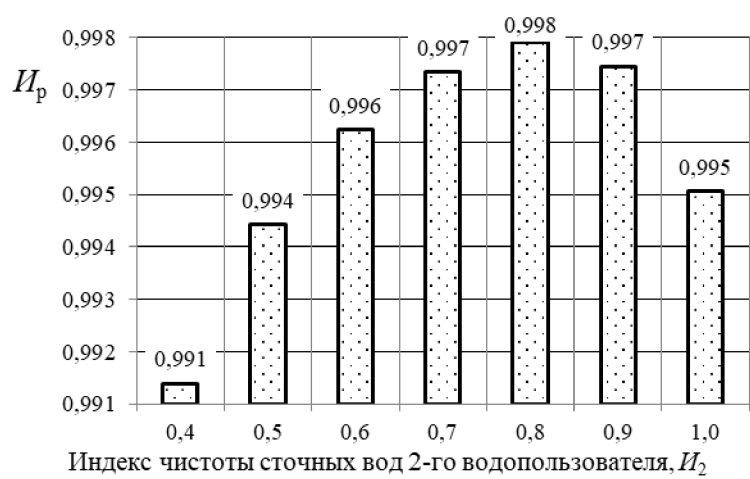


Рис. 1. Показатели чистоты воды в водном объекте после сброса очищенных сточных вод водопользователями

ТАБЛИЦА 4

	Исходные данные, млн руб/год		Результаты расчетов, млн руб/год	
$I_1 = 0,20$	$\Pi_1 = 2,22$	$I_1 = 0,70$	$\Pi_1 = 4,67$	
$I_2 = 0,20$	$\Pi_2 = 6,44$	$I_2 = 0,80$	$\Pi_2 = 15,21$	
$I_p = 0,971$	$\Pi_1 + \Pi_2 = 8,66$	$I_p = 0,998$	$\Pi_1 + \Pi_2 = 19,88$	

ТАБЛИЦА 5

Водоток до сброса сточных вод	$Q_p = 8000 \text{ м}^3/\text{ч}$
1-й водопользователь	$q_1 = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$
2-й водопользователь (локомотивное или вагонное депо)	$q_2 = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$

Из рис. 2, а, б видно, что многократное увеличение финансовых затрат на реализацию мероприятий по охране водных ресурсов практически не уменьшает концентрацию лимитирующего загрязнения в воде водного объекта.

Экономическая эффективность применения предлагаемой методики

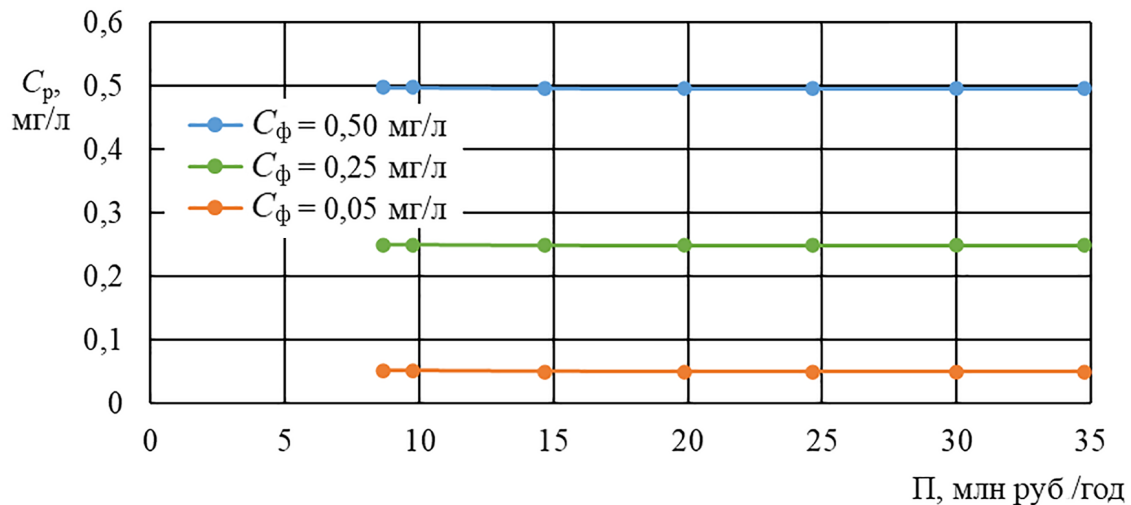
Методика позволяет проанализировать экономические потери, вызванные слишком жесткими

требованиями к сбросу загрязняющих веществ (в нашем случае — нефтепродуктов).

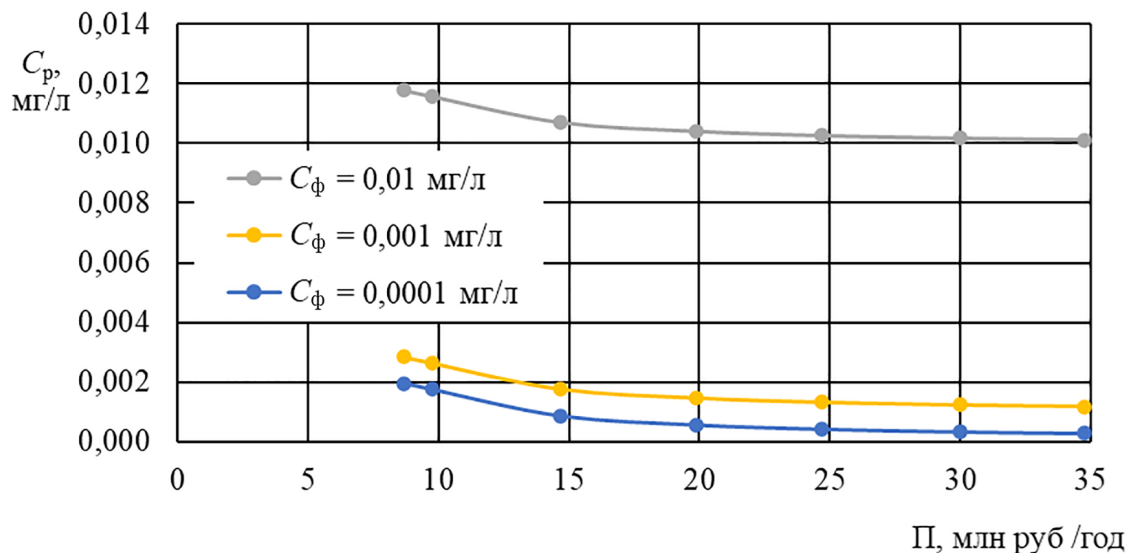
Согласно исходным данным, расход воды для водотоков и водопользователей составляет, табл. 5.

Инвестиции на очистку производственных сточных вод указаны в табл. 6.

В целом экономия средств при очистке производственных стоков до фоновых концентраций по лимитирующему загрязняющему веще-



а



б

Рис. 2. Изменение концентрации нефтепродуктов в реке после сброса сточных вод, C_p

ТАБЛИЦА 6

<i>Очистка сточных вод до ПДК по нефтепродуктам</i>	
Фоновая концентрация нефтепродуктов в воде водного объекта до сброса в него сточных вод водопользователями, мг/л	$C_\phi = 0,50$
Концентрация нефтепродуктов в сточной воде после ее очистки у второго водопользователя, мг/л	$C_2 = 0,050$
Инвестиции на очистку сточных вод у второго водопользователя, млн руб/год (см. табл. 2)	$\Pi_2^{\text{ПДК}} = 17,49$
<i>Очистка сточных вод до фоновых концентраций по нефтепродуктам</i>	
Концентрация нефтепродуктов в воде водного объекта, мг/л	$C_\phi = 0,50$
Концентрация нефтепродуктов в сточной воде второго водопользователя после ее очистки, мг/л	$C_2 = 0,50$
Инвестиции на очистку сточных вод у второго водопользователя, млн руб/год	$\Pi_2^\phi = 4,22$
Экономия средств на локомотивном или вагонном депо при очистке сточных вод до фоновой концентрации лимитирующего загрязнения в воде водотока вместо ПДК, млн руб/год	$\Delta\Pi = \Pi_2^\phi - \Pi_2^{\text{ПДК}} = 13,27$

ству для локомотивных и вагонных депо на сети железных дорог Российской Федерации может составлять:

$$\Delta\Pi_{\text{ржд}} = \Delta\Pi \cdot N = 13,27 \cdot 350 = 4645 \text{ млн руб/год,}$$

где $N = 350$ — количество локомотивных и вагонных депо на сети железных дорог Российской Федерации¹.

Выводы

1. Разработана методика, позволяющая определить рациональное соотношение между качеством воды водного объекта и качеством сбрасываемых в него сточных вод при имеющихся финансовых затратах на мероприятия по очистке сточных вод для нескольких водопользователей водного бассейна.

2. Экономически обоснованные требования к сбросу загрязняющих веществ в водоемы — фоновые концентрации этих веществ в водном объекте до сброса в него сточных вод водопользователями.

3. Экономическая эффективность предлагаемой методики при реализации только на локомотивных и вагонных депо в железнодорожной отрасли России составляет около 4,5 млрд руб/год.

Библиографический список

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (проект). — Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 29.07.2021.

2. О водоснабжении и водоотведении. Федеральный закон от 07.12.2011 № 416-ФЗ (ред. от 01.05.2022). — М.: КонсультантПлюс, 78 с.

3. Российский статистический ежегодник. 2022: Стат. сб. / Росстат. — 2022, 691 с.

4. Безпамятнов Г. П. Предельно-допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде /

Г. П. Безпамятнов, Ю. А. Кротов. — Л.: Химия, 1995. — 528 с.

5. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.1.3684—21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий (вместе с СанПиН 2.1.3684—21). — М.: Министерство юстиции РФ, 2021. — 677 с.

6. Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.2307—07. 2.1.5. Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водоемов. Ориентировочные допустимые уровни (ОДУ) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: Гигиенические нормативы. — М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. — 48 с.

7. Руководство по контролю качества питьевой воды. Том 1. Рекомендации. — Женева, Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ), 1986. — 126 с.

8. Черников Н. А. Теоретические и методологические принципы совершенствования нормативной базы в области водоотведения: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / Н. А. Черников. — СПб.: ПГУПС, 2003. — 50 с.

9. Дикаревский В. С. Водоснабжение и водоотведение на железнодорожном транспорте: учебник / В. С. Дикаревский, В. Г. Иванов, П. П. Якубчик и др.; под ред. проф. В. С. Дикаревского. — 2-е изд., перераб. — М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. — 447 с.

10. Черников Н. А. Экономическая оценка нормативных требований по сбросу сточных вод в водные объекты в России и Узбекистане / Н. А. Черников, О. М. Мусаев // Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник. Серия: Технические науки и архитектура. — Киев: Техника, 2010. — Вып. 93. — С. 52–58.

11. Черников Н. А. Единый показатель чистоты воды / Н. А. Черников, О. М. Мусаев // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2010. — № 3. — С. 309–313.

12. Черников Н. А. Региональные нормативы по сбросу сточных вод в водные объекты РФ / Н. А. Чер-

¹ URL: <http://мояколя1520.рф/company/2023-05-23>.

ников, В. Г. Иванов // Вода и экология: проблемы и решения. — 2020. — № 2(82). — С. 59–66. — DOI: 10.23968/2305-3488.2020.25.2.

13. Мусаев О. М. Обоснование нормативных требований к качеству очищенных производственных сточных вод предприятий железнодорожного транспорта в республике Узбекистан: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / О. М. Мусаев. — СПб.: ПГУПС, 2010. — 22 с.

Дата поступления: 26.05.2023

Решение о публикации: 07.07.2023

Контактная информация:

ЧЕРНИКОВ Николай Андреевич — д-р техн. наук,

проф.; nika_pgups@mail.ru

КУДРЯВЦЕВ Андрей Валерьевич — аспирант;

doktor-kudrya@yandex.ru

A Rational Relationship between the Water Quality of a Water Body and the Quality of Discharged Wastewater

N. A. Chernikov, A. V. Kudryavtsev

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

For citation: Chernikov N. A., Kudryavtsev A. V. A Rational Relationship between the Water Quality of a Water Body and the Quality of Discharged Wastewater // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 604–613. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-604-613

Summary

Purpose: To develop a methodology for determining a rational relationship between the water quality of water bodies and the quality of wastewater discharged into them with existing investments in the reconstruction of industrial wastewater treatment systems of several water users within one water basin. **Methods:** Analytical solution of the problem of determining the optimal purity of water in the river in the conditions of implementation of water protection measures with limited financial resources and their rational distribution among water users. **Results:** Relative financial resources for water protection measures in the Russian Federation are insufficient and at the same time have been declining over the past 30 years. Despite this, the maximum permissible concentrations of pollutants in wastewater discharged into water bodies and wastewater disposal systems in the Russian Federation are often very strict, sometimes even tougher than for drinking water, which leads to unjustified investment costs. It is also noted that at present, market relations in the field of nature management, including in the field of water use, have not yet been fully formed in the Russian Federation. The main difficulties of implementing these relations in this country are outlined. With the help of the proposed methodology, a reasonable relationship between the water quality of a watercourse and the quality of wastewater discharged into them, as well as a rational distribution of financing between water users, is determined on a concrete example. It is shown that the economically justified requirements for effluents discharged into a water body are background concentrations of pollutants in the water of this water body. **Practical significance:** The practical feasibility of the proposed methodology, which can be recommended for practical application, is demonstrated using an example.

Keywords: Water quality of water bodies, watercourses, water users, water purity index, concentration of pollutants, environmental efficiency indicator, maximum permissible discharge, financing of water protection measures.

References

1. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda (proekt). Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 29.07.2021* [Transport strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to

2035 (draft). Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated July 29, 2021]. (In Russian)

2. *O vodosnabzhenii i vodootvedenii. Federal'nyy zakon ot 07.12.2011 № 416-FZ (red. ot 01.05.2022)* [About water supply and sanitation. Federal Law № 416-FZ of December

7, 2011 (as amended on May 1, 2022)]. Moscow: Konsul'tantPlyus Publ., 78 p. (In Russian)

3. *Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik. 2022: Stat. sb. Rosstat* [Russian statistical yearbook. 2022: Stat. Sat. Rosstat]. 2022, 691 p. (In Russian)

4. Bezpamyatnov G. P., Krotov Yu. A. *Predel'no-dopustimye kontsentratsii khimicheskikh veshchestv v okruzhayushchey srede* [Maximum allowable concentrations of chemicals in the environment]. L.: Khimiya Publ., 1995, 528 p. (In Russian)

5. *Sanitarnye pravila i normy SanPiN 2.1.3684—21. Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k sodержaniyu territoriy gorodskikh i sel'skikh poseleniy, k vodnym ob'ektam, pit'evoy vode i pit'evomu vodosnabzheniyu, atmosfernomu vozdukh, pochvam, zhilym pomeshcheniyam, ekspluatatsii proizvodstvennykh, obshchestvennykh pomeshcheniy, organizatsii i provedeniyu sanitarno-protivoepidemiicheskikh (profilakticheskikh) meropriyatiy (vmeste s SanPiN 2.1.3684—21)* [Sanitary rules and norms SanPiN 2.1.3684—21. Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of territories of urban and rural settlements, for water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, residential premises, operation of industrial, public premises, organization and implementation of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures (together with SanPiN 2.1.3684—21)]. Moscow: Ministerstvo yustitsii RF Publ., 2021, 677 p. (In Russian)

6. *Gigienicheskie normativy GN 2.1.5.2307—07. 2.1.5. Vodootvedenie naseleennykh mest, sanitarnaya okhrana vodoemov. Orientirovochnye dopustimye urovni (ODU) khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh ob'ektov khozyaystvenno-pit'evogo i kul'turno-bytovogo vodopol'zovaniya: Gigienicheskie normativy* [Hygienic standards GN 2.1.5.2307-07. 2.1.5. Water disposal of populated areas, sanitary protection of reservoirs. Approximate Permissible Levels (TAC) of Chemical Substances in the Water of Water Bodies for Domestic Drinking and Cultural and Household Water Use: Hygienic Standards]. Moscow: Federal'nyy tsentr gigeny i epidemiologii Rospotrebnadzora Publ., 2008, 48 p. (In Russian)

7. *Rukovodstvo po kontrolyu kachestva pit'evoy vody. Tom 1. Rekomendatsii. Zheneva, Vsemirnaya organizatsiya zdravookhraneniya (VOZ)* [Guidelines for drinking water quality control. Volume 1. Recommendations. Geneva, World Health Organization (WHO)]. 1986, 126 p. (In Russian)

8. Chernikov N. A. *Teoreticheskie i metodologicheskie printsipy sovershenstvovaniya normativnoy bazy v oblasti vodootvedeniya: avtoref. diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Theoretical and methodological principles of improving the regulatory

framework in the field of water disposal: author. diss. ... Dr. tech. Sciences]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2003, 50 p. (In Russian)

9. Dikarevskiy B. C., Ivanov V. G., Yakubchik P. P.; pod red. prof. B. C. Dikarevskogo *Vodosnabzhenie i vodootvedenie na zheleznodorozhnom transporte: uchebnik; 2-e izd., pererab.* [Water supply and sanitation in railway transport: textbook; 2nd ed., revised]. Moscow: GOU "Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2009, 447 p. (In Russian)

10. Chernikov N. A., Musaev O. M. *Ekonomicheskaya otsenka normativnykh trebovaniy po sbrosu stochnykh vod v vodnye ob'ekty v Rossii i Uzbekistane* [Economic assessment of regulatory requirements for wastewater discharge into water bodies in Russia and Uzbekistan]. *Kommunal'noe khozyaystvo gorodov. Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik. Seriya: Tekhnicheskiiye nauki i arkhitektura* [Communal services of cities. Scientific and technical collection. Series: Technical sciences and architecture]. Kiev: Tekhnika Publ., 2010, Iss. 93, pp. 52–58. (In Russian)

11. Chernikov N. A., Musaev O. M. *Edinyy pokazatel' chistoty vody* [Single indicator of water purity]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2010, Iss. 3, pp. 309–313. (In Russian)

12. Chernikov N. A., Ivanov V. G. *Regional'nye normativy po sbrosu stochnykh vod v vodnye ob'ekty RF* [Regional standards for wastewater discharge into water bodies of the Russian Federation]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [Water and ecology: problems and solutions]. 2020, Iss. 2(82), pp. 59–66. DOI: 10.23968/2305-3488.2020.25.2. (In Russian)

13. Musaev O. M. *Obosnovanie normativnykh trebovaniy k kachestvu ochishchennykh proizvodstvennykh stochnykh vod predpriyatiy zheleznodorozhnogo transporta v respublike Uzbekistan: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Substantiation of regulatory requirements for the quality of treated industrial wastewater from railway transport enterprises in the Republic of Uzbekistan: author. diss. ... cand. tech. Sciences]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2010, 22 p. (In Russian)

Received: May 26, 2023

Accepted: July 07, 2023

Author's information:

Nikolay A. CHERNIKOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; nika_pgups@mail.ru

Andrey V. KUDRYAVTSEV — Postgraduate Student; doktor-kudrya@yandex.ru

УДК 726.5+624.04+69.04

Храмовые здания из быстровозводимых блок-модулей в сейсмически активных районах Сибири и Дальнего Востока на примере Забайкальского региона

Е. Г. Третьякова

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

Для цитирования: Третьякова Е. Г. Храмовые здания из быстровозводимых блок-модулей в сейсмически активных районах Сибири и Дальнего Востока на примере Забайкальского региона // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 614–632. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-614-632

Аннотация

Цель: Исследовать вопросы распространения православных храмов в отдаленных районах Сибири и Дальнего Востока, вопросы использования блок-модульных конструкций в культовых сооружениях в условиях сейсмической активности регионов Забайкалья и Дальнего Востока, в частности в Забайкальском регионе. **Метод:** Выполнить анализ канонических типов храмов, их планировочных и объемно-композиционных решений, получивших распространение в современной православной архитектуре Российской Федерации. Провести анализ архитектурных особенностей современных, построенных в начале XXI века в разных городах РФ православных храмов, которые формируют образ современной православной отечественной архитектуры путем использования нетрадиционных элементов. Рассмотреть влияние различных факторов на формирование образа современных российских православных храмов. Проанализировать роль традиций в современной архитектуре культовых зданий. Определить основные направления развития строительства культовых сооружений. Провести исследование особенностей землетрясений в обозначенном регионе за последние 70 лет. Проанализировать современные сейсмические условия Забайкальского региона. Провести исследование типологии храмов, которые возможны для использования в Забайкальском регионе. Проанализировать возможность применения и особенности блок-модульных зданий из различных материалов. Оценить степень их возможной современной реализации в исследуемых отдаленных районах Сибири и Дальнего Востока, в особенности на территории Забайкальского района. **Результаты:** Определены основные типы храмов, которые исторически и климатически предпочтительны для данных районов; представлены различные материалы для строительства храмовых зданий, предложены типы блоков, выполненных из бревен, а также типы блоков в каркасном исполнении в качестве основных типовых блок-модульных конструкций для быстровозводимых культовых зданий. **Практическая значимость:** Показано, что использование блок-модульных конструкций в качестве основных для возведения зданий в отдаленных от центров районах позволяет решить проблему недостатка православных культовых зданий в регионе, существенно снизить сроки возведения культовых зданий и обеспечить их сейсмическую устойчивость.

Ключевые слова: Традиции, крестово-купольные храмы, базиликальные храмы, бесстолпные храмы, клетские храмы, кубоватые храмы, сейсмическая активность, быстровозводимые здания, блок-модули.

В первой трети XX века после революции и утверждения нового политического строя в России было фактически прекращено строительство православных храмов. Процесс преемственности создания православных храмов был насильственно прерван. Более того, многие православные святыни были уничтожены, если не в это время, то после Великой Отечественной войны как мешавшие строительству новых советских сооружений. В срединные 80-х годов XX века происходит изменение мировоззрения, государство начинает процесс осознания необходимости религии и возрождения православия. Это явление сопровождается активным возведением православных храмов. Возрождается интерес к богатой традицией русской церковной архитектуре. Однако недостаток опыта и тематических знаний в области планировки и объемно-пространственных особенностей православных храмов, зодчества в целом привел к тому, что началось копирование наиболее выдающихся образцов архитектуры православных храмов прошлого. Возрастающая значимость религии привела и к сложному процессу поиска новых стилистических приемов, даже новых направлений в области православного храмового строительства, к поиску нового образа православного храма.

Многогранность православного зодчества до сих пор не позволила сложиться какому-то конкретному типу здания, сформировать определенное стилистическое направление, выработать какие-то новые архитектурно-стилистические приемы — наподобие того, как это было в Западной Европе.

Русская православная архитектура в начале XX века застыла в своем развитии на русско-византийском стиле, в котором было построено множество прекрасных храмов. Возрождение этого стиля в XXI веке вполне закономерно после долгого забвения. Считается, что каждая эпоха должна оставлять свои следы в сооружениях,

которые ей сопутствуют. Вот и храмы, казалось бы, тоже должны приобрести ранее не свойственные им черты, благодаря которым они могли бы выглядеть современно, в духе времени.

В архитектуре с конца 80-х годов XX века утвердился постмодернизм, который был весьма неравнодушен к историческим стилям и черпал из них отдельные приемы как из ящика Пандоры. Все это устраивало Русскую православную церковь, так как она практически с нуля должна была заняться возрождением храмов, а ее интерес к русско-византийскому стилю вполне был оправдан.

Архитектурные решения храмов, появившихся на рубеже XX–XXI вв., демонстрируют приверженность традициям. В них используются планировочные решения, ставшие каноническими, как то: трехчастные схемы, квадратные, в виде креста, октагона, круглые. Типы храмов также используются те, что сложились на протяжении долгой истории православной религии, такие как крестово-купольные, базиликальные, бесстолпные. Консерватизм русской церкви в вопросах выбора типов храмов, специфика воспитания современных архитекторов, базирующаяся на освоении и любви к традициям, обусловили во многом архитектурные решения современных культовых зданий в нашей огромной стране [1].

Как показывает опыт, в современных условиях источниками новизны в архитектурных решениях православных храмов в основном является переосмысление традиций в результате творческих поисков на основе использования новых строительных материалов, идет творческий поиск нового стилистического направления. Общие объемно-пространственные решения современных церквей близки каноническим схемам.

Стремление выразить себя через архитектуру православного храма в последнее время встречается все чаще. Оно выражается в творческом поиске нового образа, соответствующего времени, но при этом остающегося в рамках тради-

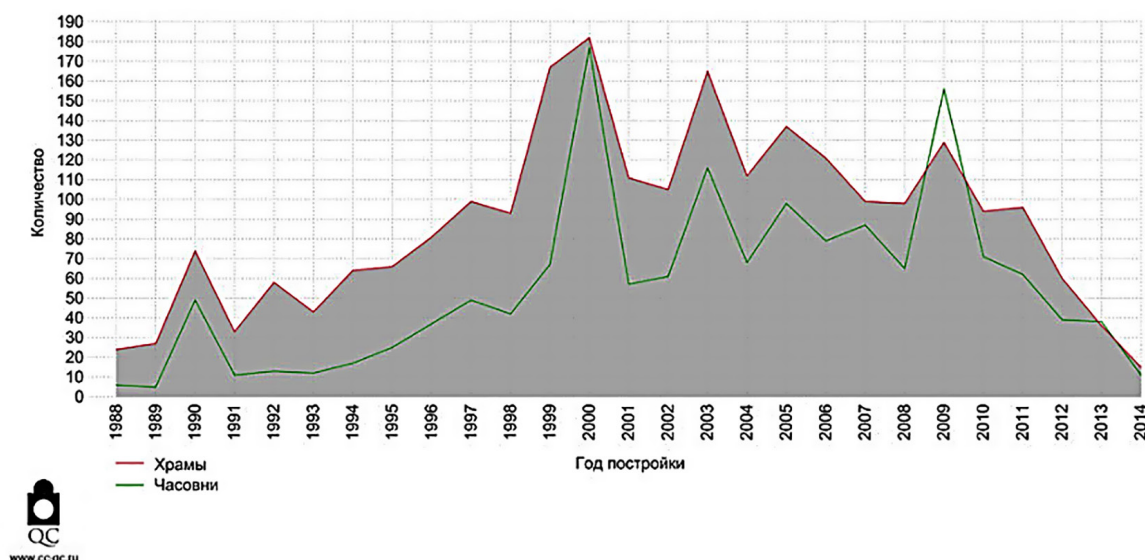


Рис. 1. График строительства православных храмов с 1988 по 2014 г.¹

ций, опираясь на семиотический подход, который определяет построение православного здания и подразумевает коммуникацию как взаимодействие при помощи знаков, знаковых систем.

В настоящее время в современном строительстве православных храмов можно выделить несколько основных направлений:

- воссоздание сооружений, которые были утрачены в прошлом, с максимальным соответствием иконографическому материалу;
- копирование образцов прошлого по аналогам;
- стилизация с упрощением традиционных православных архитектурных композиций, порой с отказом от убранства фасадов и интерьеров в виде лепнины, изразцов;
- приспособление объектов светского назначения в культовые сооружения.

Многие современные исследователи считают, что храм развился из древнего святилища в горизонтальном и вертикальном направлениях. И новаторские образы современных храмов должны создаваться на основе прообраза, путем

использования канонических архитектурных принципов, которые остаются неизменными на протяжении всей долгой истории русского православия. Но архитектурные сооружения должны соответствовать духу времени и не быть копиями прошлых великих примеров.

Язык архитектуры за последние сто лет серьезно изменился, тогда как православное зодчество застыло на предреволюционном этапе своего существования.

Анализ новых храмов, возведенных в разных городах России в XXI веке, дает основание для констатации преобладающих стилей, таких как: русско-византийский стиль, возрожденные классицизм, необарокко, неорусский стиль [2, 3].

Для современных храмов характерны новые особенности, и новаторство в них выражается в новых пластических решениях, в использовании современных строительных материалов, в изменении традиционного декора фасадов, в лаконизме.

В XXI веке строительство храмов продолжается, и количество их с 1988 по 2014 год варьи-

¹ URL: <https://daniil-skitalec.livejournal.com/25779.html> (дата обращения: 23.06.2023).

руется, но не останавливается (рис. 1). Просторные храмы разнообразны по материалу, по объемно-пространственному решению, по архитектурному образу.

Примером каменного храма, в котором достаточно успешно объединились традиции и новаторство, является церковь Пантелеймона Целителя в Ростове-на-Дону (рис. 2), построенная в 1996–1997 годах. Организовал строительство храма по своим эскизам академик РАМН, директор Онкологического института Ю. С. Сидоренко. Эти эскизы воплотила в реальный проект архитектор Г. И. Бегалова. Здесь же, на территории Онкологического института, находится здание учебно-консультационного пункта филиала Московского Свято-Тихоновского богословского института. Церковь имеет пять куполов. Главный купол над средокрестием покоится на высоком ступенчатом световом барабане. С запада к храму примыкает звонница. Стены храма имеют трехлопастное завершение, богато декорированы и пронизаны высокими окнами.

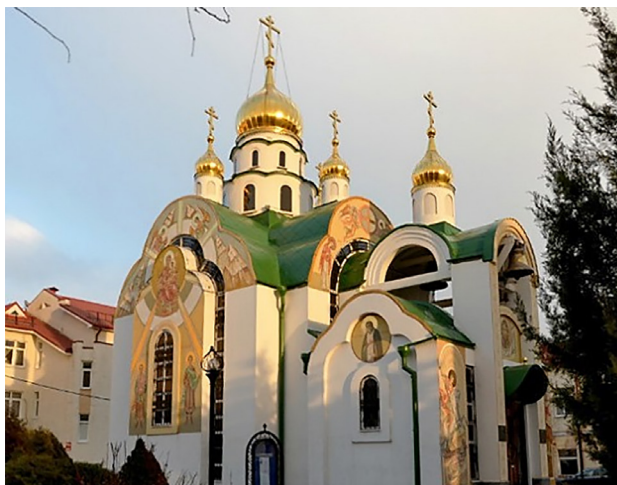


Рис. 2. Церковь Пантелеимона Целителя в Ростове-на-Дону (1996–1997 гг.)¹

¹ URL: <https://azbyka.ru/palomnik/> (дата обращения: 23.06.2023).

² URL: <https://tournavigator.pro/> (дата обращения 23.06.2023).



Рис. 3. Храм Христа Спасителя в Москве²

Примером современной храмовой архитектуры можно считать и построенный в течение 44 лет в русско-византийском стиле XIX века по проекту К. Тона, взорванный в 1931 году, воссозданный по проекту Алексея Денисова, Зураба Церетели, Михаила Посохина в 1990-х годах храм Христа Спасителя в Москве (рис. 3). Воссоздание было осуществлено на основе иконографий с использованием современных строительных материалов. Новые купола храма выполнены из нержавеющей стали и покрыты тонким слоем золота, на который нанесен слой алмазной пыли для защиты от атмосферных воздействий.

В стиле Владимиро-Суздальского зодчества в 2004–2006 годах построен еще один храм Христа Спасителя в Калининграде по проекту О. Копылова (рис. 4). Это здание имеет план в форме октагона — восьмигранника. Его отличает большая высота — 69 метров, купола на барабанах, закомары на фасадах, большие окна, входные пределы с трех сторон, перекрытые цилиндрическими сводами. Ко входу в храм ведет широкая 20-метровая лестница. В архитектуре храма, стоящего на высоком стилобате, имеющего симметричную композицию, значительную высоту по сравнению с размером плана, удачно сочетаются православ-

ные традиции Владимиро-Суздальского зодчества и современные новаторские приемы, как то: большие остекленные поверхности, чего раньше в православных храмах России не использовали, на трех входных порталах иконы в форме медальонов.



Рис. 4. Храм Христа Спасителя в Калининграде¹

Необычной архитектурой отличается церковь Николая Чудотворца, построенная в Карелии в поселке Повенец в 2003 году по проекту архитектора Е. Ф. Шаповаловой в память о строителях Беломорканала (рис. 5). Материалом храма стали дерево и бетон, из которого выполнена башня высотой 37 метров. Узкие окна-бойницы расположены в верхней части башни — как в старинных русских сторожевых башнях. Деревянный четверик, возвышающийся на бетонном основании, увенчан деревянным шатром с главками с крестами. Звонница над входом и крыльцо напоминают суровые дозорные башни лагерей.

Спасо-Преображенский собор в Хабаровске является примером культового сооружения, построенного в XXI веке (рис. 6). Третий по высоте храм в России. Вместимость храма —

¹ URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 23.06.2023).



Рис. 5. Церковь Николая Чудотворца. Поселок Повенец, Карелия. 2003 г.²

3600 человек. Высота — 96 метров. Построен в 2001–2004 годах по проекту архитекторов Ю. Живетьева, Н. Прокудина и Е. Семенова. Златоглавый собор с пятью куполами, высота которых составляет 83 метра. В соборе устроено два отдельных придела: основной с центральным входом и малый (нижний храм), находящийся под основным. Внутри собор покрыт фресками.

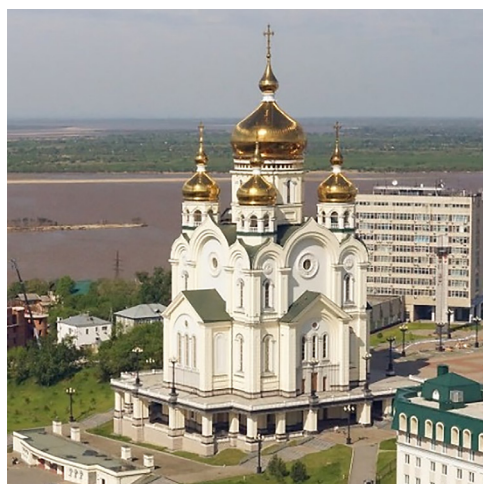


Рис. 6. Спасо-Преображенский собор в Хабаровске³

Как видно, каменные и деревянные православные храмы, построенные в XXI веке, во многом наследуют канонические традиции прошлого,

²URL: <https://sobory.ru/article/?object=06603> (дата обращения: 23.06.2023).

³ URL: <https://images.app.goo.gl/7tZYwpEgb7ChKaxJ6> (дата обращения 23.06.2023).

но все-таки в них присутствуют и современные тенденции, в основном представленные в виде упрощения форм, иногда в предельной простоте решения декора, в лаконизме, доведенного до минимализма с намеком на вечную составляющую храма и с попыткой реанимации образа и формы храма, сложившихся в начале XX века, где иконографический замысел находил достойное художественное воплощение (рис. 7, 8).

Русские пришли в Восточную Сибирь в XVII веке, принеся с собой православные традиции. На Дальнем Востоке распространение православия началось во второй половине XIX — начале XX века [5, 6]. Православие формировалось в окружении шаманизма и буддизма, поэтому до начала XX века церковная православная деятельность носила в основном миссионерский характер [25]. Буддизм был широко распространен среди жителей Забайкалья одновременно с православием. Взаимодействие верований в целом носило мирный характер. Укрепление православия требовало строительства новых культовых зданий. Для этого были разработаны образцовые проекты небольших деревянных приходских храмов. В крупных городах строительство храмов велось, как правило, по индивидуальным проектам. В начале XX века в связи с прокладкой Транссибирской магистрали и переселенческим движением произошел своеобразный всплеск строительства православных храмов, так как при разработке планов железной дороги заранее отводились специальные участки под возведение храмов.

Восточная Сибирь и Дальний Восток отличаются своеобразными природными условиями. Восточная Сибирь представляет возвышенное плоскогорье, а Дальний Восток — чередование горных хребтов и котловин. Климат территории континентальный и резко континентальный, главная черта которого — существенная суровость [7].

К тому же для Сибири и Дальнего Востока характерна и повышенная сейсмическая активность [8, 34]. В Байкальской зоне наблюдаются сдвиги земной коры с элементами растяжения или сжатия. В Читинской области всего пять сейсмических станций, которые не способны наблюдать за всей территорией региона, поэтому целостную картину сейсмической активности района нельзя рассматривать [9].

Сейсмическая активность в Байкало-Монгольском регионе, который охватывает Иркутскую и Читинскую области, резко возросла в 2009–2023 годах (рис. 9).

Почти на всей территории Восточной Сибири и Дальнего Востока установлена сейсмичность в 7–8 баллов по шкале сейсмической интенсивности по макросейсмическим признакам. В некоторых районах сейсмичность достигает 9 баллов [8]. Данные районы расположены в зонах средней тайги и степной местности, где преобладают многолетнемерзлые, пучинистые сезонноталые и сезонномерзлые грунты [10], что на некоторых участках застройки повышает сейсмоактивность на 1 балл.

На этой территории в недавнем прошлом произошли мощнейшие землетрясения. Вот некоторые из них, особо разрушительные.

Великое Восточно-Сибирское землетрясение случилось в январе 1725 года. Его магнитуда составила 8,2 балла (ориентировочно). В эпицентре была зафиксирована интенсивность сотрясений в 11 баллов. Это одно из сильнейших землетрясений на территории Восточной Сибири за всю ее историю. Так как в то время эта территория была мало заселена, то сохранились чрезвычайно скудные данные о его силе и последствиях. Параметры этого землетрясения с помощью метода, разработанного В. П. Солоненко, удалось определить лишь в 1960-х годах [11].

Цаганское землетрясение случилось в январе 1862 года. Магнитуда его составила 7,5; интен-

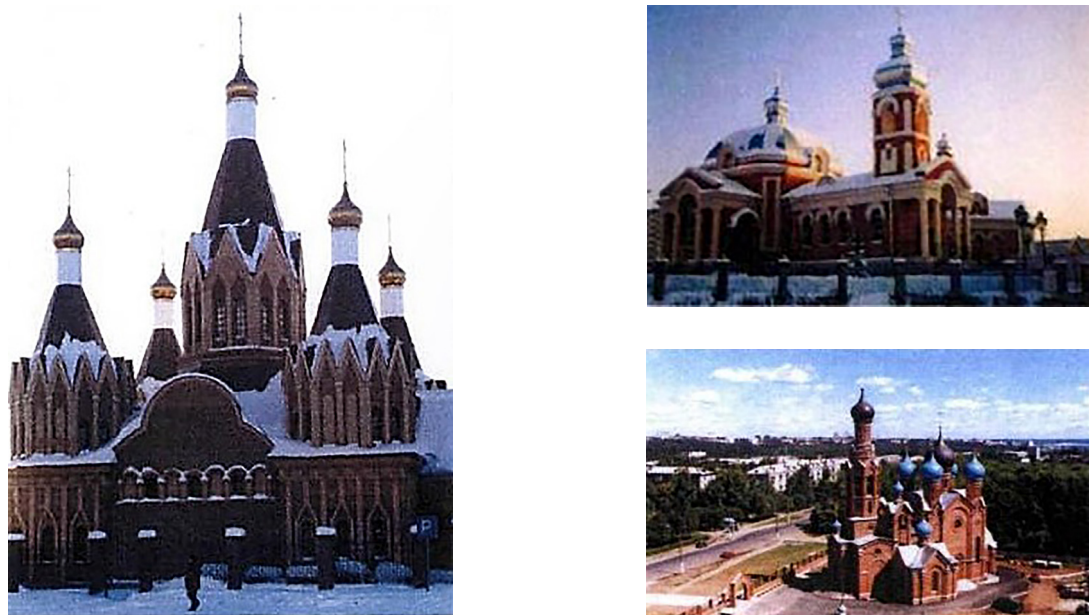
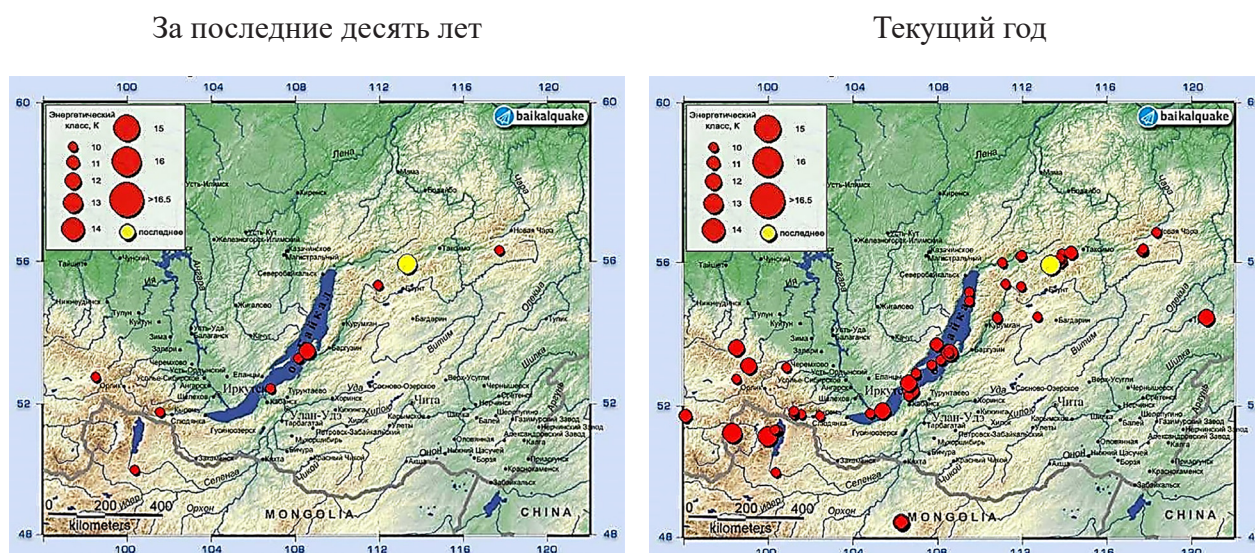


Рис. 7. Примеры современных архитектурных решений каменных храмов [4, с. 176]



Рис. 8. Примеры решения современных деревянных храмов [4, с. 187]

Рис. 9. Карта эпицентров землетрясений⁶

сивность сотрясений в эпицентре была 10 баллов. Местоположение эпицентра находилось в северо-восточной части дельты р. Селенги. В результате землетрясения образовался новый залив — Провал. За сутки произошло два сильнейших толчка, в городе качались и трескали все строения, в церквях звонили колокола. Почти во всех церквях городов Иркутска и Улан-Удэ образовались повреждения. В Воскресенской церкви изогнулись кресты, в Архангельской и Спасской церквях образовались трещины и щели от свода до фундамента, выпали кирпичи, вылетели стекла из рам. В одном из сел купол церкви обрушился вовнутрь храма [12].

Таннуольские землетрясения произошли в июле 1905 года. Магнитуда составила 7,6–8,3, интенсивность сотрясений в эпицентре составила 10–11 баллов, с эпицентром на северо-западе Монголии, где произошла целая серия землетрясений. Она была из толчков и афтершоков, которые ощущались в Сибири вплоть до Киренска. Во многих населенных пунктах произошли осыпания штукатурки и известки, трескали стены, отмечалось падение мебели, раскачивались кре-

сты на главах церквей, звонили колокола, раскачивались деревья [13, 14].

Мондинское землетрясение, которое произошло в апреле 1950 года, имело магнитуду 7,0 баллов и интенсивность сотрясений в эпицентре 9 баллов и привело к горным обвалам и разломам, к разрушению кирпичных печей, к вываливанию стен, к ломке столбов в поселке Монды [13, 14].

Муйское землетрясение произошло 27 июня 1957 года. Магнитуда его составила 7,6 балла; интенсивность сотрясений в эпицентре 10 баллов. Район Муйского землетрясения ранее считался практически сейсмически неопасным. В районе Читы и Бодайбо на расстоянии 500 км наблюдалась интенсивность сотрясения в 6–7 баллов. В Чите наблюдался подъем уровня глубоких подземных вод на 2 м, на некоторых зданиях появились трещины и обвалилась штукатурка, в ближайших населенных пунктах было разрушено много печей [13, 14].

Гоби-Алтайское землетрясение 4 декабря 1957 года имело магнитуду 8,1 балла, интенсивность сотрясений в эпицентре — 11 баллов. Оно стало разрушительным землетрясением и для

⁶ URL: <https://seis-bykl.ru/index.php> (дата обращения: 23.06.2023).

Монголии. Перед основным ударом, уничтожившем практически все здания, произошло 5 афтершоков. Землетрясение ощущалось не только на территории Монголии, но и в северных провинциях Китая, Бурятии, а также в Иркутской и Читинской областях [15].

Сычуаньское землетрясение произошло 12 мая 2008 г. Магнитуда его составила 7,8. Это землетрясение проявилось на Байкале целой серией землетрясений с амплитудой пять — семь баллов. В Баргузинском районе Бурятии из-за землетрясения венцы крепких деревянных домов ходили ходуном, а в окнах лопались стекла [13, 14, 16, 17].

Перечисленные землетрясения в районе Забайкалья доказывают, что данная территория обладает сейсмической активностью, отличающейся большой опасностью.

Крупные землетрясения происходят здесь с периодичностью раз в 50 лет [9, 18], и, следовательно, проектирование и строительство культовых зданий, как, впрочем, и всех остальных, должно проводиться с учетом особенностей, которые определяются выбором формы, объемно-планировочного решения, пропорций, размеров зданий, конструктивных материалов [19, 35, 36].

В настоящее время практика строительства православных храмов здесь основывается на принципах русского православного зодчества. Для крупных городов характерны городские соборы, как, например, в Хабаровске, и приходские храмы, для небольших поселений характерны усадебные храмы, домовые храмы и часовни. Площадь основных помещений храмов определяется исходя из численности населения, и, как правило, их проектируют одноэтажными, двухэтажными или с цокольным этажом. В комплексе с храмом возводится колокольня [20, 38–42].

Здания храмов посвящаются Богу, и для их возведения используются лучшие матери-

алы [3], такие как валуны, белый камень, кирпич, бетон и особенно дерево — как самый легкодоступный материал в Сибири и на Дальнем Востоке. Кирпичная кладка стен храмов выполняется сплошной, а толщина стен определяется расчетом [19]. Еще древнерусские мастера научились использовать византийский кирпич — плинфу и возводить стены из тесанного известняка. Из кирпича возводятся основные несущие конструкции: стены, столбы, арки, паруса и своды. Бетон также применяется в возведении несущих элементов зданий, таких как внешние и внутренние стены, столбы. Для строительства деревянных храмов традиционно используются бревна и брусья. В северных условиях в последнее время получили распространение быстровозводимые храмы из готовых щитовых конструкций.

Хвойные породы деревьев применяются для несущих деревянных конструкций зданий, для изготовления лемеха используют осину [21]. Из дерева выполняются стены, своды и завершения храмов.

На территории Сибири и Дальнего Востока получили распространения крестово-купольные типы храмов (рис. 10, *а*), бесстолпные храмы типа восьмерик на четверик (рис. 10, *б*), зального типа храмы (рис. 10, *с*), центрические храмы-ротонды круглые в плане (рис. 10, *в*) [28, 29].

Деревянные храмы на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока имеют черты яркой индивидуальности и самобытности [21]. Архитектурные особенности деревянных храмов сложились в северных районах России, получив там большое распространение, а затем пришли в Сибирь, Забайкалье и Якутию, сформировав свою типологию. Здесь получили распространение клетской тип храма, шатровый, кубоватый и ярусный [30–32, 37].

Клетской храм с крестом или маленькой главкой похож на избу и может состоять из несколь-

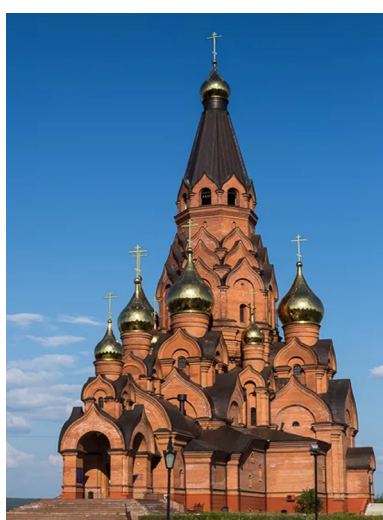
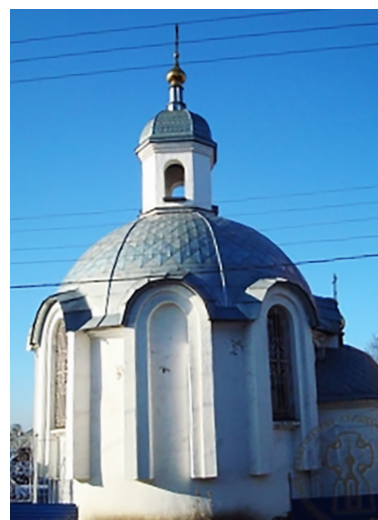
*а**б**в**г*

Рис. 10. Типы каменных храмов:

а — крестово-купольный — Храм в честь иконы Божией Матери «Знамение — Абалацкая», Новосибирск (<https://kmg.edusite.ru/p13aa1.html#gallery-3>); *б* — храм типа восьмерик на четверик — Кафедральный собор Воздвижения Креста Господня, Лесосибирск (<https://sobory.ru/article/?object=08836>); *в* — центрический храм — ротонда — Храм святых блаженных Ксении Петербургской и Матроны Московской в городе Ленинске-Кузнецком Кемеровской области (https://arh-master.ru/project_65.html); *г* — храм зального типа — Церковь Иоанна Богослова, с. Нижний Ильдикан (<https://sobory.ru/article/?object=37101>)

ких клеток, расположенных последовательно (рис. 11, *а*). Шатровый храм имеет многогранную башню, в которой размещается главное помещение и венчается высоким шатром. Кубоватый храм также замечен на этих землях (рис. 11, *б*). Куб, или кубоватый столп, — одно из самобытных завершений русских деревянных храмов, имеющих кубоватый верх. Такие храмы пришли

на смену клетским и шатровым [5, 6]. Ярусный храм (рис. 11, *д*), состоящий из поставленных друг на друга и постепенно уменьшающихся кверху клеток, пришел в Забайкалье из других регионов, так же как и храмы, увенчанные большим числом куполов (рис. 11, *з*). Наибольшее распространение получили храмы, построенные на основе клетки или в виде шатровых компози-

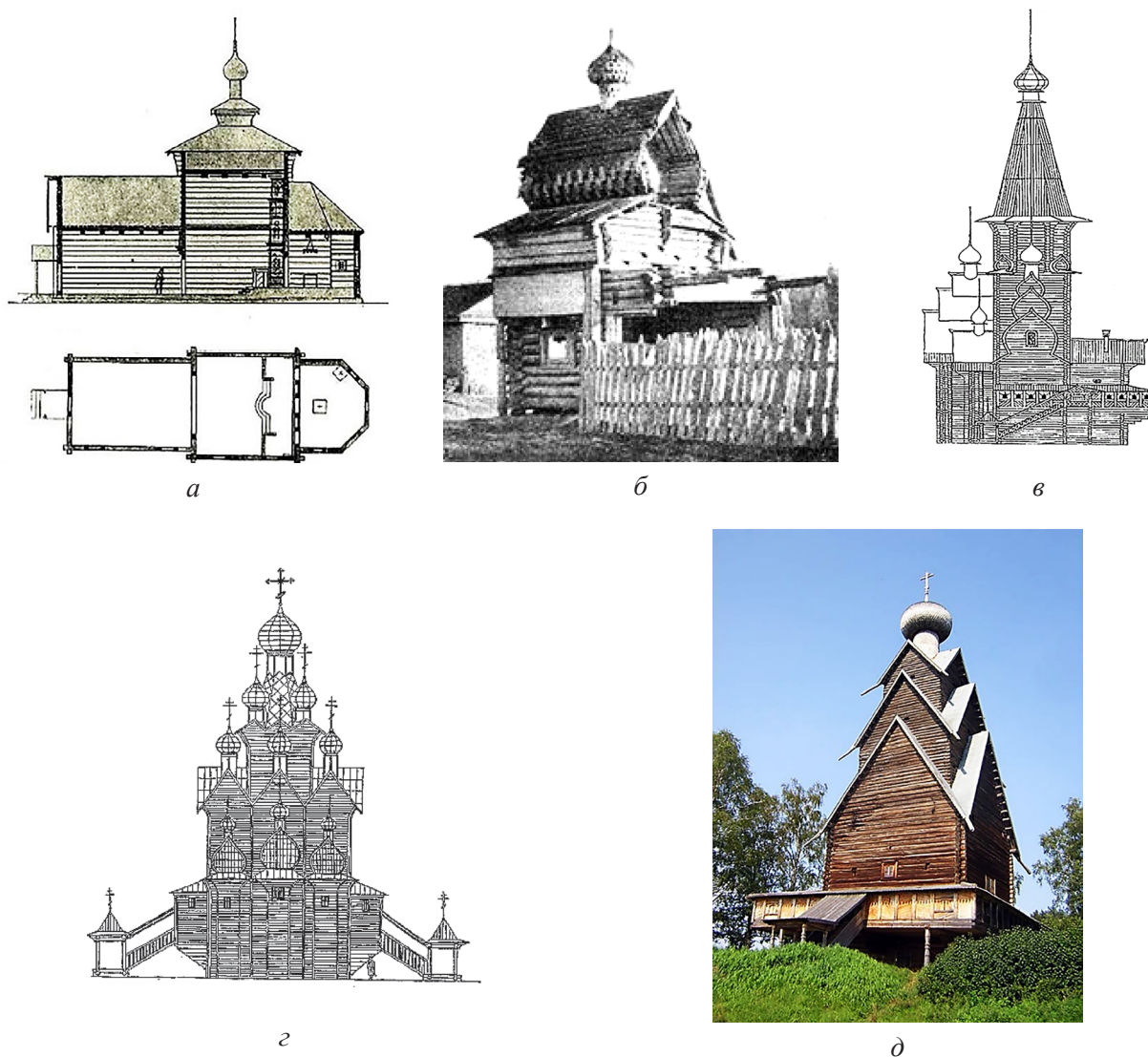


Рис. 11. Примеры деревянных храмов:

- а* — клетской храм во имя Рождества Пресвятой Богородицы; *б* — кубоватый храм — Илимская церковь Казанской Богоматери (http://ostrog.ucoz.ru/publikacii/4_2_2.htm);
в — Троицкая церковь в Томске, северный фасад (http://ostrog.ucoz.ru/publikacii/4_2_2.htm);
г — Тобольский Софийский собор в 1644–1677 гг. (http://ostrog.ucoz.ru/publikacii/4_2_1.htm);
д — ярусная Церковь Рождества Иоанна Предтечи, Тверская область, с. Ширково (<https://sobory.ru/photo/32953>)

ций. И в XXI веке господствуют по-прежнему эти два типа храмов — клетской и шатровой.

К началу XXI века в этих регионах преобладает два основных типа храмов: клетской и шатровой [22–25]. Современные культовые постройки сохранили скромный и строгий характер, что соответствует традиционным архитектурным формам и традиционным схемам.

Для отдаленных труднодоступных районов Сибири и Дальнего Востока в настоящее время важной является проблема выбора оптимального варианта храма, который отличался бы и архитектурной выразительностью, и был бы простым в строительстве, эксплуатации и ремонте, был бы безопасным и устойчивым при возможной сейсмической атаке. Всем этим условиям больше

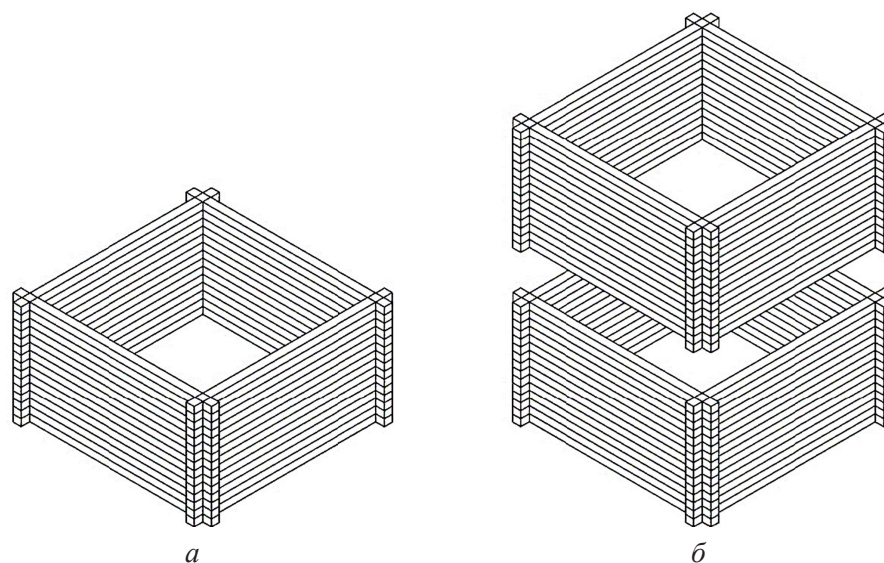


Рис. 12. Схема деревянных модульных блоков из бруса:
a — модульный блок из брусев; *б* — схема сборки блоков

всего соответствуют быстровозводимые храмы, которые могут создаваться как в виде временных, так и постоянных [26, 27, 43, 44]. Возведение церковных построек с использованием модульных конструкций поможет во многом решить задачу массового строительства небольших приходских храмов, часовен, колоколен. Типовые решения к тому же ускорят их строительство.

Быстровозводимые здания на территориях Сибири и Дальнего Востока раньше использовали для формирования временных и вахтовых поселков. В настоящее время сфера их применения значительно расширилась. Быстровозводимые модульные здания собирают из объемных унифицированных элементов заводского изготовления. Они бывают сборно-разборные и неразборные. Сборно-разборные здания собирают из плоских линейных и объемных элементов [27]. При возведении малых храмов выгодно использовать такие строительные материалы, как дерево и блоки из пенобетона.

Использование пеноблоков позволяет строить храмы достаточно быстро. Блоки экологичны, имеют высокие теплоизоляционные свойства, обладают хорошей устойчивостью при пожарах.

Деревянные модульные блоки выполняют из бревна или бруса (рис. 12) (обыкновенного и профилированного), а также каркасными (рис. 13). Быстровозводимые здания существуют в двух вариантах — либо из готовых блок-модулей, либо из щитов. Блок-модули имеют полную заводскую готовность с размерами, позволяющими их перевозку транспортом. Крупногабаритные блоки из щитов имеют разные размеры и могут использоваться для возведения храмов различной вместимости (рис. 14). Для возведения храмов можно использовать и срубы небольших размеров высокой заводской готовности. При монтаже модульные блоки скрепляются между собой так же, как венцы сруба, шипами и нагелями. Между собой блоки соединяются металлическими шпильками. Просты в применении и каркасные деревянные модули заводской готовности. Подобного рода конструкции могут быть надежными в случае землетрясений.

Первое возведение храма под крышу с главками, иконостасом из готовых элементов выполнили за один день, но вчерне (без отделки). Это доказывает, что применение быстровозводимых храмов на основе использования блочно-модуль-



Рис. 13. Схема деревянных модульных каркасных блоков:
а — модульный блок из каркаса;
б — схема сборки блоков

ных конструкций может стать еще одним приемом храмового строительства и эффективно использоваться в отдаленных от баз строительной индустрии регионах, например в Читинской области.

Анализ храмового строительства свидетельствует о том, что сегодня сложились определенные подходы к проектированию объектов православной веры, которые сводятся к канонической ориентации здания, к применению православной символики, к разделению здания на функциональные группы, к подъему здания над поверхностью земли. Количество православных храмов на территории России в последние десятилетия увеличилось в связи с возрастающим числом верующих, однако для районов Дальнего Востока и Восточной Сибири отдален-



Рис. 14. Монтаж модулей быстровозводимых церквей¹

ность этих территорий от административного центра страны, трудности природно-климатического характера, низкая плотность населения делают процесс роста количества православных храмов сложным. Оценка природных и сейсмических условий рассматриваемых территорий в частотности региона Читинской области говорит о том, что они к тому же отличаются вечной мерзлотой и высокой сейсмической активностью [39], соответствующей 7–9 баллам, для которых строительство модульных зданий, а именно храмов, является весьма актуальным.

¹ URL: https://ortox.ru/news/2012_12_14_vozrozhdenie_stroitelstva_obydennykh_xramov_v_rossii/ (дата обращения 23.06.2023).

Библиографический список

1. Шамаро А. А. Русское церковное зодчество: символика и истоки / А. А. Шамаро. — М.: Научные атеизм, 1988. — 64 с.
2. Позднякова Н. И. Русское православное зодчество / Н. И. Позднякова. — Барнаул: Изд-во Алтайского гос. ун-та, 2008. — 68 с.
3. Красовский М. В. Планы древнерусских храмов: (Опыт исслед. допетров. церк. рус. зодчества в связи с церк. зодчеством Византии) / М. В. Красовский. — Петроград: тип. «Строитель», 1914. — 303 с.
4. Православные храмы. В трех томах. Т. 3: Примеры архитектурно-строительных решений. МДС 31-9 2003/АХЦ «Арххрам». — М.: ФГУП ЦПП, 2005. — 237 с.
5. Ополовников А. В. Деревянное зодчество Якутии / А. В. Ополовников. — Якутск: Кн. изд-во, 1983. — 124 с.
6. Грабарь И. Э. История русского искусства: в 13 т. Т. 1: Допетровская эпоха / И. Э. Грабарь. — М.: Издание И. Кнебель, 1909. — 512 с.
7. СП 131.13330.2020. Строительная климатология СНиП 23-01—99 (с Изменением № 1) — утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 24.12.2020 № 859/пр. — М.: Минстрой России, 2020. — 147 с.
8. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7—81 (с Изменениями № 2, 3) — утв. Приказом Минстроя России от 24.05.2018 № 309/пр. — М.: ФАУ «ФЦС», 2022. — 100 с.
9. Гатинский Ю. Г. Уровень сейсмической опасности в районах стратегических объектов приграничных территорий России и ближнего зарубежья / Ю. Г. Гатинский и др. // Альманах Пространство и время. — 2013. — Т. 3. — № 1.
10. ТСН 50-305—2004. Основания и фундаменты на мерзлых грунтах. Читинская область. — Введ. 21.09.2004. — Якутск: Издательство Института мерзлотоведения СО РАН, 2005.
11. Солоненков В. П. Среднебайкальское землетрясение 29 августа 1959 года / В. П. Солоненков, А. А. Тресков. — Иркутск: Иркутское кн. изд-во, 1960. — 36 с.
12. Демин Э. В. Свод сведений о землетрясениях Удинска-Верхнеудинска-Улан-Удэ / Э. В. Демин. — Улан-Удэ: ДиалогСибирь, 1996. — 125 с.
13. Ризниченко Ю. В. Сейсмическая сотрясаемость территории СССР / Ю. В. Ризниченко. — М.: Наука, 1979. — 192 с.
14. Канторович Л. В. Сейсмический риск и принципы сейсмического районирования / Л. В. Канторович, В. И. Кейлис-Борок, Г. И. Молчан // Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных. — 1974. — № 6. — С. 3–20.
15. Солоненков В. П. Гоби-Алтайское землетрясение 4 декабря 1957 года. Сейсмологический очерк / В. П. Солоненков, А. А. Тресков, Н. А. Флоренсов. — М.: Госгеолтехиздат, 1960. — 48 с.
16. Кейлис-Борок В. И. Методы оценки экономического эффекта сейсмостойкого строительства / В. И. Кейлис-Борок, И. А. Нерсесов, А. М. Яглом. — М.: АН СССР, 1962. — С. 46.
17. Куклин А. А. Экономическая оценка жизни человека / А. А. Куклин, С. Е. Шипицына, Р. В. Нифантова. — Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2012. — 43 с.
18. Современные тенденции в строительстве приходских храмов. — URL: <http://www.patriarchia.ru/db/text/1120703.html> (дата обращения: 23.06.2023).
19. Православные храмы. В трех томах. Т. 2: Православные храмы и комплексы: пособие по проектированию и строительству (к СП 31-103—99). МДС 31-9.2003/АХЦ «Арххрам». — М.: ГУП ЦПП, 2003. — 222 с.
20. СП 31-103—99. Здания, сооружения и комплексы православных храмов. — Введен 27.12.1999. — М.: Госстрой России, АХЦ «Арххрам», ГУП ЦПП, 2000. — 33 с.
21. Стародубцев О. В. Русское церковное искусство X–XX веков / О. В. Стародубцев. — М.: Лепта Книга, издательство Сретенского монастыря, 2007. — 728 с.

22. Канаев И. П. Архитектура современных православных малых храмов и часовен: на примере Москвы и Подмосковья: дисс. ... канд. архитектуры / И. П. Канаев. — М., 2002. — 157 с.
23. Ильмурадова И. Л. Принципы формообразования интерьера православного храма: автореф. дисс. ... канд. архит. / И. Л. Ильмурадова. — Новосибирск, 2000. — 24 с.
24. Лайтаре Н. В. Современная православная церковная архитектура России. Тенденции стилового развития и типология храмов: автореф. дис. ... канд. искусствоведения / Н. В. Лайтаре. — СПб., 2009. — 174 с.
25. Жалсараев А. Д. Становление и развитие церковно-административной системы Русской православной церкви в Забайкалье: середина XVII — начало XX в.: дисс. ... канд. ист. наук / А. Д. Жалсараев. — Улан-Удэ, 2006. — 236 с.
26. Бусева-Давыдова И. Л. Православная Энциклопедия: В 25 т. / Под общ. ред. Патриарха Московского и всея Руси Алексия II. Т. 10: Русская Православная Церковь. — М.: АХЦ «Арххрам», ГУП ЦПП, 2000. — 536 с.
27. Асаул А. Н. Теория и практика использования быстровозводимых зданий / А. Н. Асаул и др. — СПб.: Гуманистика, 2004. — 472 с.
28. Иоаннесян О. М. Храмы-ротонды в Древней Руси / О. М. Иоаннесян // Иерусалим в русской духовной культуре. — М., 1994. — С. 100–148.
29. Масленникова Д. С. Монастырские соборы Забайкалья и Дальнего Востока: монография / Д. С. Масленникова; науч. ред. А. П. Иванова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2017. — 220 с.
30. Семенова В. И. Деревянное культовое зодчество Тюмени в XVII веке / В. И. Семенова // Вестник культуры и искусств. — 2022. — № 4(72). — С. 76–81.
31. Курилов В. Н. Из истории шатрового зодчества в Сибири XVII в. / В. Н. Курилов // Памятники быта и хозяйственное освоение Сибири. — Новосибирск, 1989. — С. 87–90.
32. Майничева А. Ю. Деревянные церкви Сибири XVII века: формы, символы, образы. Серия «Этнография Сибири» / А. Ю. Майничева. — Новосибирск, 1999.
33. Азизов П. А. Физическое состояние исторических памятников архитектуры и меры по их сохранению в сейсмических условиях Средней Азии / П. А. Азизов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2001. — № 1 — С. 15–16.
34. Vologina E. G. Traces of high seismic activity in the uppermost sediments of Lake Baikal, Siberia / E. G. Vologina, M. Sturm, Ya. B. Radziminovich // *Geodynamics & Tectonophysics*. — 2021. — Vol. 12(3). — Pp. 544–562. — DOI: 10.5800/GT-2021-12-3-0538.
35. Иванова Ж. В. Обеспечение надежности и безопасности эксплуатации деревянных зданий, применяемых для строительства в сейсмоактивных районах / Ж. В. Иванова // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2005. — № 3(5). — С. 21–26.
36. Иванова Ж. В. Поведение деревянных зданий при сейсмических воздействиях / Ж. В. Иванова // Проблемы и достижения в области строительного инжиниринга: сборник материалов научно-методической конференции, посвященной 150-летию кафедры «Здания», Санкт-Петербург, 25–26 мая 2015 г. — СПб.: ФГОУ ВПО ПГУПС, 2015. — С. 162–165
37. Гречнева Н. В. Современные православные храмы Алтая: типологический анализ / Н. В. Гречнева // Культурное наследие Сибири. — 2012. — № 13. — С. 32–37.
38. Гречнева Н. В. «Неоэkleктика» в современной храмовой архитектуре / Н. В. Гречнева // Известия Алтайского государственного университета. — 2011. — № 2/1. — С. 163–165.
39. Крейдун Ю. А. Архитектурно-строительные особенности современных православных храмов Горно-Алтайска / Ю. А. Крейдун // Известия Алтайского государственного университета. — 2010. — № 2/2(66). — С. 138–144.
40. Акчурина Н. С. Использование традиций деревянного церковного строительства в современных проектах храмов на Урале / Н. С. Акчурина // Баландинские чтения. — 2014. — С. 8–14.

41. Мамаева Н. Н. Тенденции современной культовой архитектуры (на примере православных храмов Екатеринбурга) / Н. Н. Мамаева // Славянский научный сборник. Урал. Православие.

42. Заварзина Н. Ю. Современные стилистические предпочтения православного зодчества в России / Н. Ю. Заварзина // Академический вестник. УралНИИ-проект РААСН. — 2008. — № 1. — С. 74–81.

43. Ромашко В. М. Сборно-разборные, быстровозводимые, здания-модули / В. М. Ромашко // Молодежь и наука: сборник материалов VII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 50-летию первого полета человека в

космос. — URL: http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/2311/4880/1/s231_111.pdf (дата обращения: 23.06.2023).

44. Асаул А. Н. Теория и практика использования быстровозводимых зданий в обычных условиях и чрезвычайных ситуациях в России и за рубежом / А. Н. Асаул, Ю. Н. Казаков, В. Л. Быков и др.; под ред. д. т. н., проф. Ю. Н. Казакова. — СПб.: Гуманистика, 2004. — 472 с.

Дата поступления: 02.08.2023

Решение о публикации: 28.08.2023

Контактная информация:

ТРЕТЬЯКОВА Елена Германовна — канд. арх., доц.;
elena.tretya@yandex.ru

Temple Buildings Made of Prefabricated Block Modules in Seismically Active Areas of Siberia and the Far East on the Example of the Trans-Baikal Region

E. G. Tretyakova

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

For citation: Tretyakova E. G. Temple Buildings Made of Prefabricated Block Modules in Seismically Active Areas of Siberia and the Far East on the Example of the Trans-Baikal Region // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 614–632. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-614-632

Summary

Purpose: To investigate the issues of the spread of Orthodox churches in remote areas of Siberia and the Far East. Questions of the use of block-modular structures in religious buildings in the conditions of seismic activity of the regions of Transbaikalia and the Far East, in particular, in the Trans-Baikal region.

Methods: To analyze the canonical types of temples, their planning and volumetric-compositional solutions that have become widespread in the modern Orthodox architecture of the Russian Federation. To analyze the architectural features of modern Orthodox churches built at the beginning of the XXI century in different cities of the Russian Federation, which form the image of modern Orthodox domestic architecture by using non-traditional elements. To consider the influence of various factors on the formation of the image of modern Russian Orthodox churches. To analyze the role of traditions in the modern architecture of religious buildings. To determine the main directions of development of the construction of religious buildings. To conduct a study of the features of earthquakes in the designated region over the past 70 years. To analyze the current seismic conditions of the Trans-Baikal region. To conduct a study of the typology of temples that are possible for use in the Trans-Baikal region. To analyze the possibility of application and features of block-modular buildings made of various materials. To assess the degree of their possible modern implementation in the studied remote areas of Siberia and the Far East, especially in the territory of the Trans-Baikal region. **Results:** The main types of temples that are historically and climatically preferable for these areas are identified; various

materials for the construction of temple buildings are presented, types of blocks made of logs are proposed, as well as types of blocks in frame design as the main standard block-modular structures for prefabricated religious buildings. **Practical significance:** It is shown that the use of block-modular structures as the main ones for the construction of buildings in areas remote from the centers allows solving the problem of the lack of Orthodox religious buildings in the region, significantly reducing the construction time of religious buildings and ensuring their seismic stability.

Keywords: Traditions, cross-domed temples, basilic temples, pillarless temples, cell temples, cubed temples, seismic activity, prefabricated buildings, block modules.

References

1. Shamara A. A. *Russkoe czerkovnoe zodchestvo: simbolika i istoki* [Russian church architecture: symbolism and origins]. Moscow: Nauchnye ateizm Publ., 1988, 64 p. (In Russian)
2. Pozdnyakova N. I. *Russkoe pravoslavnoe zodchestvo* [Russian Orthodox architecture]. Barnaul: Altayskiy gos. un-t Publ., 2008, 68 p. (In Russian)
3. Krasovsky M. V. *Plany` drevnerusskikh khramov: (Opy`t issled. dopetrov. czerk. rus. zodchestva v svyazi s czerk. zodchestvom Vizantii)* [Plans of ancient Russian churches: (Experience of research. dopetrov. church of Russian architecture in connection with the church. architecture of Byzantium)]. Petrograd: tip. "Stroitel'", 1914, 303 p. (In Russian)
4. *Pravoslavny`e khramy`. V trekh tomakh. T. 3. Primery` arkhitekturno-stroitel`ny`kh reshenij* [Orthodox churches. In three volumes. Vol. 3. Examples of architectural and construction solutions]. MDS 31-9 2003/AKhTs Arkhram. Moscow: FSUE TSPP Publ., 2005, 237 p. (In Russian)
5. Opolovnikov A. V. *Derevyannoe zodchestvo Yakutii* [Wooden architecture of Yakutia]. Yakutsk: Kn. izd-vo, 1983, 124 p. (In Russian)
6. Grabar I. E. *Istoriya russkogo iskusstva: v 13 t. T. 1: Dopetrovskaya e`pokha* [History of Russian art: in 13 vols. Vol. 1: Pre-Petrine era]. Moscow: Edition I. Knebel, 1909, 512 p. (In Russian)
7. SP 131.13330.2020. *Stroitel`naya klimatologiya SNIp 23-01—99 (s Izmeneniem № 1)* [Construction climatology SNIp 23-01—99 (with Amendment № 1)]. Appr. by order of the Ministry of Construction, Housing and Communal Services of the Russian Federation dated 24.12.2020 № 859/pr. Moscow: Ministry of Construction of Russia Publ., 2020, 147 p. (In Russian)
8. SP 14.13330.2018. *Stroitelstvo v sejsmicheskix rajonax. Aktualizirovannaya redakciya SNIp II-7—81 (s Izmeneniyami № 2, 3)* [Set of rules 14.13330.2018. Seismic building design code. Revised edition of SNIp (Construction rules and regulations) II-7—81]. Approved by By order of the Ministry of Construction of Russia dated 24.05.2018 № 309/pr. Moscow: Federal Center for regulation and standardization Publ., 2022, 100 p. (In Russian)
9. Gatinsky Yu. G. et al. *Uroven` sejsmicheskoy opasnosti v rajonakh strategicheskikh ob`ektov prigranichny`kh territorij Rossii i blizhnego zarubezh`ya* [Seismic hazard level in areas of strategic objects of the border territories of Russia and neighboring countries]. *Al`manakh Prostranstvo i vremya* [Space and Time]. 2013, vol. 3, Iss. 1. (In Russian)
10. *TSN 50-305—2004. Osnovaniya i fundamenty` na merzly`kh gruntakh. Chitinskaya oblast`* [TSN 50-305—2004. Bases and foundations on frozen soils. Chita region]. Yakutsk: Izdatel'stvo Instituta merzlotovedeniya SO RAN, 2005. (In Russian)
11. Solonenkov V. P., Treskov A. A. *Srednebaikal`skoe zemletryasenie 29 avgusta 1959 goda* [Middle Baikal earthquake on August 29, 1959]. Irkutsk: Irkutskoe kn. izd-vo, 1960, 36 p. (In Russian)
12. Demin E. V. *Svod svedenij o zemletryasenyakh Udinska-Verkhneudinska-Ulan-Ude`* [Set of information about earthquakes of Udinsk-Verkhneudinsk-Ulan-Ude]. Ulan-Ude: DialogSibir' Publ., 1996, 125 p. (In Russian)
13. Ryzhichenko Yu. V. *Sejsmicheskaya sotryasaemost` territorii SSSR* [Seismic shaking of the territory of the USSR]. Moscow: Science Publ., 1979, 192 p. (In Russian)
14. Kantorovich L. V., Keilis-Borok V. I., Molchan G. I. *Sejsmicheskij risk i principy` sejsmicheskogo rajonirovaniya* [Seismic risk and principles of seismic zoning]. *Vychislitel`nye i statisticheskie metody interpretatsii sejsmicheskikh dannykh* [Computational and statistical methods for interpreting seismic data]. 1974, Iss. 6, pp. 3–20. (In Russian)
15. Solonenkov V. P., Treskov A. A., Florensov N. A. *Gobi-Altajskoe zemletryasenie 4 dekabrya 1957 goda. Sejsmologicheskij ocherk* [Gobi-Altai earthquake on December 4, 1957. Seismological essay]. Moscow: Gosgeoltekhizdat Publ., 1960, 48 p. (In Russian)

16. Keilis-Borok V. I., Nersesov I. A., Yaglom A. M. *Metody` ocenki e`konomicheskogo e`ffekta sejsmostojkogo stroitel'stva* [Methods of Assessing the Economic Effect of Seismic Construction]. Moscow: AN SSSR Publ., 1962, p. 46. (In Russian)
17. Kuklin A. A., Shipitsyna S. E., Nifantova R. V. *E`konomicheskaya ocenka zhizni cheloveka* [Economic assessment of human life]. Yekaterinburg: Institut ekonomiki UrO RAN Publ., 2012, 43 p. (In Russian)
18. *Sovremennye tendencii v stroitel'stve prikhodskikh khramov* [Current trends in the construction of parish temples]. Available at: <http://www.patriarchia.ru/db/text/1120703.html> (accessed: June 23, 2023). (In Russian)
19. *Pravoslavny`e khramy`. V trekh tomakh. T. 2. Pravoslavny`e khramy` i komplekсы: Posobie po proektirovaniyu i stroitel'stvu* [Orthodox churches. In three volumes. Vol. 2. Orthodox churches and complexes: Manual on design and construction] (to SP 31-103—99). MDS 31-9.2003/AKhTs “Arkhhram”. Moscow: GUP TsPP Publ., 2003, 222 p. (In Russian)
20. *SP 31-103—99. Zdaniya, sooruzheniya i komplekсы` pravoslavny`kh khramov* [SP 31-103—99. Buildings, structures and complexes of Orthodox churches]. Entered 27.12.1999. Moscow: Gosstroy Rossii, AKhTs “Arkhhram”, GUP TsPP, 2000, 33 p. (In Russian)
21. Starodubtsev O. V. *Russkoe czerkovnoe iskusstvo X–XX vekov* [Russian church art of the X–XX centuries]. Moscow: Lepta Kniga, izdatel'stvo Sretenskogo monastyrya, 2007, 728 p. (In Russian)
22. Kanaev I. P. *Arkhitektura sovremennykh pravoslavnykh mal'nykh khramov i chasoven: na primere Moskvy i Podmoskov'ya: diss. ... kand. arkhitektury* [Architecture of modern Orthodox small churches and chapels: on the example of Moscow and the Moscow region: diss. ... Candidate of Architecture]. Moscow, 2002, 157 p. (In Russian)
23. Ilmuratova I. L. *Printsipy formoobrazovaniya inter'era pravoslavnogo khrama: avtoref. diss. ... kand. arkhit.* [Principles of shaping the interior of an Orthodox church: author. diss. ... cand. archit.]. Novosibirsk, 2000, 24 p. (In Russian)
24. Lightar N. V. *Sovremennaya pravoslavnaya tserkovnaya arkhitektura Rossii. Tendentsii stilevogo razvitiya i tipologiya khramov: avtoref. dis. ... kand. iskusstvovedeniya* [Modern Orthodox Church Architecture in Russia. Trends in stylistic development and typology of temples: avtoref. dis. ... cand. art criticism]. Saint Petersburg, 2009, 174 p. (In Russian)
25. Zhalsaraev A. D. *Stanovlenie i razvitie czerkovno-administrativnoj sistemy` Russkoj Pravoslavnoj Czerkvi v Zabajkal'e: seredina XVII — nachalo XX v.* [Formation and development of the church-administrative system of the Russian Orthodox Church in Transbaikalia: mid XVII — beginning of XX centuries]. Ulan-Ude, 2006, 236 p. (In Russian)
26. Buseva-Davydova I. L. *Pravoslavnaya Entsiklopediya: V 25 t. Pod obshch. red. Patriarkha Moskovskogo i vseya Rusi Aleksiya II. T. 10: Russkaya Pravoslavnaya Tserkov'* [Orthodox Encyclopedia: In 25 vol. Under the general. ed. Patriarch of Moscow and All Rus' Alexy II. Vol. 10: Russian Orthodox Church]. Moscow: ACHC “Arkhhram”, State Unitary Enterprise TsPP Publ., 2000, 536 p. (In Russian)
27. Asaul A. N. et al. *Teoriya i praktika ispol'zovaniya by`strovovodimy`kh zdaniy* [Theory and practice of using prefabricated buildings]. St. Petersburg: Humanism, 2004, 472 p. (In Russian)
28. Ioannesyan O. M. *Khramy`-rotondy` v Drevnej Rusi* [Rotunda temples in Ancient Russia]. *Ierusalim v russkoj dukhovnoj kul'ture* [Jerusalem in Russian spiritual culture]. Moscow, 1994, pp. 100–148. (In Russian)
29. Maslennikova D. S.; nauch. ed. A. P. Ivanov. *Monasty`rskie sobory` Zabajkal'ya i Dal'nego Vostoka: monografiya* [Monastir cathedrals of Transbaikalia and the Far East: monograph]. 2-e izd., pererab. i dop. Khabarovsk: Tikhookean. gos. un-t Publ., 2017, 220 p. (In Russian)
30. Semenova V. I. *Derevyannoe kul'tovoe zodchestvo Tyumeni v XVII veke* [Wooden cult architecture of Tyumen in the XVII century]. *Vestnik kul'tury i iskusstv* [Bulletin of Culture and Arts]. 2022, Iss. 4(72), pp. 76–81. (In Russian)
31. Kurilov V. N. *Iz istorii shatrovogo zodchestva v Sibiri XVII v.* [From the history of tent architecture in Siberia of the XVII century]. *Pamyatniki byta i khozyaystvennoe osvoenie Sibiri* [Monuments of life and economic development of Siberia]. Novosibirsk, 1989, pp. 87–90. (In Russian)
32. Mainicheva A. Yu. *Derevyanny`e czerkvi Sibiri XVII veka: formy`, simvoly`, obrazy`. Seriya “Etnografiya Sibiri”* [Wooden churches of Siberia of the 17th century: forms, symbols, images. Series “Ethnography of Siberia”]. Novosibirsk, 1999. (In Russian)
33. Azizov P. A. *Fizicheskoe sostoyanie istoricheskikh pamyatnikov arkhitektury` i mery` po ikh sokhraneniyu v*

sejsmicheskikh usloviyakh Srednej Azii [Physical condition of historical architectural monuments and measures for their preservation in seismic conditions of Central Asia]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy* [Seismic-resistant construction. Safety of structures]. 2001, Iss. 1, pp. 15–16. (In Russian)

34. Vologina E. G., Sturm M., Radziminovich Ya. B. Traces of high seismic activity in the uppermost sediments of Lake Baikal, Siberia. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2021, vol. 12(3), pp. 544–562. DOI: 10.5800/GT-2021-12-3-0538.

35. Ivanova Zh. V. Obespechenie nadezhnosti i bezopasnosti ekspluatszii derevyannykh zdaniy, primenyaemykh dlya stroitel'stva v seismoaktivnykh rajonakh [Ensuring the reliability and safety of the operation of wooden buildings used for construction in seismoactive areas]. *Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2005, Iss. 3(5), pp. 21–26. (In Russian)

36. Ivanova Zh. V. *Povedenie derevyannykh zdaniy pri sejsmicheskikh vozdeystviyakh. Problemy i dostizheniya v oblasti stroitel'nogo inzhiniringa: sbornik materialov nauchno-metodicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 150-letiyu kafedry "Zdaniya", Sankt-Peterburg, 25–26 maya 2015 g.* [Behavior of wooden buildings under seismic impacts. Problems and achievements in the field of construction engineering: a collection of materials from a scientific and methodological conference dedicated to the 150th anniversary of the Buildings department, St. Petersburg May 25–26, 2015]. St. Petersburg: FGOU VPO PGUPS Publ., 2015, pp. 162–165. (In Russian)

37. Grechneva N. V. Sovremennye pravoslavnye khramy Altaya: tipologicheskii analiz [Modern Orthodox churches of Altai: typological analysis]. *Kul'turnoe nasledie Sibiri* [Cultural heritage of Siberia]. 2012, Iss. 13, pp. 32–37. (In Russian)

38. Grechneva N. V. "Neoelektika" v sovremennoy khramovoy arkhitekture ["Neo-eclecticism" in modern temple architecture]. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Altai State University]. 2011, Iss. 2/1, pp. 163–165. (In Russian)

39. Kreidun Yu. A. *Architecturae et constructionis lineamenta ecclesiarum Orthodoxarum modernarum In Gorno-Altaysk* [Architectural and construction features of modern Orthodox churches in Gorno-Altaysk]. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of

the Altai State University]. 2010, Iss. 2/2(66), pp. 138–144. (In Russian)

40. Akchurina N. S. Ispol'zovanie traditsiy derevyannogo tserkovnogo stroitel'stva v sovremennykh proektakh khramov na Urale [Using the traditions of wooden church construction in modern projects of churches in the Urals]. *Balandinskie chteniya* [Balandinsky Readings]. 2014, pp. 8–14. (In Russian)

41. Mamaeva N. N. Tendentsii sovremennoy kul'tovoy arkhitektury (na primere pravoslavnykh khramov Ekaterinburga) [Trends in modern religious architecture (on the example of Orthodox churches in Yekaterinburg)]. *Slavyanskiy nauchnyy sbornik. Ural. Pravoslaviye* [Slavic scientific collection. Ural. Orthodoxy]. (In Russian)

42. Zavarzina N. Yu. Sovremennye stilisticheskie predpochteniya pravoslavnogo zodchestva v Rossii [Modern stylistic preferences of Orthodox architecture in Russia]. *Akademicheskii vestnik. UralNIIProekt RAASN* [Academic Bulletin. UralNIIProekt RAASN]. 2008, Iss. 1, pp. 74–81. (In Russian)

43. Romashko V. M. *Sborno-razbornye, bystrovovzvodimye, zdaniya-moduli. Molodezh' i nauka: sbornik materialov VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, posvyashchennoy 50-letiyu pervogo poleta cheloveka v kosmos* [Prefabricated, prefabricated, modular buildings. Youth and science: collection of materials of the VII All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists dedicated to the 50th anniversary of the first manned flight into space]. Available at: http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/2311/4880/1/s231_111.pdf (accessed: June 23, 2023). (In Russian)

44. Asaul A. N., Kazakov Y. N., Bykov V. L. et al. *Theoria et praxis utendi aedificiis praefabricatis in condicionibus normalibus et condicionibus subitis In Russia et foris* [Theory and practice of using fast-erecting buildings in normal conditions and emergency situations in Russia and abroad]. Edited by Dr. of Technical Sciences, Prof. Y. N. Kazakov. St. Petersburg: Humanistics, 2004, p. 472. (In Russian)

Received: August 02, 2023

Accepted: August 28, 2023

Author's information:

Elena G. TRETYAKOVA — PhD in Architecture, Associate Professor; elena.tretya@yandex.ru

УДК 624.016

Применение сталежелезобетонных конструкций в мостовых сооружениях

В. В. Веселов

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

Для цитирования: *Веселов В. В.* Применение сталежелезобетонных конструкций в мостовых сооружениях // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 633–644. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-633-644

Аннотация

Цель: Выполнить анализ возможного применения комбинированных конструкций для пролетных строений мостов, расширить номенклатуру сталежелезобетонных конструкций, исследовать инновационные конструктивные решения балок, обладающих низкой материалоемкостью при повышенной надежности и долговечности. **Методы:** Анализ преимуществ известных комбинированных конструкций, применяемых для их проектирования материалов, расчет вариантов конструкции пролетных строений с применением существующих инженерных методик и с привлечением расчетных программ. **Результаты:** Традиционные конструктивные решения пролетных строений мостовых сооружений не всегда обладают достаточной надежностью и долговечностью. На кафедре «Строительные конструкции, здания и сооружения» ПГУПС разработан ряд эффективных балочных конструкций, которые можно использовать в мостовых сооружениях. Приводятся новые разработки балок с применением сталежелезобетона и сталефибробетона. Предложена комбинированная конструкция пролетного строения моста с применением сталежелезобетона и сталефибробетона, защищаемая патентами на изобретения. Выполнен статический и конструктивный расчет вариантов пролетных строений с привлечением вычислительного комплекса SCAD, проанализировано напряженно-деформированное состояние конструкции, произведен анализ снижения материалоемкости, трудоемкости и других преимуществ комбинированной конструкции пролетного строения в сравнении с традиционными решениями конструкций пролетных строений из стали и железобетона. **Практическая значимость:** Выявлены преимущества комбинированных конструкций для мостовых сооружений, установлено снижение материалоемкости и трудоемкости предлагаемых конструктивных решений при повышении изгибной жесткости пролетного строения, его надежности и долговечности. Предложенные конструктивные решения балок могут быть использованы для мостов больших пролетов в условиях тяжелых динамических нагрузок.

Ключевые слова: Мосты, пролетное строение, сталежелезобетонная конструкция, комбинированные балки, сталефибробетон, труботетон, материалоемкость, надежность, долговечность.

Введение

В мировом строительстве мостов и других транспортных сооружений все большее внимание уделяют комбинированным (гибридным) конструкциям с применением стали, бетона, древе-

сины и композитов в различных сочетаниях [1, 2], как при возведении, так и при восстановлении. При тяжелых подвижных нагрузках рациональнее к применению сталежелезобетонные и сталефибробетонные конструкции, в которых макси-

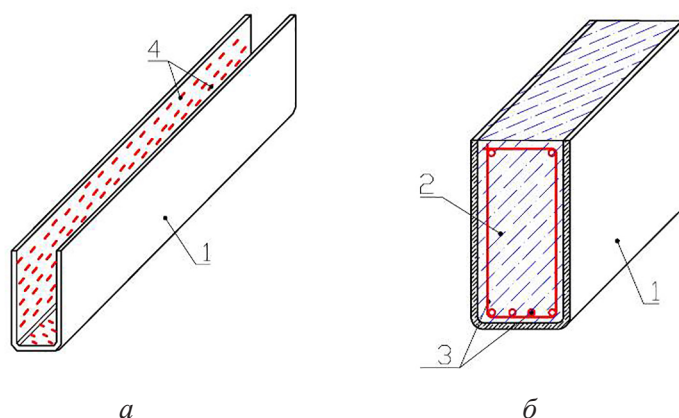


Рис. 1. Гибридная балка:

a — до бетонирования; *б* — после бетонирования; 1 — сталефибробетонный профиль опалубки, 2 — бетон омоноличивания, 3 — регулярная арматура, 4 — стальная фибра

мально эффективно используются преимущества стали, бетона и фибры [3, 4].

Сталежелезобетонные конструкции мостов могут быть различных очертаний и конструктивных схем (балочная, арочная, висячая), что зависит от пролета моста, места расположения, архитектурных требований, величины нагрузки. Выбор материалов для конструкции пролетного строения осуществляется непосредственно проектировщиком в зависимости от пролета, условий эксплуатации, нагрузок, района строительства, технико-экономических показателей и других факторов [5].

Традиционные конструктивные решения пролетных строений мостовых сооружений не всегда обладают достаточной надежностью и долговечностью [6, 7], что связано с коррозией материалов, усталостными разрушениями и т. п. В современной практике мостостроения часто используется сталежелезобетонное пролетное строение, состоящее из железобетонного настила, объединяемого со стальными балками упорами. Такое решение апробировано десятилетиями и имеет нормативную основу [8–10].

При этом бетон настила обеспечивает высокую прочность конструкции при сжатии, а сталь балок — при растяжении. Более того, бетон удерживает стальные профили от местного и бокового

кручения, обеспечивает защиту от коррозии и высоких температур. Однако номенклатура комбинированных конструкций развита недостаточно.

На кафедре «Строительные конструкции, здания и сооружения» ПГУПС разработан ряд инновационных комбинированных балок и ферм [11–15], которые можно использовать в мостовых сооружениях.

Практическое применение и результаты

Разработанные конструкции комбинированных и гибридных балок (рис. 1–5) могут быть использованы при проектировании мостов и позволяют снизить материалоемкость и трудоемкость конструкции пролетного строения при повышении его надежности и долговечности.

Гибридная балка (рис. 1), защищенная патентом на изобретение, представляет собой несъемную опалубку из сталефибробетонных профилей из стенок и поясов, заполняемую на месте монолитным бетоном и арматурным каркасом. Сталефибробетонные профили выполняются из мелкозернистого бетона с армированием стальными фибрами, расположенными согласно полям напряжений, с длиной стальных фибр не меньшей 1,25 толщины поперечного сечения элементов профиля несъемной опалубки в растянутой зоне для направленной ориентации фибр,

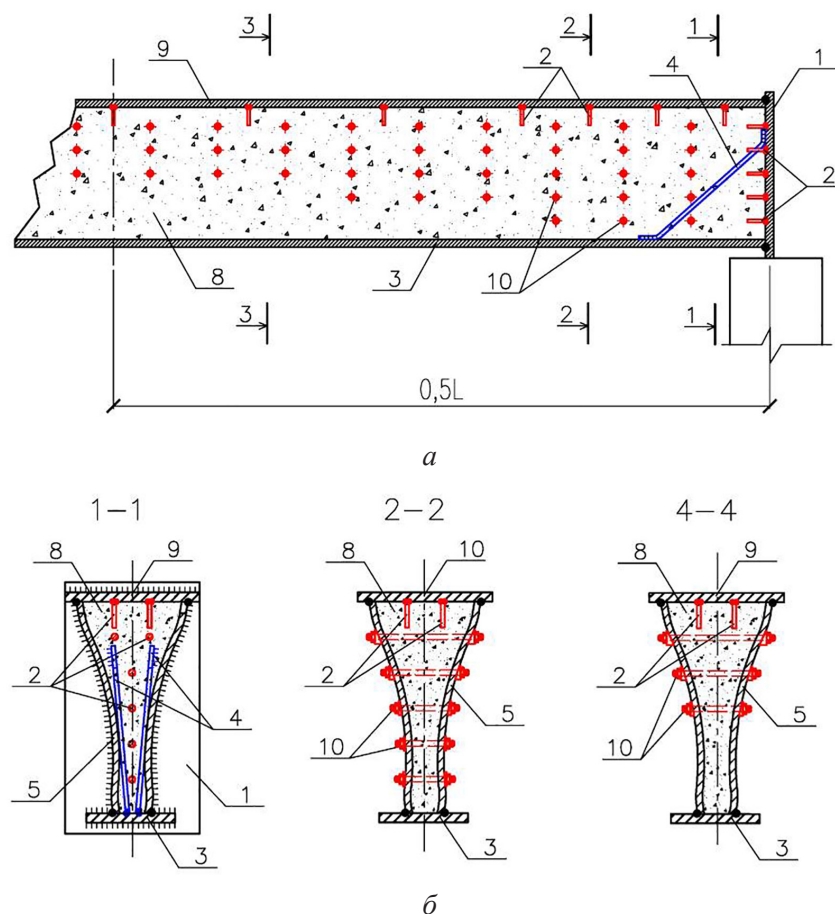


Рис. 2. Сталебетонная балка:

a — вид в пролете; *б* — поперечные сечения; 1 — опорная диафрагма, 2 — упоры, 3 — нижний пояс, 4 — фиксатор, 5 — стенка, 6 — отверстия под шпильки, 6, 7 — отверстия в стенке, 8 — бетон, 9 — верхний пояс, 10 — стяжная шпилька

и с длиной стальных фибр меньшей толщины поперечного сечения в сжатой зоне для хаотичной ориентации фибр. Бетон заполнения выполняется мелкозернистым с крупностью заполнителя до 10 мм и дополнительно по расчету может содержать армирование стальными фибрами. Арматурный каркас выполняется из продольных стержней или проволоочной арматуры, расположенных в бетоне омоноличивания. Сталефибробетонный профиль несъемной опалубки снабжен с внутренней стороны выступающими стальными волокнами в виде участков фибр, выступающих за пределы профиля на 0,25–0,5 своей длины для более эффективного сцепления с бетоном омоноличивания, что подтверждается

результатами экспериментально-теоретических исследований.

Данное конструктивное решение может быть использовано для второстепенных балок (пролетом до 12 м) пролетного строения монолитно с железобетонным настилом.

Сталебетонная балка (рис. 2), защищенная патентом на изобретение, представляет собой составное коробчатое сечение из стальных стенок и поясов с опорными диафрагмами и упорами, заполненное монолитным бетоном.

При этом расстояние между стенками к верхнему поясу больше, чем к нижнему, что обеспечивает уменьшение объема бетона в нижней, растянутой части сталебетонной балки. Между

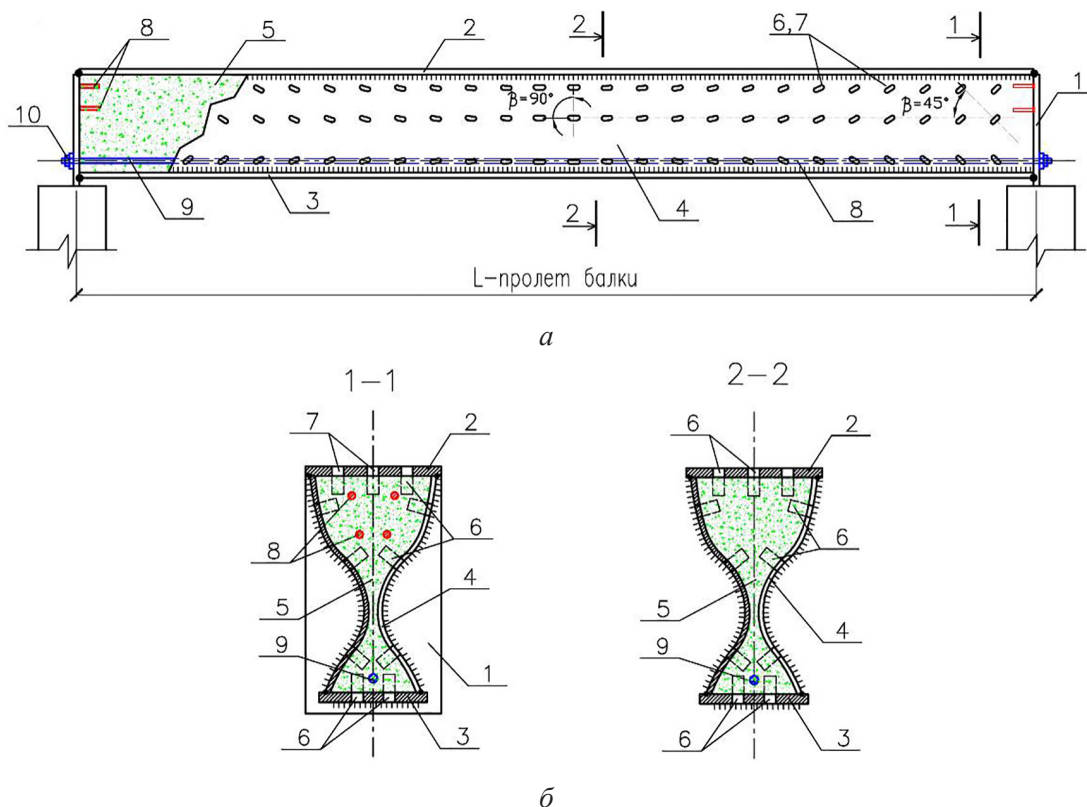


Рис. 3. Сталежелезобетонная балка:

a — вид в пролете; *б* — поперечные сечения; 1 — опорная диафрагма, 2 — верхний пояс, 3 — нижний пояс, 4 — стенка, 5 — бетон омоноличивания, 6 — выштапковка, 7 — отверстие, 8 — упор, 9 — напрягаемая ариатура, 10 — анкер (натяжное устройство)

стенками установлены предварительно напряженные стяжные шпильки для придания стенкам криволинейного очертания и предварительного напряжения отвердевшего бетона.

Данное конструктивное решение может быть использовано для главных балок пролетного строения, выполненного по разрезной статической схеме.

Сталежелезобетонная балка (рис. 3), защищенная патентом на полезное изобретение, представляет собой составное коробчатое сечение из стальных стенок и поясов с опорными диафрагмами и упорами, заполненное монолитным бетоном.

При этом пояса и стенки имеют выштапованные анкерные элементы вытянутой овальной формы, получаемые прорезкой и отгибом фрагментов листовой стали вовнутрь сечения балки

под углом 90° . Опорные диафрагмы соединены напрягаемой арматурой. Стенки по высоте сечения балки имеют выпукло-вогнутую форму сечения, соответствующую в верхней части сечения балки эпюре нормальных напряжений в бетоне от внешней нагрузки, в нижней части сечения балки — эпюре нормальных напряжений в бетоне от натяжения напрягаемой арматуры.

Данное конструктивное решение может быть использовано для главных балок большого пролета пролетного строения, выполненного по разрезной статической схеме.

Многопролетная несущая балка (рис. 4), защищенная патентом на полезную модель, представляет собой составное поперечное сечение из двух стенок, верхнего пояса и нижнего пояса, часть которого заполнена бетоном. Балка снабжена

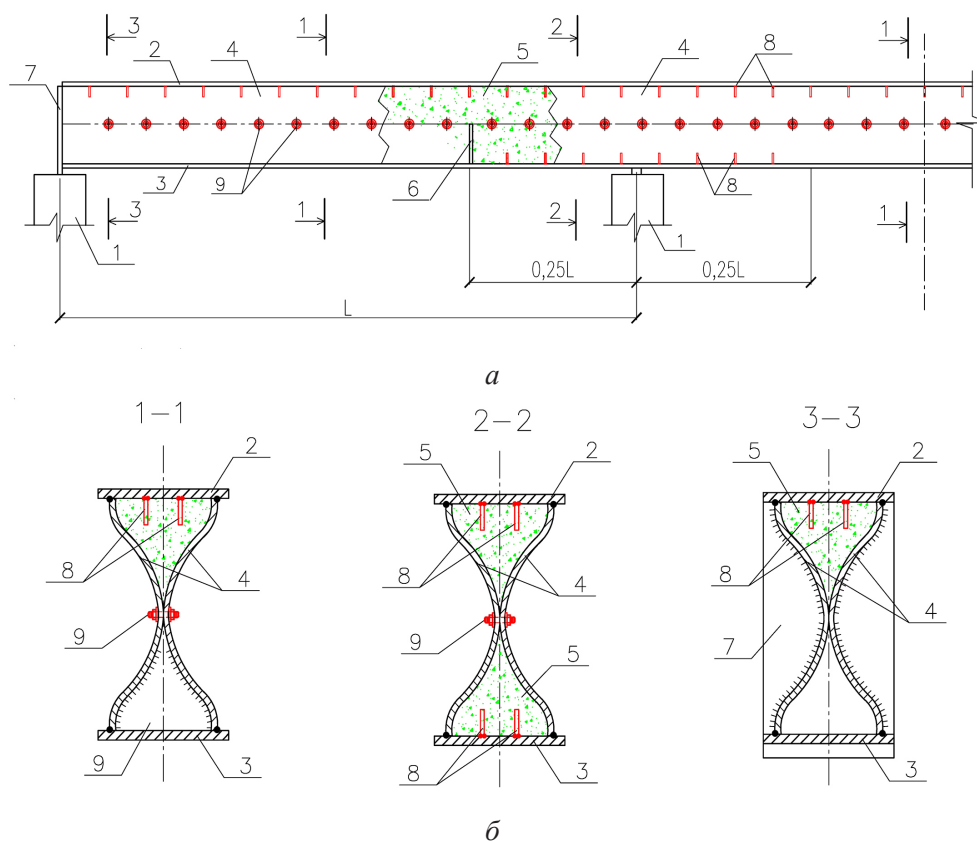


Рис. 4. Многопролетная сталебетонная балка:

a — вид в пролете; *б* — поперечные сечения; 1 — опора, 2 — верхний пояс, 3 — нижний пояс, 4 — стенка, 5 — бетон, 6 — промежуточное ребро, 7 — опорное ребро, 8 — упоры, 9 — стяжные шпильки

по концам над крайними опорами поперечными опорными диафрагмами и рядом с промежуточными опорами (в зоне нулевых изгибающих моментов) — поперечными промежуточными диафрагмами. Стенки в поперечном сечении имеют дугообразную вогнутую внутрь пустотелого профиля форму и объединены стяжными шпильками в зоне их контакта.

Бетон расположен в верхней части сечения пустотелого профиля по всей длине балки и находится в замкнутом контуре, образованном стенками верхним поясом и поперечными опорными диафрагмами. Бетон расположен в нижней части сечения пустотелого профиля у промежуточных опор и находится в замкнутом контуре, образованном стенками, нижним поясом и попереч-

ными промежуточными диафрагмами. К внутренним поверхностям верхнего пояса и нижнего пояса прикреплены упоры в виде стержневой арматуры, пластин или уголковых профилей.

Данное конструктивное решение может быть использовано для главных балок пролетного строения, выполненного по неразрезной статической схеме.

Сталебетонная ферма (рис. 5), защищенная патентом на полезную модель, включает верхний пояс из стальной трубы, заполненный бетоном, опорные диафрагмы из листовой стали, нижний пояс из стальной трубы, заполненный бетоном, внутри которого расположены преднапряженные стержни, закрепленные к заглушкам на торцах, и элементы раскосной решетки из стальных

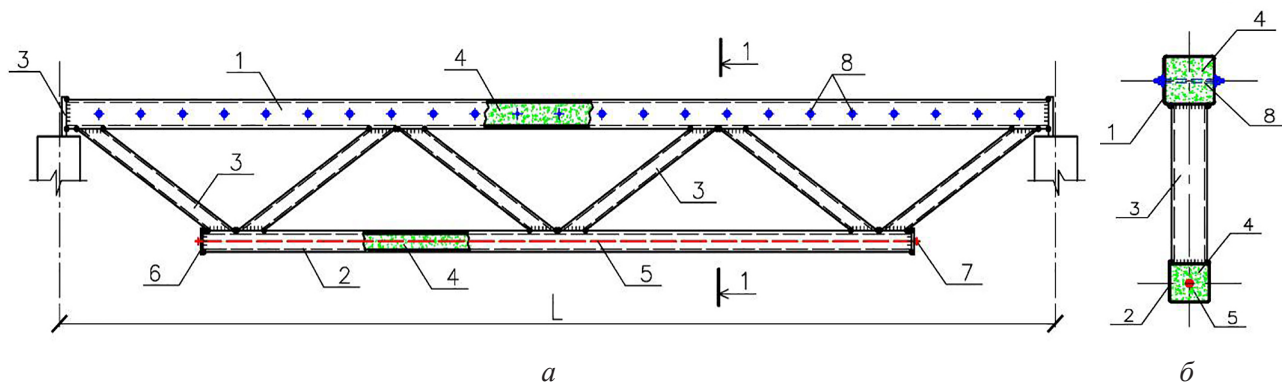


Рис. 5. Сталебетонная ферма:

a — вид в пролете; *б* — поперечное сечение; 1 — верхний пояс, 2 — нижний пояс, 3 — решетка, 4 — бетон, 5 — напрягаемая арматура, 6 — заглушка, 7 — анкер, 8 — стяжные шпильки

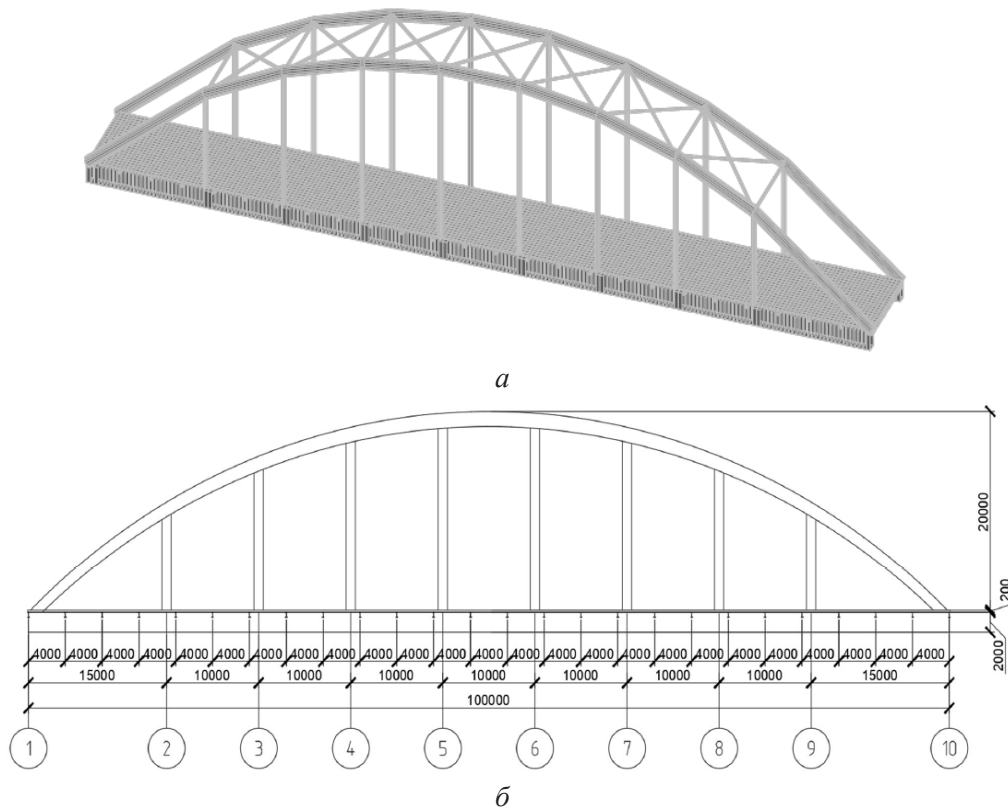


Рис. 6. Геометрическая схема пролетного строения комбинированной конструкции:
a — пространственная модель, *б* — продольный разрез с размерами

труб, закрепленные к верхнему и нижнему поясам.

Через верхний пояс горизонтально установлены стяжные шпильки и закреплены при помощи гаек к боковым поверхностям пояса. Элементы раскосной решетки, в которых возникают сжимающие усилия, могут быть заполнены бетоном.

Данное конструктивное решение может быть использовано для главных балок пролетного строения с большим пролетом.

В качестве эффективного конструктивного решения пролетного строения моста под тяжелую нагрузку и при большом пролете предлагается арочная конструкция (рис. 6, 7), состоящая из тру-

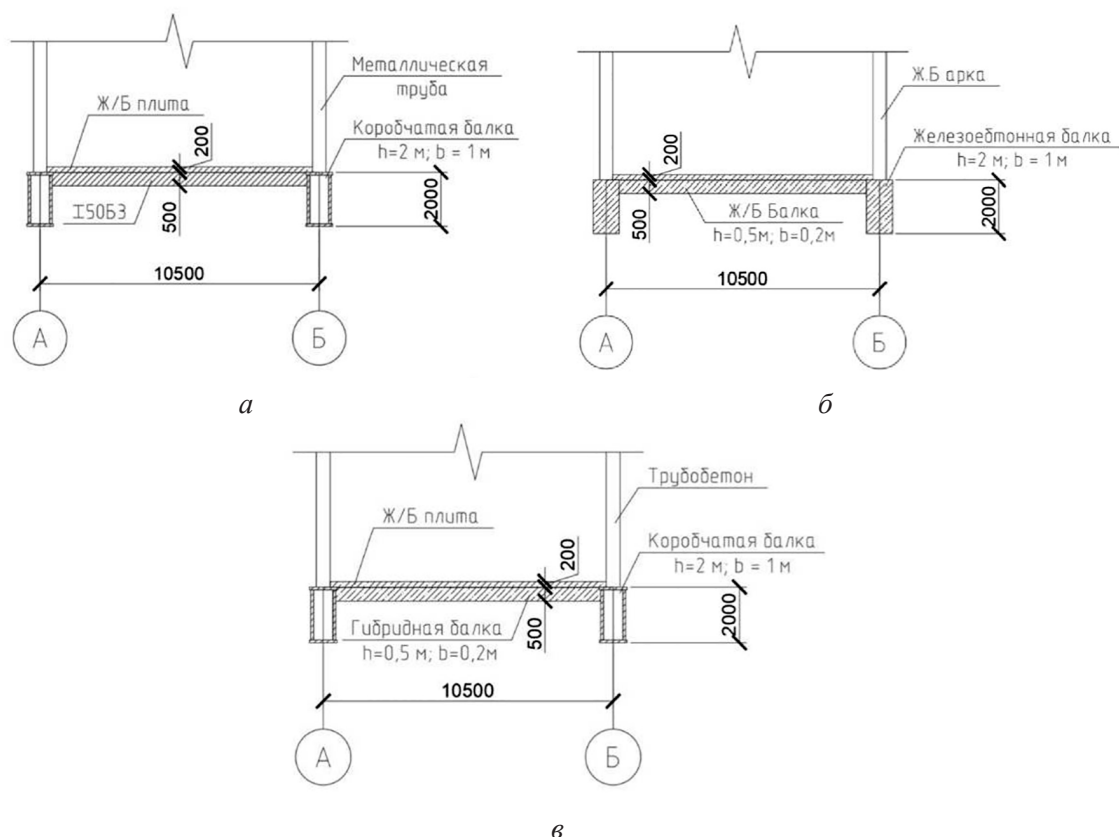


Рис. 7. Поперечные сечения вариантов пролетного строения:
а — металлического, *б* — железобетонного, *в* — сталежелезобетонного

бобетонной арки, стальных коробчатых главных балок, гибридных второстепенных балок, монолитно соединенных с железобетонным настилом, и стальных растяжек, соединяющих арку с главными балками.

Для оценки эффективности предлагаемого конструктивного решения в вычислительном комплексе SCAD были сформированы расчетные модели сооружения: с металлическим, с железобетонным и комбинированным пролетным строением. Ширина пролетного строения принята 10,5 м, длина пролетного строения — 100 м. В качестве нагрузок были учтены:

- собственный вес конструкции (задавался с помощью SCAD);
- полезная нагрузка принята от подвижного железнодорожного состава класса С14 с нагрузкой на ось $P = 176,58$ кН.

Расчет конструкций моста выполнялся методом конечных элементов с подбором поперечных сечений по действующим нормативам [16–18] и разработанным инженерным методикам [19, 20].

На рис. 8 представлены деформированные схемы и эпюры усилий рассчитываемых вариантов. В таблице приведен сравнительный анализ вариантов по итогам конструктивного расчета.

По результатам расчетов и анализа установлено, что сталежелезобетонная конструкция пролетного строения имеет повышенную изгибную жесткость на 10–17 %, в сравнении с железобетонной конструкцией имеет более низкий вес, разница составляет 46 %, при экономии стали в сравнении с металлической конструкцией на 23 % и снижении стоимости на 16 %, а также наименьшей трудоемкости изготовления.

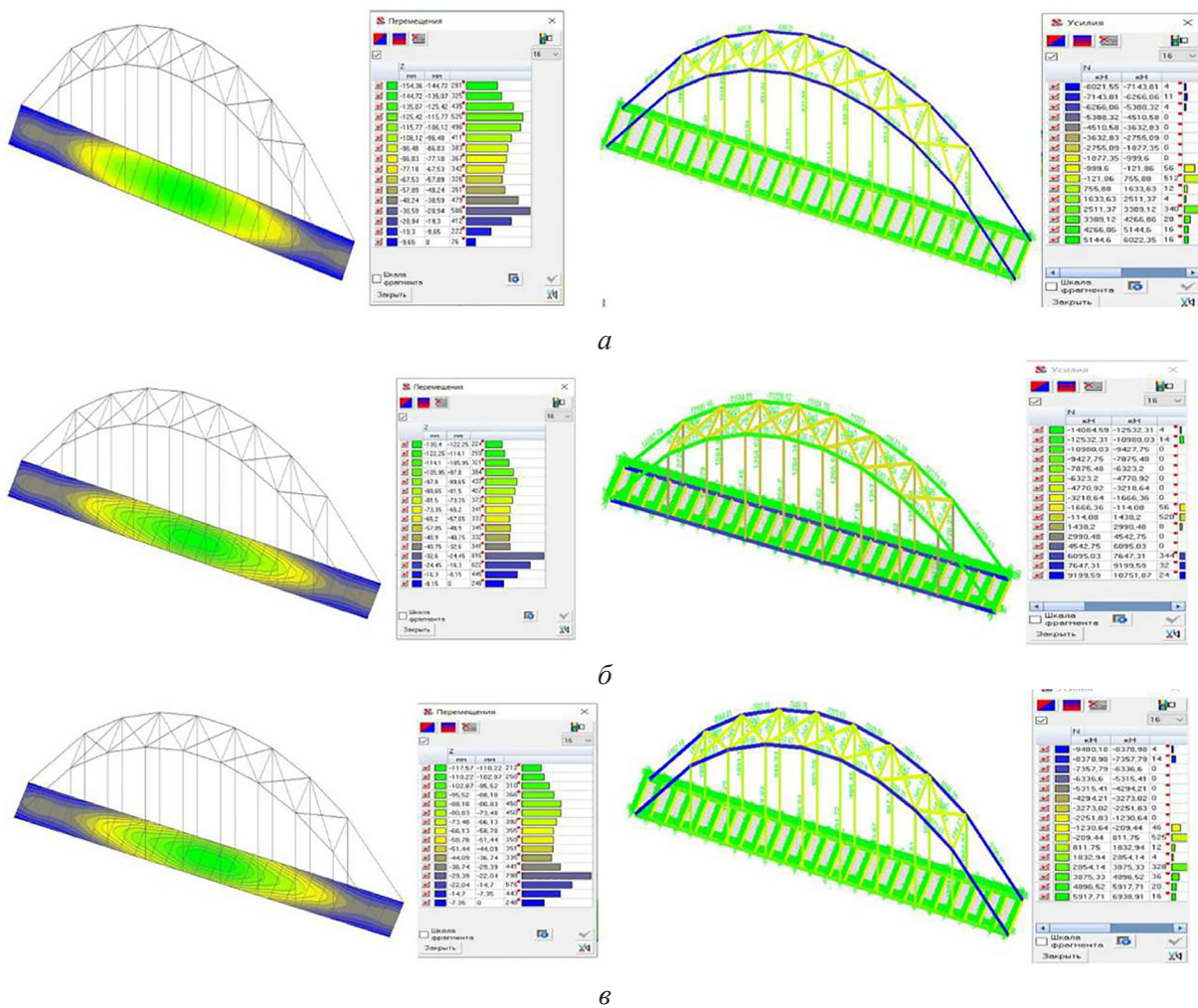


Рис. 8. Деформированные схемы и эпюры усилий рассчитываемых вариантов:
 а — металлического, б — железобетонного, в — сталежелезобетонного

Сравнительный анализ пролетных строений

Тип конструкции	Вес, т	Стоимость, руб	Расход арматуры, т	Расход бетона, м ³	Расход металла, т	Стоимость монтажа, руб.
Металлическое пролетное строение моста	944,1	3 677 526,6	53,81	210,0	419,1	2 133 642,5
Железобетонное пролетное строение моста	2354,2	1 541 162,0	97,77	941,7	—	2 594 216,8
Сталежелезобетонное пролетное строение моста	1269,1	3 081 614, 8	47,8	381,0	316,5	2 058 106,0

Применение трубобетона для арочных элементов, фибробетона для второстепенных балок, монолитность настила и балок пролетного строения обеспечивают эффективность конструкции пролетного строения при повышении его надежности и долговечности.

Заключение

Разработан ряд сталебетонных и гибридных балочных конструкций для применения на транспорте, в том числе для пролетных строений мостов. Запатентованные при участии автора конструктивные решения использованы для арочной

конструкции пролетного строения железнодорожного моста большого пролета. Выполнен расчет нескольких вариантов пролетного строения по действующим методикам с использованием действующих норм и численных методов расчета. Предлагаемый инновационный вариант комбинированной конструкции пролетного строения позволяет повысить изгибную жесткость на 10–17 %, снизить вес до 46 % в сравнении с железобетонной конструкцией, при экономии стали в сравнении с металлической конструкцией на 23 % и снижении стоимости на 16 %, а также уменьшить трудоемкость изготовления при повышении надежности и долговечности за счет рационального использования материалов. Предложенное конструктивное решение может быть рационально к применению при тяжелых подвижных нагрузках и значительных пролетах, где применение железобетонных конструкций невозможно по эстетическим требованиям, требованиям трещиностойкости и эксплуатационной надежности.

Библиографический список

1. Веселов В. Гибридные балочные конструкции транспортных сооружений / В. Веселов, К. Талантова // Конспекты лекций по сетям и системам 402 LNNS. — С. 278. — DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_31.
2. Белый А. А. Применение композитных материалов при ремонте мостовых сооружений / А. А. Белый, Э. С. Карапетов, Е. С. Цыганкова и др. // Композитные системы на объектах подземного и гражданского строительства: сборник трудов Первой Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27–28 сентября 2018 года. — Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2019. — С. 47–54.
3. 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.
4. Цыганкова Е. С. Применение композитных материалов для обеспечения надежности железобетонных мостов / Е. С. Цыганкова, А. А. Белый, Э. С. Карапетов // Актуальные проблемы безопасности дорожного движения: материалы 71-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 04–06 апреля 2018 года. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. — С. 32–36.
5. Смирнов В. Н. Строительство мостовых сооружений / В. Н. Смирнов; ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». — М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2023. — 456 с.
6. Дмитренко Е. А. Основные типы дефектов и повреждений железобетонных конструкций транспортных сооружений, причины их возникновения / Е. А. Дмитренко, Н. В. Почтар // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. — 2016. — № 3(119). — С. 134–138.
7. Карапетов Э. С. Эксплуатационная надежность мостовых сооружений в суровых климатических условиях / Э. С. Карапетов, А. А. Белый // Путьевой навигатор. — 2020. — № 43(69). — С. 2.
8. СТО 002494680-0032—2004. Стандарт организации. Сталежелезобетонные пролетные строения автодорожных мостов. Реконструкция и ремонт.
9. СП 159.1325800.2014. Сталежелезобетонные пролетные строения автодорожных мостов. Правила расчета.
10. ГОСТ Р 59624—2021. Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Проектирование сталежелезобетонных элементов.
11. Патент № 2745287 Российская Федерация, МПК E04C 3/293. Сталежелезобетонная балка / В. В. Веселов, В. В. Егоров. — Заявл. 07.09.2020; опублик. 23.03.2021, Бюл. № 9.
12. 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.

13. Патент № 176462 Российская Федерация, МПК E04C 3/293, E04C 3/07, E04B 1/30. Многопролетная несущая балка / В. В. Веселов, А. М. Федоров. — Заявл. 12.09.2017; опубл. 19.01.2018, Бюл. № 2.

14. Патент № 2789683 Российская Федерация, МПК E04C 3/29. Гибридная балка / К. В. Талантова, В. В. Веселов, Д. В. Балаев, Е. Д. Фролова. — Заявл. 13.07.2022; опубл. 07.02.2023, Бюл. № 4.

15. Патент № 182163 Российская Федерация, МПК E04C 3/293. Сталебетонная ферма / В. В. Веселов. — Заявл. 07.05.2018; опубл. 06.08.2018, Бюл. № 22.

16. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23—81.

17. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.

18. СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования.

19. Методы расчета сталебетонных балок / В. В. Веселов, А. М. Федоров // Современное промышленное и гражданское строительство. — 2018. — Т. 14. — № 2. — С. 97–107.

20. Талантова К. В. Оптимизация расхода стальной фибры при проектировании конструкций на основе сталефибробетона / К. В. Талантова // Известия вузов. Строительство. — Новосибирск, 2014. — № 8. — С. 99–106.

Дата поступления: 12.07.2023

Решение о публикации: 28.08.2023

Контактная информация:

ВЕСЕЛОВ Виталий Владиславович — канд. техн. наук, доц.; veselov.1977@inbox.ru

Application of Steel-Reinforced Concrete Structures in Bridge Constructions

V. V. Veselov

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

For citation: Veselov V. V. Application of Steel-Reinforced Concrete Structures in Bridge Constructions // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 633–644. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-633-644

Summary

Purpose: To analyze the possible use of combined structures for bridge superstructures, to expand the range of steel-reinforced concrete structures, to explore innovative structural solutions for beams with low material consumption and increased reliability and durability. **Methods:** Analysis of the advantages of known combined structures, of materials used for their design, calculation of design options of bridge superstructures with the use of existing engineering techniques and involving calculation programs. **Results:** Traditional design solutions of bridge superstructures do not always have sufficient reliability and durability. A number of effective beam structures have been developed at the Department of “Building Structures, Buildings and Constructions” of the PGUPS, which can be used in bridge structures. New developments of beams with the use of steel-reinforced concrete and steel-fiber concrete are presented. A combined design of the bridge superstructure with the use of steel-reinforced concrete and steel-fiber concrete, protected by patents for inventions, is proposed. Static and constructive calculation of superstructure variants has been performed with the use of the SCAD computing complex, the stress-strain state of the structure has been analyzed, the reduction of material consumption, labor intensity and other advantages of the combined superstructure design in comparison with traditional solutions of superstructure constructions made of steel and reinforced concrete have been considered. **Practical significance:** The advantages of combined constructions for bridge structures have been identified, a decrease

in the material intensity and labor intensity of the proposed design solutions has been established with an increase in the bending stiffness of the superstructure, its reliability and durability. The proposed structural solutions of beams can be used for bridges of large spans in conditions of heavy dynamic loads.

Keywords: Bridges, superstructure, steel-reinforced concrete structure, combined beams, steel-fiber concrete, pipe concrete, material intensity, reliability, durability.

References

1. Veselov V., Talantova K. Gibridnye balochnye konstruktzii transportnykh sooruzheniy [Hybrid beam structures of transport structures]. *Konspekty lektsiy po setyam i sistemam 402 LNNS* [Lecture notes on networks and systems 402 LNNS]. P. 278. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_31. (In Russian)
2. Bely A. A., Karapetov E. S., Tsygankova E. S. et al. *Primenenie kompozitnykh materialov pri remonte mostovykh sooruzheniy. Kompozitnye sistemy na ob"ektakh podzemnogo i grazhdanskogo stroitel'stva: sbornik trudov Pervoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 27–28 sentyabrya 2018 goda* [The use of composite materials in the repair of bridge structures. Composite systems at underground and civil construction facilities: Proceedings of the First International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, September 27–28, 2018]. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I Publ., 2019, pp. 47–54. (In Russian)
3. Veselov V. *Primenenie stalezhelezobetonnykh balochnykh konstruktсий v transportnom stroitel'stve* [Application of steel-reinforced concrete beam structures in transport construction]. *Konspekty lektsiy po setyam i sistemam 402 LNS* [Lecture notes on networks and systems 402 LNS]. P. 269. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_30. (In Russian)
4. Tsygankova E. S., Bely A. A., Karapetov E. S. *Primenenie kompozitnykh materialov dlya obespecheniya nadezhnosti zhelezobetonnykh mostov. Aktual'nye problemy bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya: materialy 71-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh, Sankt-Peterburg, 04–06 aprelya 2018 goda* [The use of composite materials to ensure the reliability of reinforced concrete bridges. Actual problems of road safety: Materials of the 71st All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, postgraduates and Young scientists, St. Petersburg, April 04–06, 2018]. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering Publ., 2018, pp. 32–36. (In Russian)
5. Smirnov V. N. *Stroitel'stvo mostovykh sooruzheniy; FGBU DPO "Uchebno-metodicheskiy tseñtr po obrazovaniyu na zhelezodorozhnom transporte"* [Construction of bridge structures; FSBI DPO "Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport"]. Moscow: FGBI DPO "Educational and Methodological Center for education in railway transport" Publ., 2023, 456 p. (In Russian)
6. Dmitrenko E. A., Pochtar N. V. *Osnovnye tipy defektov i povrezhdeniy zhelezobetonnykh konstruktсий transportnykh sooruzheniy, prichiny ikh vozniknoveniya* [The main types of defects and damages of reinforced concrete structures of transport structures, the causes of their occurrence]. *Vestnik Donbasskoy natsional'noy akademii stroitel'stva i arkhitektury* [Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture]. 2016, Iss. 3(119), pp. 134–138. (In Russian)
7. Karapetov E. S., Bely A. A. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' mostovykh sooruzheniy v surovyykh klimaticheskikh usloviyakh* [Operational reliability of bridge structures in harsh climatic conditions]. *Putevoy navigator* [Travel navigator]. 2020, Iss. 43(69), p. 2. (In Russian)
8. *STO 002494680-0032—2004. Standart organizatsii. Stalezhelezobetonnye proletnye stroeniya avtodorozhnykh mostov. Rekonstruktsiya i remont* [STO 002494680-0032—2004. The standard of the organization. Steel-reinforced concrete superstructures of road bridges. Reconstruction and repair]. (In Russian)
9. *SP 159.1325800.2014. Stalezhelezobetonnye proletnye stroeniya avtodorozhnykh mostov. Pravila rascheta* [SP 159.1325800.2014. Steel-reinforced concrete superstructures of road bridges. Calculation rules]. (In Russian)

10. GOST R 59624—2021. *Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Mostovye sooruzheniya. Proektirovanie stalezhelezobetonnykh elementov* [GOST R 59624—2021. Public roads. Bridge structures. Design of steel-reinforced concrete elements]. (In Russian)
11. Veselov V. V., Egorov V. V. *Stalezhelezobetonnyaya balka* [Steel-reinforced concrete beam]. Patent RF, no. 2745287, 2021. (In Russian)
12. Veselov V. V., Egorov V. V. *Stalebetonnaya balka* [Steel-concrete beam]. Patent RF, no. 2627810, 2017. (In Russian)
13. Veselov V. V., Fedorov A. M. *Mnogoproletnaya nesushchaya balka* [Multi-span load-bearing beam]. Patent RF, no. 176462, 2018. (In Russian)
14. Talantova K. V., Veselov V. V., Balaev D. V. et al. *Gibridnaya balka* [Hybrid beam]. Patent RF, no. 2789683, 2023. (In Russian)
15. Veselov V. V. *Stalebetonnaya ferma* [Steel-concrete farm]. Patent RF, no. 182163, 2018. (In Russian)
16. SP 16.13330.2017. *Stal'nye konstruksii Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP II-23—81* [SP 16.13330.2017. Steel structures Updated edition of SNIIP II-23—81]. (In Russian)
17. SP 63.13330.2018. *Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya* [SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions]. (In Russian)
18. SP 266.1325800.2016. *Konstruksii stalezhelezobetonnye. Pravila proektirovaniya* [SP 266.1325800.2016. Steel-reinforced concrete structures. Design rules]. (In Russian)
19. Veselov V. V., Fedorov A. M. *Metody rascheta stalebetonnykh balok* [Methods of calculation of steel-concrete beams]. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Modern industrial and civil construction]. 2018, vol. 14, Iss. 2. pp. 97–107. (In Russian)
20. Talantova K. V. *Optimizatsiya raskhoda stal'noy fibry pri proektirovanii konstruksiy na osnove stalefibrobetona* [Optimization of steel fiber consumption in the design of structures based on steel fiber concrete]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of universities. Construction]. Novosibirsk, 2014, Iss. 8, pp. 99–106. (In Russian)

Received: July 12, 2023

Accepted: August 28, 2023

Author's information:

Vitaliy V. VESELOV — PhD in Engineering, Associate Professor; e-mail: veselov.1977@inbox.ru

УДК 624.021

Вопросы проектирования и строительства мостовых сооружений для отечественных высокоскоростных железнодорожных магистралей

В. Н. Смирнов

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

Для цитирования: Смирнов В. Н. Вопросы проектирования и строительства мостовых сооружений для отечественных высокоскоростных железнодорожных магистралей // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 645–659. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-645-659

Аннотация

Цель: Осветить на текущий момент состояние вопроса по проектированию и строительству отечественных мостовых сооружений для высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ) и разработать предложения по конструктивно-техническим решениям многопролетных мостовых сооружений эстакадного типа, обеспечивающим работы эстакад вне условий резонанса. **Методы:** Использован метод анализа конструктивно-технологических решений зарубежных мостовых сооружений на линиях ВСМ и проектных разработок отечественных проектировщиков. **Результаты:** Приведенное в статье обобщение мирового и отечественного опыта проектирования и строительства инфраструктуры ВСМ позволяет разработать определенные рекомендации по проектированию и строительству мостовых сооружений на ВСМ в России. Актуальность темы заключается в необходимости получения данных, требуемых для возведения мостовых объектов на ВСМ в отечественных условиях, поскольку пока собственные ВСМ у нас отсутствуют. **Практическая значимость:** В статье описаны особенности конструкций мостовых сооружений на ВСМ, требования, предъявляемые к искусственным сооружениям, работающим в условиях высокоскоростного движения поездов, дается описание мостовых сооружений, построенных за рубежом, а также проектно-конструкторские разработки отечественных проектных организаций. Дается оценка некоторым мостовым объектам ВСМ, построенным в Германии, Южной Корее, Испании. Особо подчеркивается высокий уровень уникальных мостовых сооружений ВСМ, построенных за последние годы в Китае. Разработаны предложения по конструктивно-технологическим решениям мостовых многопролетных регулярных сооружений в виде эстакад исходя из недопущения резонансных эффектов в системе «поезд — мост» при движении подвижного состава с высокими скоростями. Делается вывод о способности отечественного мостового сообщества успешно решать задачи, связанные с возведением мостовых сооружений для отечественных высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Ключевые слова: высокоскоростная железнодорожная магистраль, мостовое сооружение, требования к мостам ВСМ, многопролетная эстакада, зарубежный опыт, резонансный эффект.

Введение

Как показывает опыт развитых стран, строительство высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ) под пассажирское движение целесообразно по многим причинам. В частности, строительство ВСМ мотивирует общество к

ускорению технического прогресса, появлению новых рабочих мест, позволяет решать наиболее эффективно транспортные задачи.

В странах Европы, Азии и Америки строительство ВСМ ведется достаточно интенсивно. В нашей стране интерес к высокоскоростному

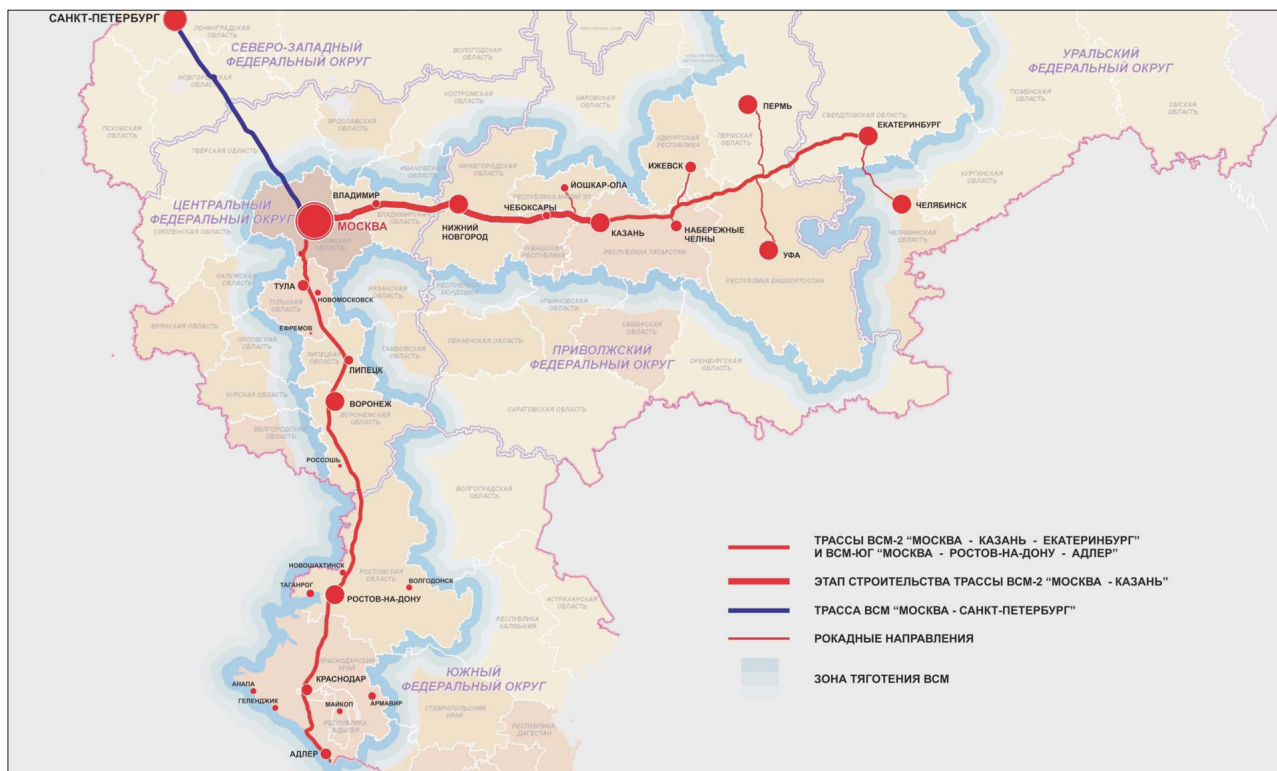


Рис. 1. Перспективная сеть ВСМ РФ на сегодняшний день

движению поездов появился в конце двадцатого века. Были намечены варианты основных трасс ВСМ в России, из которых сохранились приведенные на рис. 1.

Как наиболее важная для страны намечалась ВСМ Москва — Санкт-Петербург. До мая 2013 года она предполагалась как первая в России ВСМ, но ее строительство так и не было начато. В 2006 году для организации предпроектных работ было создано ОАО «Скоростные магистрали». В мае 2013 года президент России В. В. Путин объявил о решении построить в 2014–2018 годах первую в РФ ВСМ Москва — Казань с перспективой продолжения ее до Екатеринбурга. В связи с этим проект ВСМ Москва — Санкт-Петербург был отложен на неопределенное время. Правда, когда в апреле 2019 года проект Москва — Казань был отложен, снова возобновилось проектирование ВСМ Москва — Санкт-Петербург. Однако в ноябре 2021 года появилось

сообщение, что Правительство РФ рассматривает возможность отказа от строительства ВСМ Москва — Санкт-Петербург и проведения усиления объектов действующего главного хода магистрали для возможности реализации на действующей линии высокоскоростного движения.

Таким образом, положение с высокоскоростным движением пассажирских поездов в стране остается неопределенным. Тем не менее логика мирового развития транспорта требует готовности научных, проектных и мостостроительных организаций к выполнению работ, связанных с подготовкой к высокоскоростному движению пассажирских поездов. Следует заметить, что в этом направлении отечественными специалистами проделана большая работа, создан определенный задел.

Важнейшим элементом ВСМ являются мостовые сооружения в виде мостов, эстакад, виадуков, путепроводов.

1. Особенности мостов ВСМ и предъявляемые к мостовым сооружениям требования

К основным особенностям, учет которых необходим при проектировании искусственных сооружений для ВСМ, следует отнести [1–7] следующие:

- высокая интенсивность движения поездов (по опыту ВСМ «Токайдо» в Японии она составляет 15 отправок в час);
- достаточно высокая стоимость строительства и эксплуатации (цена строительства 1 км — 12–30 млн €; стоимость годового обслуживания 1 км — 70 тыс. €; стоимость обслуживания одного поезда — 1 млн € в год);
- повышенная динамика элементов системы «мост — поезд» при высокоскоростном движении;
- уменьшенная по сравнению с действующими нормами временная подвижная нагрузка (предельная нагрузка на ось 11–17 тс);
- высокая удельная тяговая мощность (11–24 кВт на 1 т массы);
- повышенные требования к элементам верхнего строения пути на мостах и подходах (шпалы — железобетонные, моноблочные или двухблочные, с эпорой более 1666 шт. на 1 км; масса рельсов не менее 60 кг/пог. м, при этом рельсы сваренные в плети «бесконечной» длины, желателен «от стрелки до стрелки»; рельсовые скрепления — пружинных типов);

В связи с отмеченными особенностями к мостам ВСМ предъявляются ряд требований [8–14]:

- высокая жесткость пролетных строений (минимизация допустимых прогибов);
- необходимость учета аэродинамического воздействия со стороны высокоскоростного подвижного состава;
- плавное сопряжение моста и насыпей подходов к мосту во избежание толчков при въезде на мост;

– учет совместной работы элементов системы «мост — бесстыковой путь» при температурных и силовых воздействиях;

– целесообразность применения двухпутных пролетных строений (пролетное строение под два пути);

– учет возможности пропуска по мостам ВСМ не только пассажирских, но и грузовых поездов технологического назначения;

– учет возможности резонансных режимов при движении высокоскоростных поездов по мостовым сооружениям эстакадного типа;

– продольный уклон пути на мосту — не более 0,024, радиус горизонтальных кривых — не менее 10 000 м, радиус вертикальной кривой на мосту — не менее 42 000 м.

2. Конструктивные решения железобетонных и металлических пролетных строений мостов на ВСМ из мирового опыта

В мировой практике мостостроения используются мостовые сооружения балочной (разрезной и неразрезной) системы, а также рамные, вантовые и арочные мосты.

Из опыта Германии

В настоящее время на высокоскоростных линиях акционерного общества «Германские железные дороги» (DB AG) часто применяются мостовые сооружения со статически неопределимыми схемами пролетных строений. Такие конструкции обладают хорошими эксплуатационными качествами и долговечностью, в то же время они экономичны при сохранении эстетической привлекательности. Однако в качестве типовых конструкций приняты железобетонные разрезные коробчатые балки под два пути с ездой на балласте (рис. 2).

Интересным техническим решением является конструкция трехпролетного неразрезного

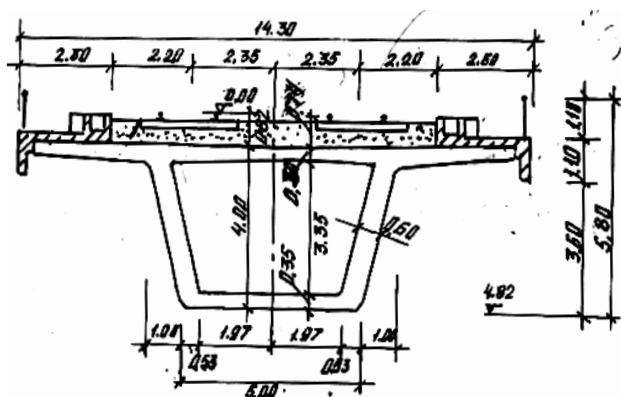


Рис. 2. Пролетное строение на мостах ВСМ, широко применяемое в Германии

пролетного строения с ездой поверху моста через р. Майн в Нантенбахе на двухпутной скоростной линии Ганновер — Вюрцбург по схеме $83,2 + 208,0 + 83,2$ м (рис. 3). Пролетное строение моста выполнено в виде сталежелезобетонной решетчатой системы с ездой поверху, ферма имеет простую треугольную решетку с криволи-

нейным нижним поясом. Помимо устройства в верхнем поясе железобетонной плиты, включенной с ним в совместную работу, в нижних опорных зонах ферм пролетных строений устроены сталежелезобетонные плиты, усиливающие нижние сжатые пояса главных ферм.

Из опыта Испании

Первым сталежелезобетонным мостом, предназначенным для пропуска составов ВСМ в Испании, является мост через реку Арройо-Лас-Пьедрас. Пролетное строение моста представляет собой неразрезную многопролетную балку по схеме: $50,4 + 17 \times 63,5 + 44 + 35$ м (рис. 4). На момент окончания строительства в 2008 году он был рекордным по длине пролетов такого типа. Высота промежуточных опор моста превышает 93 м.

Поперечное сечение пролетного строения составляют две металлические сплошностенчатые балки, объединенные сверху железобетонной плитой.

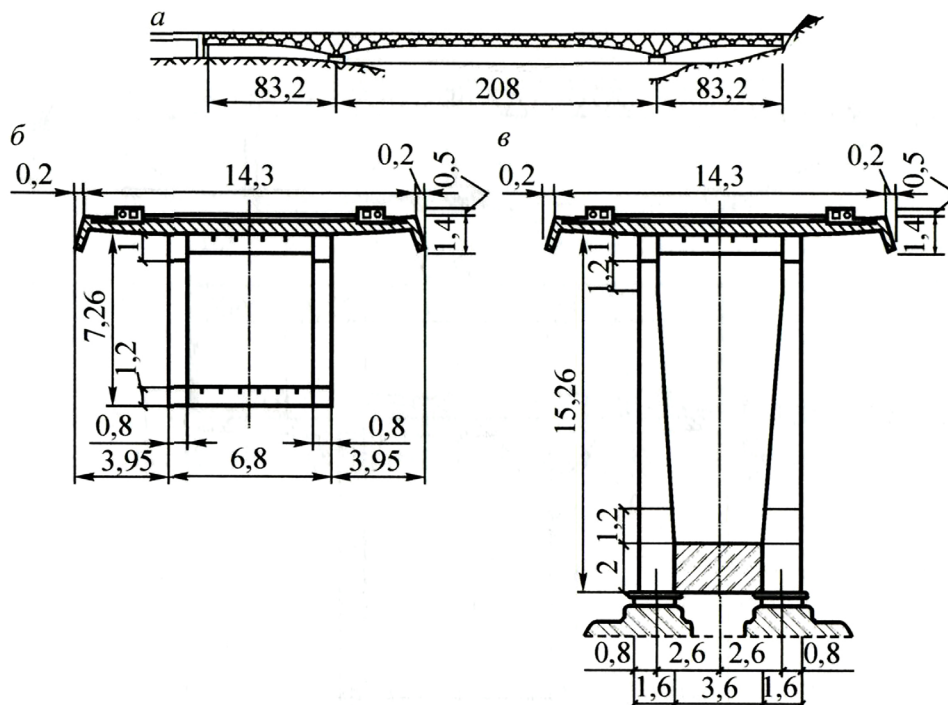


Рис. 3. Мост через Майн в Нантенбахе:

a — общая схема; *б*, *в* — поперечные сечения в пролете и на средней опоре; *г* — фрагмент нижнего пояса главной фермы в зоне среднего опорного узла; *д* — разрез А — А

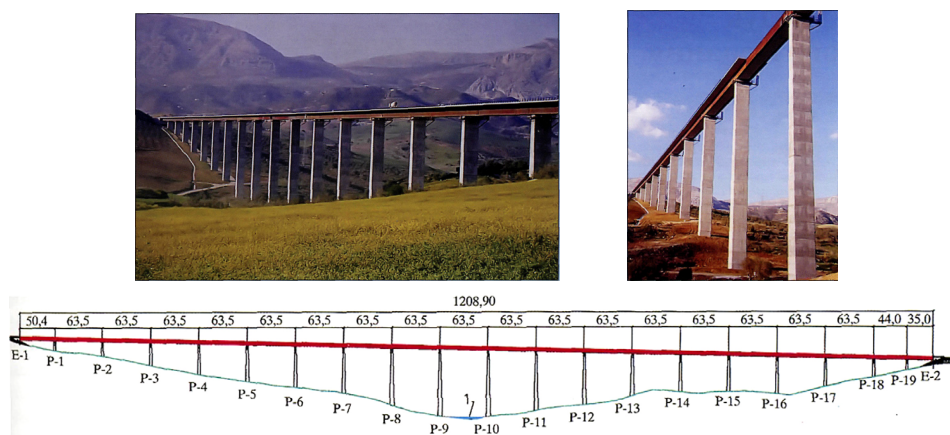


Рис. 4. Мост в Испании через реку Арройо-Лас-Пьедрас (общий вид и схема)

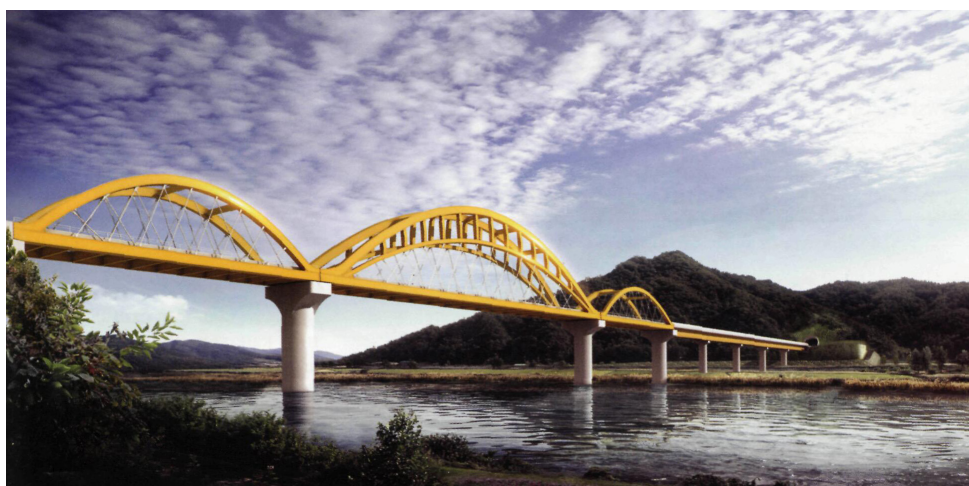


Рис. 5. Общий вид моста Кумган в Южной Корее

Опыт Южной Кореи

Мостовой переход Кумган расположен на скоростной железнодорожной магистрали Хоман. Арочная часть моста имеет длину 300 м и состоит из центрального пролета 130 м и двух боковых по 85 м (рис. 5).

Балки проезжей части арочных пролетных строений — сталежелезобетонные, железобетонные промежуточные опоры имеют высоту до 40 м.

Из опыта Китая

Китайские инженеры в последние годы при строительстве мостов на ВСМ применили ряд смелых оригинальных решений, в частности предложив под железнодорожное движение вантовые мосты. Одним из примеров сооружений вантовой системы

под высокоскоростное движение является мост Тяньксинджоу через реку Янцзы в городе Ухань. По мосту пропускается автотранспорт и, кроме того, проложены четыре пути железной дороги. В состав мостового перехода входят северная эстакада длиной 2956 м, центральная вантовая часть длиной 1092 м и южная эстакада подходов длиной 609 м.

Для моста были запроектированы двухъярусные пролетные строения со сталежелезобетонными балочными фермами (рис. 6). Верхний ярус предназначен под автомобильное движение по три полосы в каждом направлении, а на нижнем уложены четыре железнодорожных пути — два для грузовых поездов и два для высокоскоростной линии. В поперечном сечении пролетного строения размещены три фермы (рис. 7).



Рис. 6. Общий вид моста Тяньсинджоу во время строительства

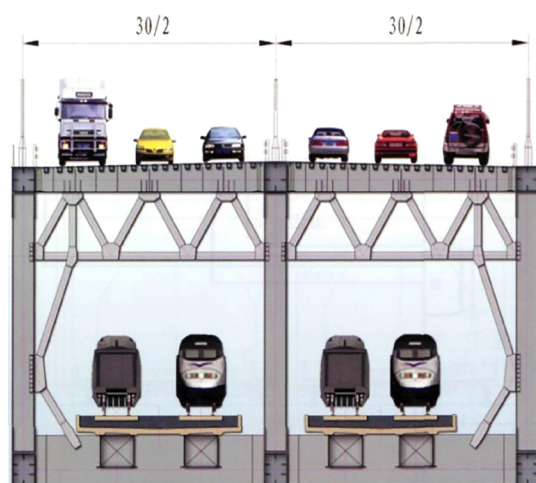


Рис 7. Поперечное сечение пролетного строения моста

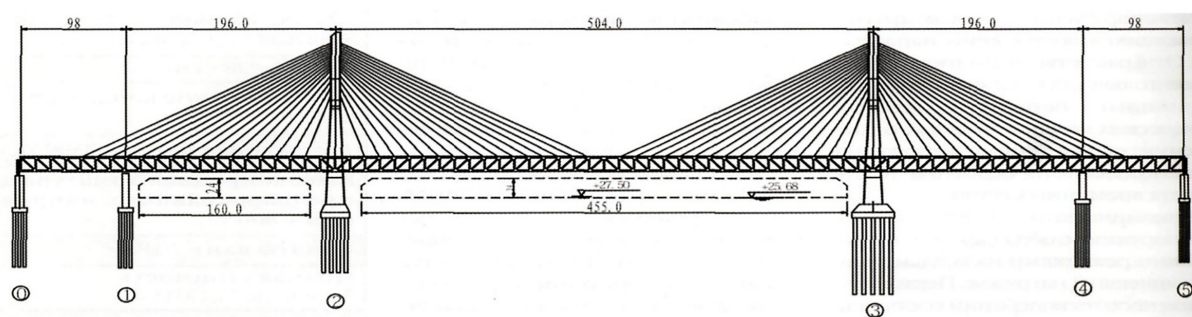


Рис. 8. Вантовая часть мостового перехода Тяньсинджоу

Вантовая часть моста состоит из пяти пролетов по схеме 98 + 196 + 504 + 196 + 98 м (рис. 8). Балка жесткости вантового пролетного строения выполнена в виде металлической фермы Гау шириной 31 м и высотой 17 м.

3. Отечественный опыт проектирования мостов ВСМ

В России пока нет высокоскоростных железнодорожных линий. Однако, используя зарубежный опыт [15], а также свои наработки, отечествен-

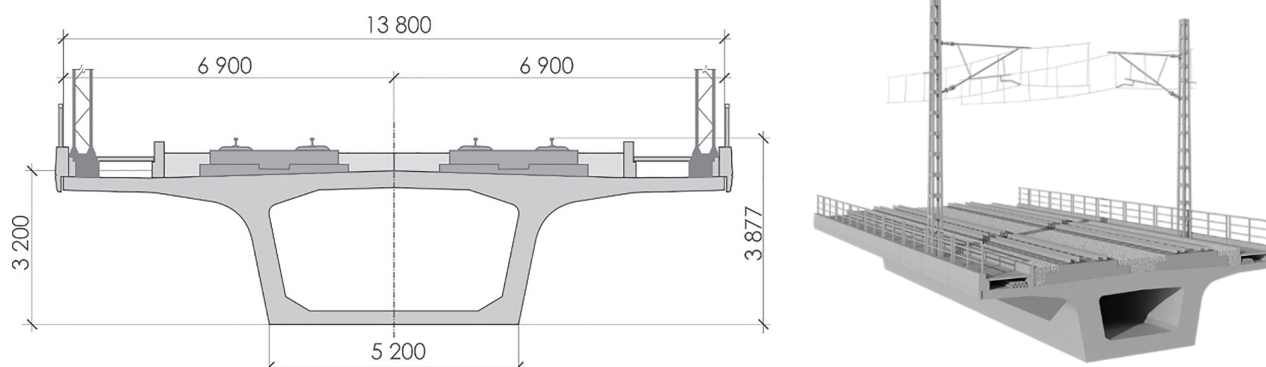


Рис. 9. Поперечное сечение пролетного строения полной длиной 23,6 м из предварительно напряженного железобетона

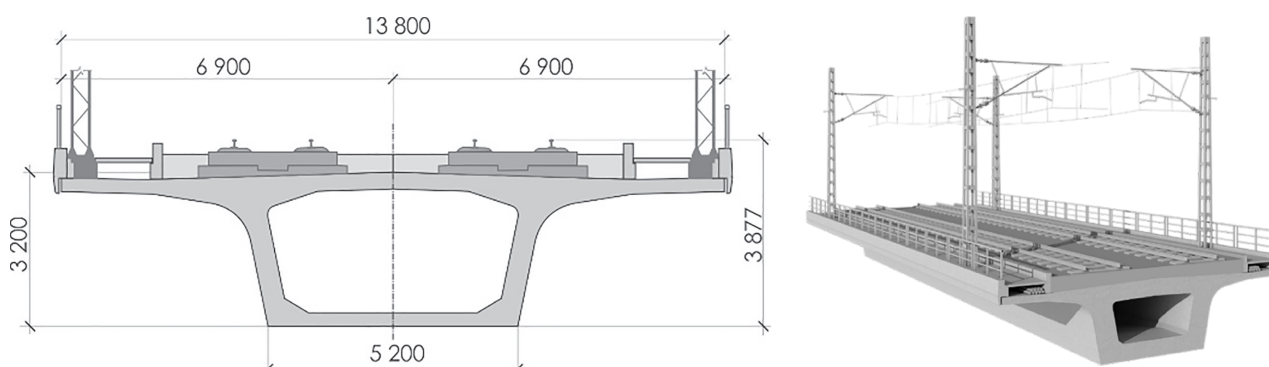


Рис. 10. Поперечное сечение пролетного строения полной длиной 34,2 м из предварительно напряженного железобетона (расчетный пролет 33,1 м)

ные инженеры разработали нормативные документы на проектирование отечественных ВСМ. Они касались проектирования ВСМ «Москва — Санкт-Петербург» и «Москва — Казань», предполагавшихся к строительству [16, 17] (см. рис. 1).

На основании этих документов отечественными проектными организациями разработан ряд проектов мостовых сооружений ВСМ.

Пролетные строения балочно-разрезной системы из предварительно напряженного железобетона

Институтом Гипростроймост для пролетов до 50 м были разработаны проекты разрезных балочных пролетных строений коробчатого сечения под два пути из предварительно напряженного железобетона мостовых сооружений ВСМ 2 (Москва — Казань), предназначенных для движе-

ния поездов со скоростями до 350 км/час. Балочные пролетные строения с ездой поверху имеют полную длину 23,6; 34,2 и 50 м. Пролетные строения запроектированы в различном исполнении:

- монолитные железобетонные пролетные строения, изготавливаемые на объекте строительства в проектном положении на подмостях;
- сборные пролетные строения, изготавливаемые на приобъектном полигоне и монтируемые специальным монтажным агрегатом.

Пролетные строения имеют коробчатое сечение и запроектированы из предварительно напряженного железобетона с натяжением на бетон. Бетон балки проектного строения по прочности класса В40. Поперечные сечения пролетных строений (рис. 9–11) выполнены в виде коробки под два пути с наклонными стенками. Общая ширина пролетных строений поверху 13,8 м. Толщина

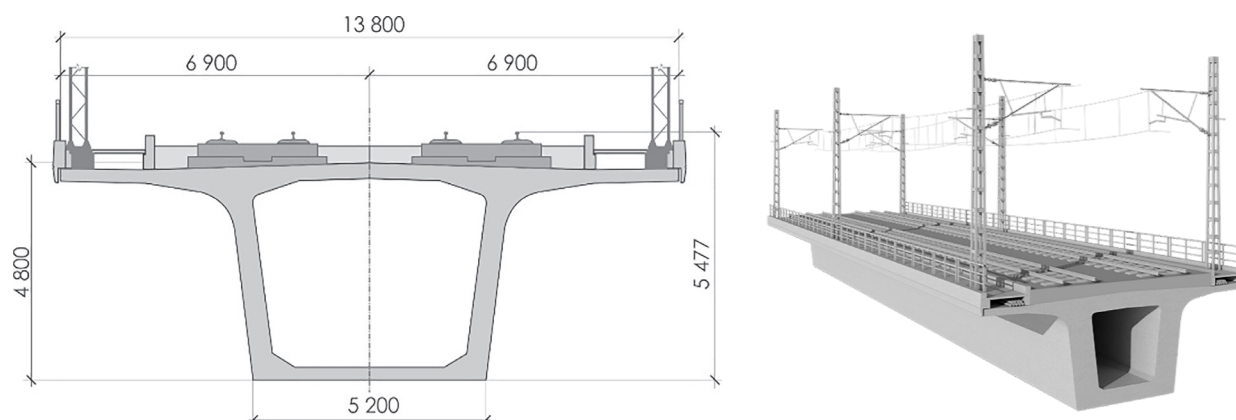


Рис. 11. Поперечное сечение пролетного строения полной длиной 50 м из предварительно напряженного железобетона

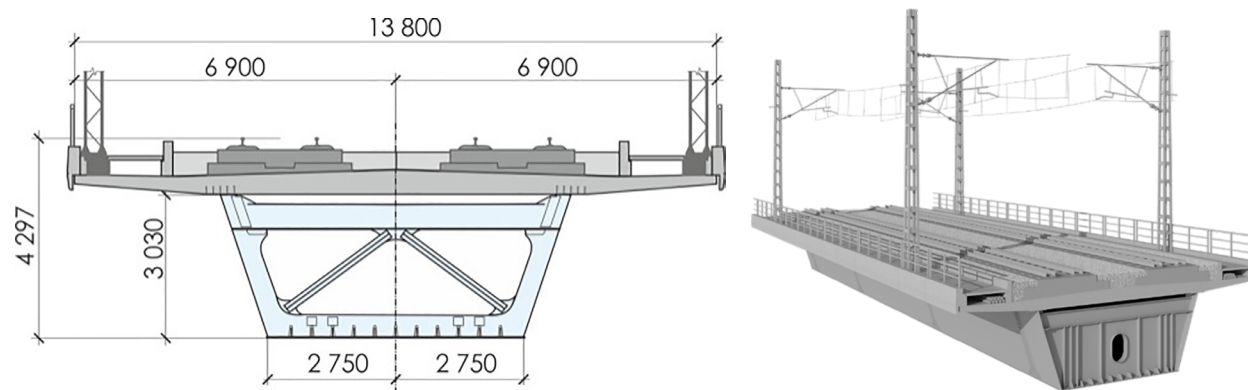


Рис. 12. Поперечное сечение сталежелезобетонного пролетного строения полной длиной 34,2 м (расчетный пролет 32,1 м)

наклонных стенок коробчатой части пролетного строения изменяется от опоры к середине пролета от 1,0 до 0,45 м.

Сталежелезобетонные пролетные строения мостовых сооружений ВСМ 2 (Москва — Казань) балочно-разрезной системы

Сталежелезобетонные пролетные строения длиной 34,2 и 50,0 м представляют собой металлическую главную балку коробчатого сечения с наклонными стенками под два пути (рис. 12, 13). В уровне нижнего пояса стенки главной балки обоих пролетных строений объединены ребристой плитой с продольными полосовыми ребрами, в уровне верхнего пояса — поперечными балками. Материалы основных металлоконструкций балок пролетных строений выполнены из стали 10ХСНД и 15ХСНД.

Проектом предполагаются следующие возможные технологии монтажа:

- сборка на подмостях в виде временных опор под каждым стыком монтажных блоков;
- монтаж стреловыми кранами или специальным монтажным агрегатом;
- продольная надвигка с временным объединением разрезных балок в двухпролетную неразрезную конструкцию.

Коробчатые неразрезные балки пролетных строений из монолитного предварительно напряженного железобетона пролетом более 50 м

В случае пролетов, превышающих 50 м, целесообразным становится применение балочно-неразрезных систем. При этом для мостов ВСМ предпочтительно использование предварительно

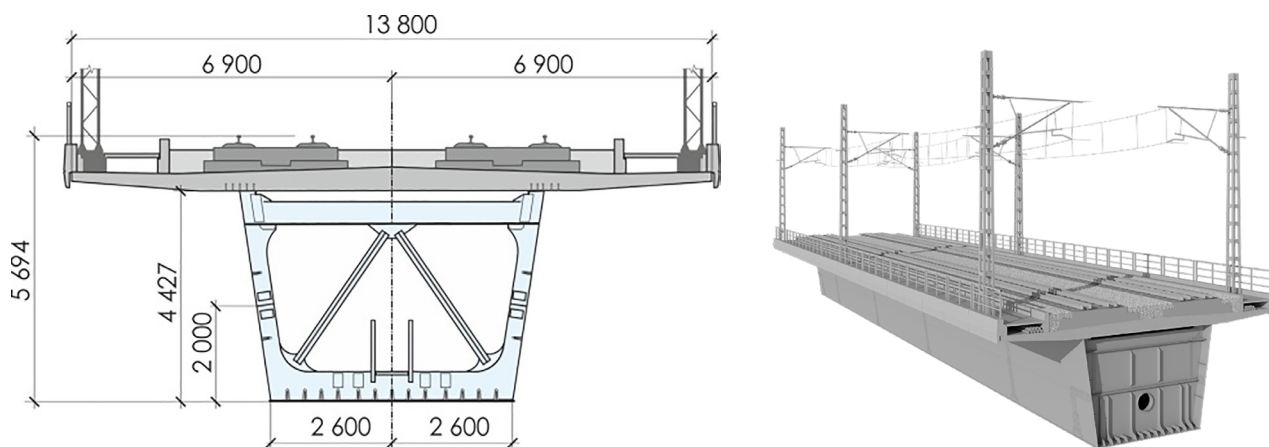


Рис. 13. Поперечное сечение сталежелезобетонного пролетного строения полной длиной 50,0 м

ПРОЛЕТНЫЕ СТРОЕНИЯ ДЛЯ УЧАСТКОВ ВЫСОКОСКОРСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

НЕРАЗРЕЗНОЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЕ ПРОЛЕТНОЕ СТРОЕНИЕ (монолитное)

- 40,60+66,0+40.60
 - Расчетный пролет - 40+60+40.
 - Изготовление в проектном положении
- Стр. высота - 3 377 (в пролете), 6177 (на опоре)
 Масса - 5 775,5 т.

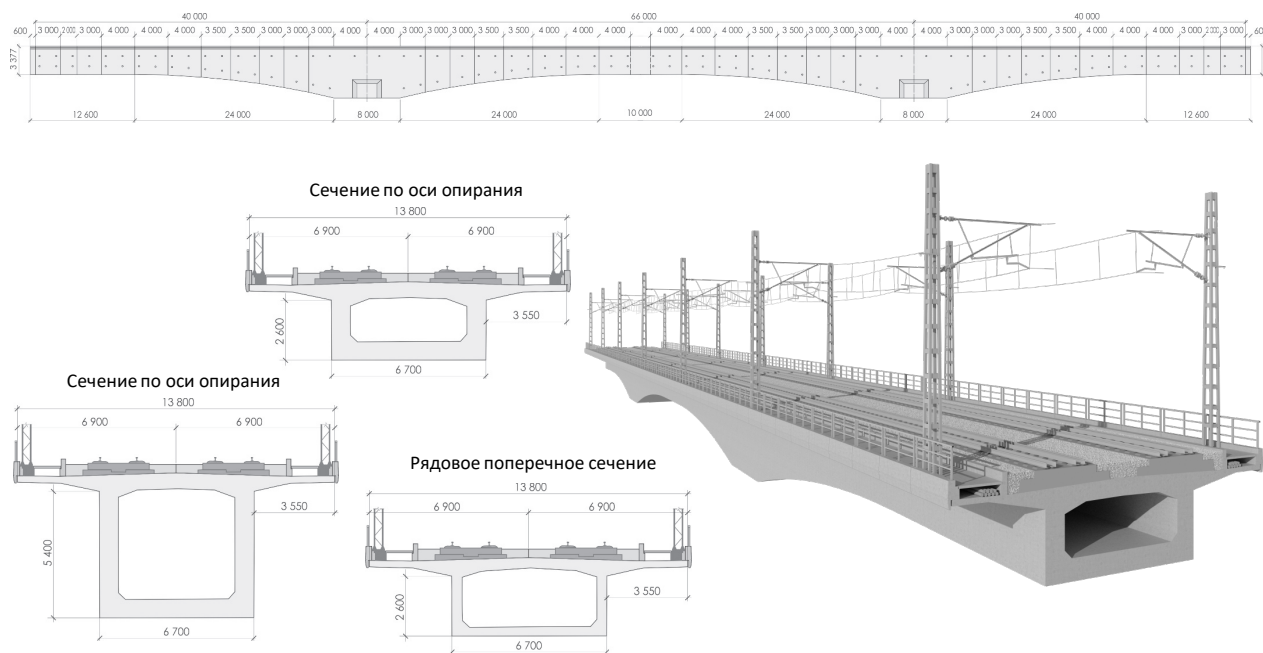


Рис. 14. Неразрезное пролетное строение под ВСМ проектировки Института Гипростроймост для ВСМ 2 (Москва — Казань)

напряженного железобетона, учитывая его повышенные по сравнению с металлом диссипативные свойства (рис. 14, 15).

Методы сооружения таких пролетных строений, имеющих, как правило, переменную высоту,

известны и широко используются в практике отечественного мостостроения.

Прежде всего это наплавной монтаж секций неразрезного пролетного строения. По этой технологии секция пролетного строения изготовля-



Рис. 15. Визуализация моста через Волгу на ВСМ Москва — Казань
(проект Института Гипростроймост)

ется на берегу с последующей ее доставкой в пролет на плавучих опорах. Эта технология широко используется в отечественной практике.

Другим способом, также применяемым отечественными мостостроителями, является навесное бетонирование. По этой технологии пролетное строение наращивается от опоры вдоль моста консолями посекционно, причем для бетонирования секции длиной 3–5 м используются короткие передвижные подмости с длиной, равной длине секции. В процесс изготовления входит устройство над промежуточной опорой так называемой стартовой секции, для чего выполняется обстройка подмостями надопорной зоны, на которых затем сооружается опалубка, производится армирование и бетонирование надопорной секции (с оставлением арматурных выпусков для омоноличивания с последующими секциями), набор бетоном прочности и натяжение арматурных пучков. На стартовой площадке размещаются передвижные подмости для бетонирования последующих секций, после чего выполняется бетонирование секций пролетного строения симметрично относительно промежуточной опоры с натяжением арматурных проволочных пучков на бетон. Затем подмости передвигаются симметрично промежуточной

опоры для бетонирования двух следующих секций. Далее процесс повторяется. В отечественной практике можно отметить построенный по такой технологии городской мост в Иркутске, где было реализовано навесное бетонирование пролетных строений с пролетами 105 м.

Неразрезные пролетные строения из предварительно напряженного железобетона при пролетах до 30 м

При проектировании мостовых сооружений с пролетами до 30 м для отечественных ВСМ рекомендовались, как правило, разрезные балки коробчатого сечения разрезной системы. При этом сооружение их предполагалось либо с бетонированием на подмостях в пролете, либо монтажом балок консольно-шлюзовыми агрегатами большой грузоподъемности. Первый способ требует специальных подмостей (стационарных или передвижных), второй вызывает технологические трудности в связи с необходимостью транспортировки от места изготовления до места монтажа балок весьма большой массы (600–700 т). Потому в виде альтернативы предлагается использовать при пролетах до 30 м неразрезные балочные системы с параллельными поясами,

а осуществлять монтаж железобетонных балок коробчатого сечения пролетом до 30 м методом циклической продольной надвигки (ЦПН). Суть его заключается в том, что пролетное строение посекционно сооружается на специальном стапеле насыпи подхода, где выполняются опалубочные, арматурные и бетонные работы в пределах длины секции, после чего забетонированная секция объединяется с предыдущей с установкой напрягаемой арматуры, и неразрезное пролетное строение передвигается в пролет на длину секции по накаточным устройствам, установленным на опорах. В зарубежной практике такой метод использовался, например, в возведении моста на скоростной линии Ганновер — Вюрцбург в долине р. Майн (Германия), где надвигалось железобетонное балочное пролетное строение длиной 1262 м и массой 42 500 т.

4. Выводы и рекомендации по проектированию мостовых сооружений на отечественных ВСМ

В мостовых сооружениях эстакадного типа с пролетами до 30 м целесообразно рассмотреть возможность применения железобетонных монолитных пролетных строений не только из сборного, но и из монолитного железобетона. При этом система сооружения может быть не только разрезной, но и балочно-неразрезной (поперечное сечение пролетного строения в обоих случаях в виде одной коробки под два пути). Как известно, неразрезные балки в сравнении с разрезными имеют повышенную жесткость и плавную линию прогибов, что является важнейшими достоинствами для мостов ВСМ. Технологии сооружения монолитных железобетонных неразрезных пролетных строений не требуют мощного грузоподъемного, транспортного и монтажного оборудования. Для эстакад на ВСМ это метод ЦПН (циклическая продольная надвигка), для большепролетных мостов через водотоки —

метод навесного бетонирования или наплавной монтаж.

При проектировании регулярных искусственных сооружений типа эстакад для обеспечения следования высокоскоростных поездов с постоянной заданной скоростью по всей длине трассы необходимо иметь у эстакад одинаковые пролеты. Величина оптимального пролета назначается из условия недопущения резонансных режимов движения поездов (с критическими скоростями, при которых возможны динамические коэффициенты, в разы превышающие до сих пор известные).

Рекомендуется в этой связи при проектировании эстакад следующий порядок действий:

а) для всей трассы (кроме большепролетных мостов) устанавливается скорость движения высокоскоростных поездов (например, $V_{\text{уст}} = 350$ км/ч);

б) определяется возможный набор типов временной подвижной нагрузки (желательно один тип), на основании чего определяется длина экипажа B (например, $B = 20,1$ м);

в) под установленную временную подвижную нагрузку разрабатываются эскизные проекты пролетных строений различной длины при разрезной системе и длины пролета при неразрезной (например, $L = 20,0$; $L = 30,0$; $L = 40,0$; $L = 50,0$ м) с определением первой и второй собственных частот каждого пролетного строения ν_1, ν_2 ;

г) определяются критические (резонансные) скорости движения подвижной нагрузки по эстакаде с пролетными строениями длиной $L = 20,0$; $L = 30,0$; $L = 40,0$; $L = 50,0$ м при разрезной системе и аналогичными пролетами при неразрезной по формуле:

$$V_{\text{кр}} = B \nu \text{ (м/с)}.$$

В случае близости величин скоростей, установленной и критической ($V_{\text{уст}}$ и $V_{\text{кр}}$), для данного пролетного строения следует изменить инерционно-жесткостные характеристики пролетного строения для изменения величины его собствен-

ной частоты с целью выведения колебаний балки из резонансной зоны.

Таким образом, при заданной скорости движения и известной длине экипажа пролетные строения не будут испытывать резонансных колебаний.

Заключение

Исходя из обусловленной большими размерами нашей страны необходимости преодолевать рельсовым транспортом большие расстояния за минимальное время, становится насущно актуальным решение задачи по строительству высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ) в РФ. Важнейшим элементом ВСМ являются мостовые сооружения.

Отечественное мостостроение способно решать сложные задачи по проектированию и строительству российских высокоскоростных железнодорожных магистралей. Технологии строительства, применявшиеся за рубежом при строительстве ВСМ, используются и в нашей практике и могут быть реализованы при строительстве отечественных ВСМ.

Библиографический список

1. Смирнов В. Н. Мосты на высокоскоростных железнодорожных магистралях / В. Н. Смирнов, А. А. Барановский и др. — СПб.: ПГУПС. — 2015. — 274 с.
2. Бенин А. В. Особенности проектирования и строительства мостов высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва — Казань» / А. В. Бенин, Л. К. Дьяченко, В. Н. Смирнов // Известия Петербургского университета путей сообщения — ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. — С. 15–20.
3. Смирнов В. Н. Специальные вопросы проектирования и строительства транспортных объектов: курс лекций / В. Н. Смирнов, Л. К. Дьяченко. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2019. — 140 с.
4. Смирнов В. Н. Особенности высокоскоростного движения железнодорожных экспрессов по мостам / В. Н. Смирнов // Новые технологии в мостостроении (от прошлого к будущему): сборник трудов Международной научно-технической конференции 2015 года. — ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. — С. 50–57.
5. Смирнов В. Н. Из истории разработки проекта специальных технических условий для проектирования мостов на ВСМ 2 Москва — Казань / В. Н. Смирнов, Г. И. Богданов // Новые технологии в мостостроении (от прошлого к будущему): сборник трудов Международной научно-технической конференции 2015 года. — ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. — С. 57–67.
6. Киселев И. П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учебное пособие в 2-х т. / И. П. Киселев, Л. С. Блажко, Н. С. Бушуев и др.; под редакцией И. П. Киселева. — М., 2014. — Т. 1.
7. Петров А. П. Особенности проектирования мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях. Новые технологии в мостостроении: мосты на высокоскоростных железнодорожных магистралях: сб. трудов / А. П. Петров: под ред. В. Н. Смирнова. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2013. — С. 8–12.
8. Смирнов В. Н. Учет резонансных явлений при проектировании мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях / В. Н. Смирнов, Л. К. Дьяченко // Путь и путевое хозяйство. — 2021. — № 6. — С. 30–33.
9. Смирнов В. Н. Методика определения динамических воздействий подвижного состава на мосты при высокоскоростном движении / В. Н. Смирнов, А. В. Ланг, Н. А. Лабутин // Известия ПГУПС. — 2022. — С. 90–96.
10. Смирнов В. Н. Влияние неровностей пути на вертикальные ускорения при высокоскоростном движении поездов на мостах / В. Н. Смирнов, А. В. Ланг, Н. А. Лабутин // Известия ПГУПС. — 2021. — Вып. 3. — С. 335–339.
11. Смирнов В. Н. Расчет мостов высокоскоростных железнодорожных магистралей на продольные силы: монография / В. Н. Смирнов. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2013. — 65 с.
12. Смирнов В. Н. Динамическая работа мостов высокоскоростных железнодорожных магистралей при продольных воздействиях поездной нагрузки: моногра-

фия / В. Н. Смирнов. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2013. — 65 с.

13. Смирнов В. Н. Исследование работы мостов с бесстыковым путем / В. Н. Смирнов // Путь и путевое хозяйство. — 2018. — № 4. — С. 15–17.

14. Смирнов В. Н. Взаимодействие бесстыкового пути с мостовыми сооружениями на высокоскоростных магистралях: учебное пособие / В. Н. Смирнов. — М.: ФГБОУ УМЦ ЖДТ, 2015. — 96 с.

15. EN 1991-2 (2003): Eurocode 1: Actions on structures — Part 2: Traffic loads on bridges.

16. СТУ для проектирования, строительства и эксплуатации новой ВСМ «Москва — Санкт-Петербург». Согласованы Минрегиона РФ от 28.07.2009.

17. Специальные технические условия. Сооружения искусственные участка Москва — Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Казань — Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству. — СПб., 2014. — 271 с.

Дата поступления: 17.07.2023

Решение о публикации: 25.08.2023

Контактная информация:

СМИРНОВ Владимир Николаевич — д-р техн. наук, проф.; svn193921@rambler.ru

Issues of Design and Construction of Bridge Structures for Domestic High-Speed Railways

V. N. Smirnov

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

For citation: Smirnov V. N. Issues of Design and Construction of Bridge Structures for Domestic High-Speed Railways // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 645–659. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-645-659

Summary

Purpose: The purpose is to highlight the state of the issue on the design and construction of domestic bridge structures for high-speed railways (HSR) and to develop proposals for structural and technical solutions for multi-span bridge structures of the overpass type, ensuring the operation of overpasses outside the resonance conditions. **Methods:** The method of analysis of structural and technological solutions of foreign bridge structures on HSR lines and design developments of domestic designers has been used. **Results:** The generalization of the world and domestic experience in the design and construction of the HSR infrastructure given in the article allows us to develop certain recommendations for the design and construction of bridge structures on the HSR in Russia. The relevance of the topic lies in the need to obtain data required for the construction of bridge facilities on the HSR in domestic conditions, since we do not have our own HSR yet. **Practical significance:** The article describes the design features of bridge structures on the HSR, the requirements for artificial structures operating in conditions of high-speed train traffic, describes bridge structures built abroad, as well as project and design developments of domestic design organizations. An assessment is given to some of the bridge facilities of the HSR built in Germany, South Korea, Spain. The high level of unique bridge structures of the HSR built in recent years in China is particularly emphasized. Proposals have been developed for structural and technological solutions of bridge multi-span regular structures in the form of overpasses based on the prevention of resonant effects

in the “train — bridge” system during the movement of rolling stock at high speeds. The conclusion is made about the ability of the domestic bridge community to successfully solve the problems associated with the construction of bridge structures for domestic high-speed railways.

Keywords: High-speed railway, bridge construction, requirements for HSR bridges, multi-span overpass, foreign experience, resonant effect.

References

1. Smirnov V. N., Baranovskiy A. A. et al. *Mosty na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh* [Bridges on high-speed railway lines]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2015, 274 p. (In Russian)
2. Benin A. V., D'yachenko L. K., Smirnov V. N. Osobennosti proektirovaniya i stroitel'stva mostov vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magistrali “Moskva — Kazan'” [Features of the design and construction of bridges of the Moscow-Kazan high-speed railway line]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2015, pp. 15–20. (In Russian)
3. Smirnov V. N., D'yachenko L. K. *Spetsial'nye voprosy proektirovaniya i stroitel'stva transportnykh ob'ektov: kurs lektsiy* [Special issues of design and construction of transport facilities: a course of lectures]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2019, 140 p. (In Russian)
4. Smirnov V. N. *Osobennosti vysokoskorostnogo dvizheniya zheleznodorozhnykh ekspressov po mostam. Novye tekhnologii v mostostroenii (ot proshlogo k budushchemu): sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii 2015 goda* [Peculiarities of high-speed movement of railway express trains on bridges. New technologies in bridge building (from the past to the future): Proceedings of the International Scientific and Technical Conference 2015]. St. Petersburg: FGBOU VPO PGUPS Publ., 2015, pp. 50–57. (In Russian)
5. Smirnov V. N., Bogdanov G. I. *Iz istorii razrabotki proekta spetsial'nykh tekhnicheskikh usloviy dlya proektirovaniya mostov na VSM 2 Moskva — Kazan'. Novye tekhnologii v mostostroenii (ot proshlogo k budushchemu): sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii 2015 goda* [From the history of the development of the project of special technical conditions for the design of bridges on the high-speed line 2 Moscow — Kazan. New technologies in bridge building (from the past to the future): collection of works International Scientific and Technical Conference 2015]. St. Petersburg: FGBOU VPO PGUPS Publ., 2015, pp. 57–67. (In Russian)
6. Kiselev I. P., Blazhko L. S., Bushuev N. S. et al.; ed. by I. P. Kiselev. *Vysokoskorostnoy zheleznodorozhnyy transport. Obshchiy kurs: uchebnoe posobie v 2-kh tomakh* [High-speed rail transport. General course: textbook in 2 volumes]. Moscow, 2014, vol. 1. (In Russian)
7. Petrov A. P.; ed. by V. N. Smirnova. *Osobennosti proektirovaniya mostov na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh. Novye tekhnologii v mostostroenii: mosty na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh: sb. trudov* [Design features of bridges on high-speed railway lines. New technologies in bridge building: bridges on high-speed railway lines: Sat. Proceedings]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2013, pp. 8–12. (In Russian)
8. Smirnov V. N., D'yachenko L. K. Uchet rezonansnykh yavleniy pri proektirovanii mostov na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh [Accounting for resonance phenomena in the design of bridges on high-speed railway lines]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Way and track management]. 2021, Iss. 6, pp. 30–33. (In Russian)
9. Smirnov V. N., Lang A. V., Labutin N. A. Metodika opredeleniya dinamicheskikh vozdeystviy podvizhnogo sostava na mosty pri vysokoskorostnom dvizhenii [Methods for determining the dynamic effects of rolling stock on bridges during high-speed traffic]. *Izvestiya PGUPS* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2022, pp. 90–96. (In Russian)
10. Smirnov V. N., Lang A. V., Labutin N. A. Vliyanie nerovnostey puti na vertikal'nye uskoreniya pri vysokoskorostnom dvizhenii poezdov na mostakh [Influence of track irregularities on vertical accelerations at high-speed

movement of trains on bridges]. *Izvestiya PGUPS* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2021, Iss. 3, pp. 335–339. (In Russian)

11. Smirnov V. N. *Raschet mostov vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralей na prodol'nye sily: monografiya* [Calculation of bridges of high-speed railway lines for longitudinal forces: monograph]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2013, 65 p. (In Russian)

12. Smirnov V. N. *Dinamicheskaya rabota mostov vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralей pri prodol'nykh vozdeystviyakh poezdnoy nagruzki: monografiya* [Dynamic operation of bridges of high-speed railway lines under longitudinal effects of a train load: monograph]. St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2013, 65 p. (In Russian)

13. Smirnov V. N. *Issledovanie raboty mostov s besstykovym putem* [Research of work of bridges with jointless way]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Way and track economy]. 2018, Iss. 4, pp. 15–17. (In Russian)

14. Smirnov V. N. *Vzaimodeystvie besstykovogo puti s mostovymi sooruzheniyami na vysokoskorostnykh magistralyakh: uchebnoe posobie* [Interaction of a seamless path with bridge structures on high-speed highways: a tutorial]. Moscow: FGBOU UMTs ZhDT Publ., 2015, 96 p. (In Russian)

15. EN 1991-2 (2003): Eurocode 1: Actions on structures — Part 2: Traffic loads on bridges.

16. *STU dlya proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii novoy VSM "Moskva — Sankt-Peterburg"*. *Soglasovany Minregiona RF ot 28.07.2009* [STU for the design, construction and operation of the new Moscow — St. Petersburg high-speed line. Agreed by the Ministry of Regional Development of the Russian Federation on 28.07.2009]. (In Russian)

17. *Spetsial'nye tekhnicheskie usloviya. Sooruzheniya iskusstvennye uchastka Moskva — Kazan' vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magistrali Moskva — Kazan' — Ekaterinburg. Tekhnicheskie normy i trebovaniya k proektirovaniyu i stroitel'stvu* [Special technical conditions. Artificial structures of the Moscow — Kazan section of the high-speed railway line Moscow — Kazan — Yekaterinburg. Technical norms and requirements for design and construction]. St. Petersburg, 2014, 271 p. (In Russian)

Received: July 17, 2023

Accepted: August 25, 2023

Author's information:

Vladimir N. SMIRNOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; svn193921@rambler.ru

УДК 624.014+624.971

Применение динамических гасителей колебаний для повышения устойчивости башенных сооружений связи к ветровым воздействиям

Г. А. Богданова, Ж. В. Иванова

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

Для цитирования: Богданова Г. А., Иванова Ж. В. Применение динамических гасителей колебаний для повышения устойчивости башенных сооружений связи к ветровым воздействиям // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 660–672. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-660-672

Аннотация

Цель: Исследовать вопросы в части применения динамических гасителей колебаний в конструкциях башенных сооружений связи для их защиты от воздействия ветровых нагрузок. **Методы:** Выполнить анализ конструктивных особенностей существующих башенных сооружений. Рассмотреть влияние различных факторов, включая и ветровую нагрузку, на выбор конструктивного решения башенных сооружений. Проанализировать климатические параметры района строительства и определить тип башенного сооружения в качестве объекта для проведения данного исследования. Определить критерии качества гашения вибрации, на основе которых осуществляется подбор конструкции динамического гасителя колебаний (ДГК), и провести расчет его массы. Провести расчетное исследование выбранного типа сооружения с учетом ветровых нагрузок и оценить эффективность предлагаемого решения динамического гасителя колебаний на повышение устойчивости башенных сооружений связи в районах с порывами ветра более 25 м/с. **Результаты:** Представлены результаты исследования конструкции динамического гасителя колебаний, направленных на улучшение условий эксплуатации объектов телекоммуникационной связи в районах с повышенной ветровой нагрузкой. **Практическая значимость:** Показано, что использование динамических гасителей колебаний в башенных сооружениях сотовой связи позволяет снизить амплитуду колебания и максимальные горизонтальные перемещения, возникающие в конструкции башни от воздействий ветра.

Ключевые слова: Конструкции, башенные сооружения, ветровые нагрузки, динамический гаситель, башни сотовой связи.

В настоящее время наблюдается тенденция увеличения зоны покрытия радиосигналами всей территории Российской Федерации. С одной стороны, это обусловлено необходимостью обеспечить потребность граждан своевременной и качественной телефонной и радиосвязью, а с другой стороны, в рамках проводимых реформ, затрагивающих такие сферы деятельности, как жилищно-коммунальные услуги, здравоохране-

ние, образование и др., уделить внимание созданию открытых информационных ресурсов и обеспечению доступа к ним граждан.

Таким образом, формирование единой информационной системы на всей территории РФ играет особую роль и способствует дальнейшему развитию сетевой инфраструктуры, что, в свою очередь, невозможно без возведения башенных сооружений связи.

Наличие различных климатических зон на территории РФ приводит к необходимости при проектировании башенных сооружений связи учитывать факторы, характерные для конкретного региона строительства (например, преобладание вечной мерзлоты, наличие сейсмической активности регионов, сочетание нескольких факторов и др.) [1]. Стоит также отметить, что наибольшая часть усилий и перемещений высотных сооружений возникает от действия ветровой нагрузки, которая зависит не только от скорости ветра и от размеров самого сооружения, но и от конструктивной формы, оцениваемой аэродинамическими коэффициентами.

Наиболее распространенными типами башенных сооружений связи, используемых для целей радио- или сотовой телефонной связи, являются решетчатые трех- или четырехгранные конструкции. Это способствует, с одной стороны, как облегчению конструкций, так и снятию ограничений по высоте, но с другой стороны, приводит к уменьшению жесткости сооружения и, как следствие, делает его более восприимчивым к ветровым нагрузкам, что приводит к возникновению колебаний в конструкции или даже ее опрокидыванию [2–8]. Стоит отметить, что ветровые нагрузки являются вибрационными и оказывают пагубное влияние на усталостный ресурс конструкции в целом.

Однако, несмотря на то, что традиционно башни сотовой связи проектируются с учетом ветровой нагрузки, вопросы, направленные на повышение устойчивости башенных сооружений к их воздействиям по-прежнему остаются актуальными.

Одними из основных нагрузок, действующих на конструкции башенных сооружений, которые необходимо учитывать при проектировании, являются динамические воздействия природного характера, такие как сейсмические толчки и порывы ветра. Особенность динамических нагрузок является их изменчивость по времени (пери-

одические и непериодические). Наиболее распространенным видом периодической нагрузки является гармонический вид. Непериодические же нагрузки носят импульсивный характер большой интенсивностью однократного (удар, взрыв) или повторного (воздействие морских волн, порывы ветра, сейсмика) действия.

Стоит отметить, что механическая система обладает свойством накапливать энергию от периодического повторения динамических воздействий, что, в свою очередь, приводит к постепенному увеличению амплитуды колебаний и, как следствие, к разрушению от воздействия даже малой интенсивности из-за возникающего резонанса.

Поэтому для проектирования и дальнейшей эксплуатации телекоммуникационных сооружений необходимо снижать действие вибрационных нагрузок. Этого возможно достигнуть за счет изменения геометрических параметров сооружений, придания их архитектурным формам более обтекаемых очертаний, а также использования дополнительных технических средств, заставляющих рассеивать энергию колебаний самими сооружениями. Одним из наиболее рациональных способов снижения колебаний башенных сооружений является применение динамических гасителей колебаний (ДГК) [9, 10], которые по своей конструкции бывают следующих типов:

- гасители с гибким элементом (пружинные);
- маятниковые;
- комбинированные гасители, использующие внутреннее трение в элементе (вязкие демпферы).

В данной статье приводятся результаты исследования башенного сооружения связи, возводимого в районах с повышенной ветровой нагрузкой.

Для проведения исследований, учитывая разнообразный характер внешних воздействий различных климатических зон территории Российской Федерации, был выбран г. Ставрополь (V ветровой район [11], сейсмичность площадки строительства — 7 баллов [12]). Наибольшая

среднемесячная скорость ветра в Ставрополе составляет 5,6 м/с. Наибольшую опасность как для высотных зданий, так и для башен связи представляют порывы ветра, превышающие 25 м/с, что может вызвать повреждения и увеличение нагрузки на рассматриваемые объекты. Для Ставропольского края вероятность возникновения таких ветров составляет примерно 58%, или один раз в полтора года.

Объект исследования представляет собой четырехгранную башенную конструкцию, выполненную из одиночных уголков, соединяемых на болтах, высотой 50 м (рис. 1). Внутри башни для подъема обслуживающего персонала на нее по всей высоте предусмотрена лестница-стремянка с площадками отдыха.

Расчетное исследование включало в себя несколько этапов.

На первом этапе проводился выбор типа и характеристик динамического гасителя колебаний (ДГК), предназначенного для защиты башенного сооружения от воздействий ветра.

В качестве системы, обеспечивающей гашение колебаний, предложено использовать ДГК пружинного типа. Составные элементы ДГК представлены на рис. 2, 3:

– масса весом 1,7 т из бетона класса прочности В25;

– демпфер VD630/325-3 фирмы ООО «ЦКТИ-Вибросейсм» со следующими характерными размерами: H — 556 мм; A — 646 мм; B — 542 мм; d — 60 мм; s — 35 мм;

– технические характеристики: вес — 535 кг; номинальная нагрузка: 60 000 Н (горизонталь) и 42 000 Н (вертикаль); допускаемые перемещения из номинального положения: горизонталь $\pm a$.

Расчет массы гасителя колебаний для рассматриваемого башенного сооружения выполнялся с использованием расчетно-вычислительного комплекса Mathcad 15 с принятой массой сооружения $m_0 = 17$ т и периодом колебаний башенного сооружения $T_0 = 0,475$ м/с.

Исходя из анализа полученных результатов, для проведения дальнейших расчетных исследований был принят ДГК массой 1,7 т, что составляет 10 % от общей массы рассматриваемого сооружения. Применение данного гасителя позволяет снизить максимальную амплитуду колебаний примерно в 2,5 раза, что способствует увеличению эксплуатационного срока телекоммуникационной башни.

На втором этапе выполнялось построение расчетной модели рассматриваемого сооружения с определением максимальных перемещений башни без гасителя и с ним.

Для проведения расчетов была построена модель башни в вычислительном комплексе SCAD Office 21.1 (рис. 4). Ветровая нагрузка моделировалась как распределенная по высоте нагрузка с учетом коэффициента $k = 1,2$ для типа местности В (городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м).

Ниже на рис. 5 представлены деформированная схема модели башни связи от горизонтальных перемещений (рис. 5, а) и наложение деформированной схемы от ветровых нагрузок на исходную модель башни связи (рис. 5, б) с отображением цветовой индикации величин перемещения в узлах.

На следующем этапе в рассматриваемую модель был введен динамический гаситель колебаний (рис. 6, 7).

Анализ полученных в ходе проведения расчетного исследования результатов представлен ниже в табличной форме.

Высотная отметка, м	Максимальное перемещение, мм (без ДГК)	Максимальное перемещение, мм (С ДГК)
20	13,3	5,1
40	65,1	23,2
50	111,2	37,7

Кроме максимальных перемещений были определены максимальные амплитуды колебаний в сооружении башни связи, которые составили

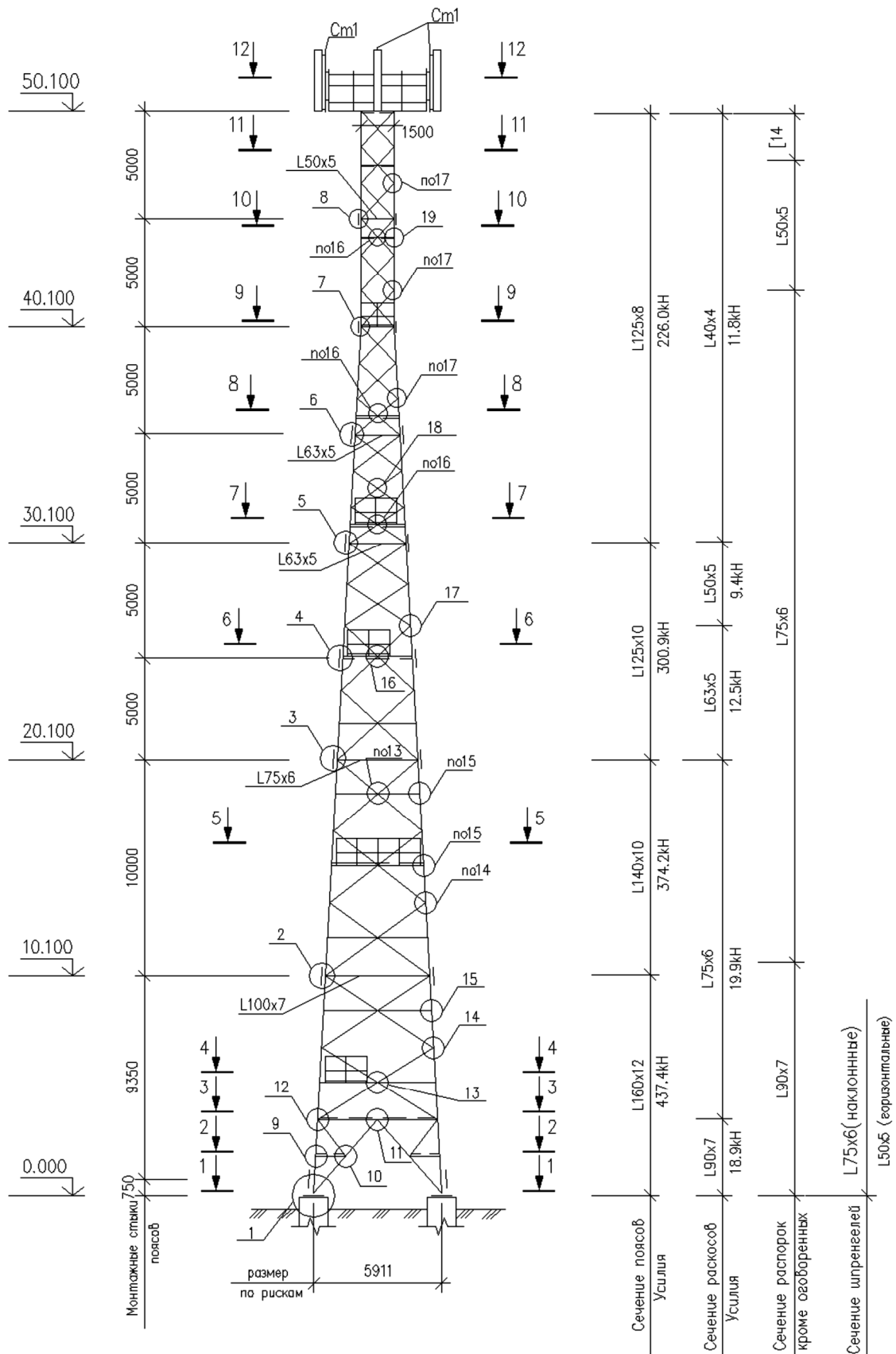


Рис. 1. Общий вид проектируемой башни

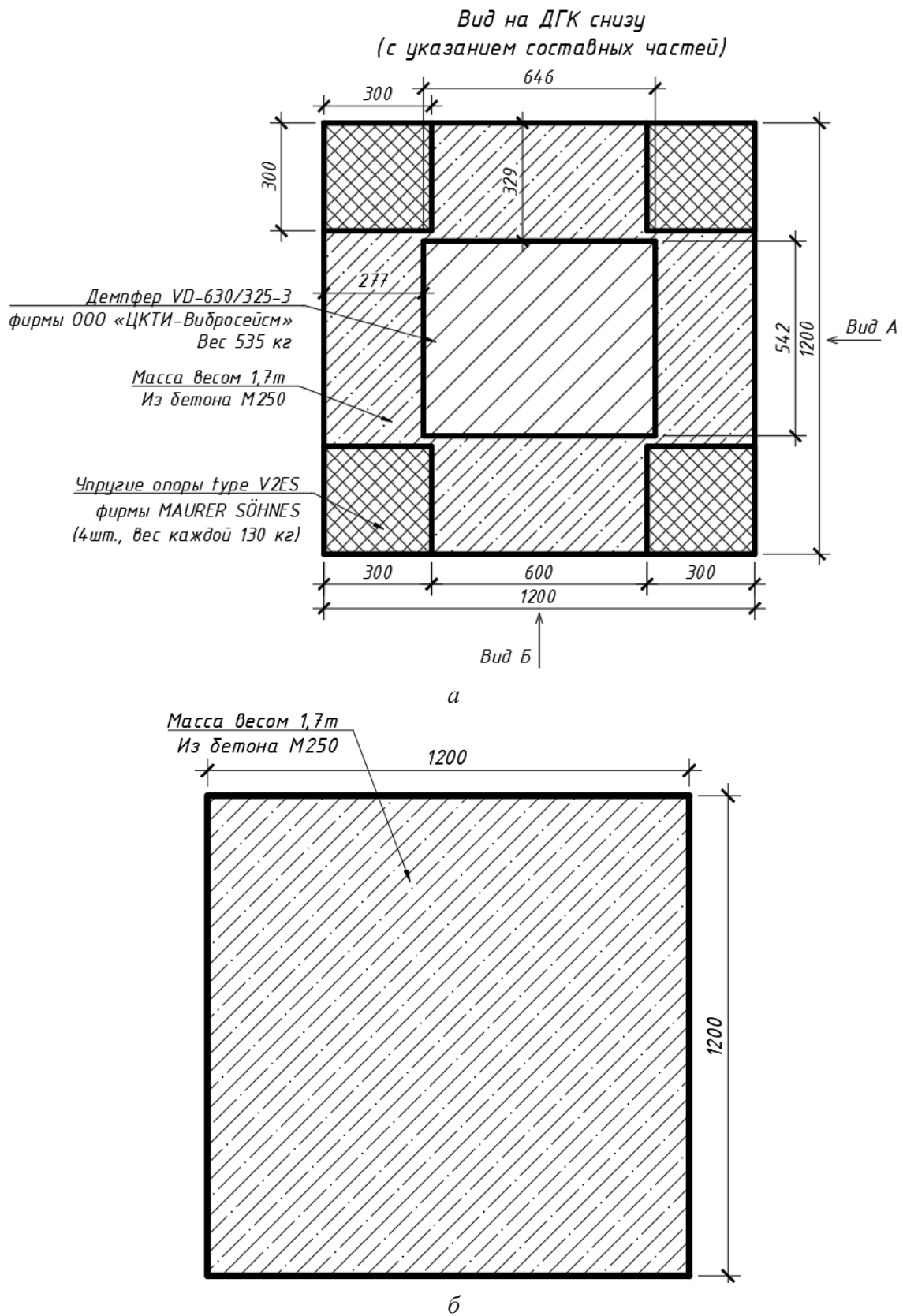


Рис. 2. Схема расположения элементов ДГК:
а — вид на ДГК снизу; б — вид на ДГК сверху

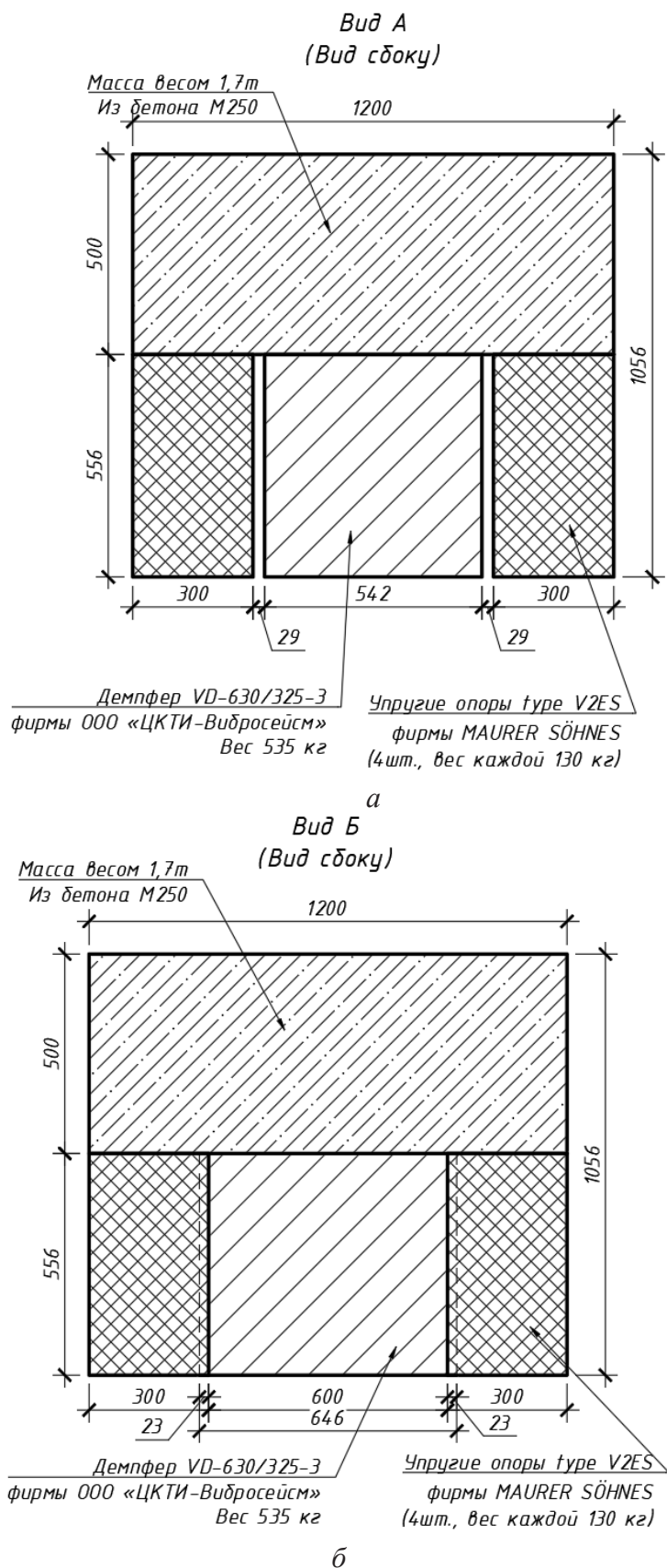


Рис. 3. Схема расположения элементов ДГК (вид на ДГК сбоку)

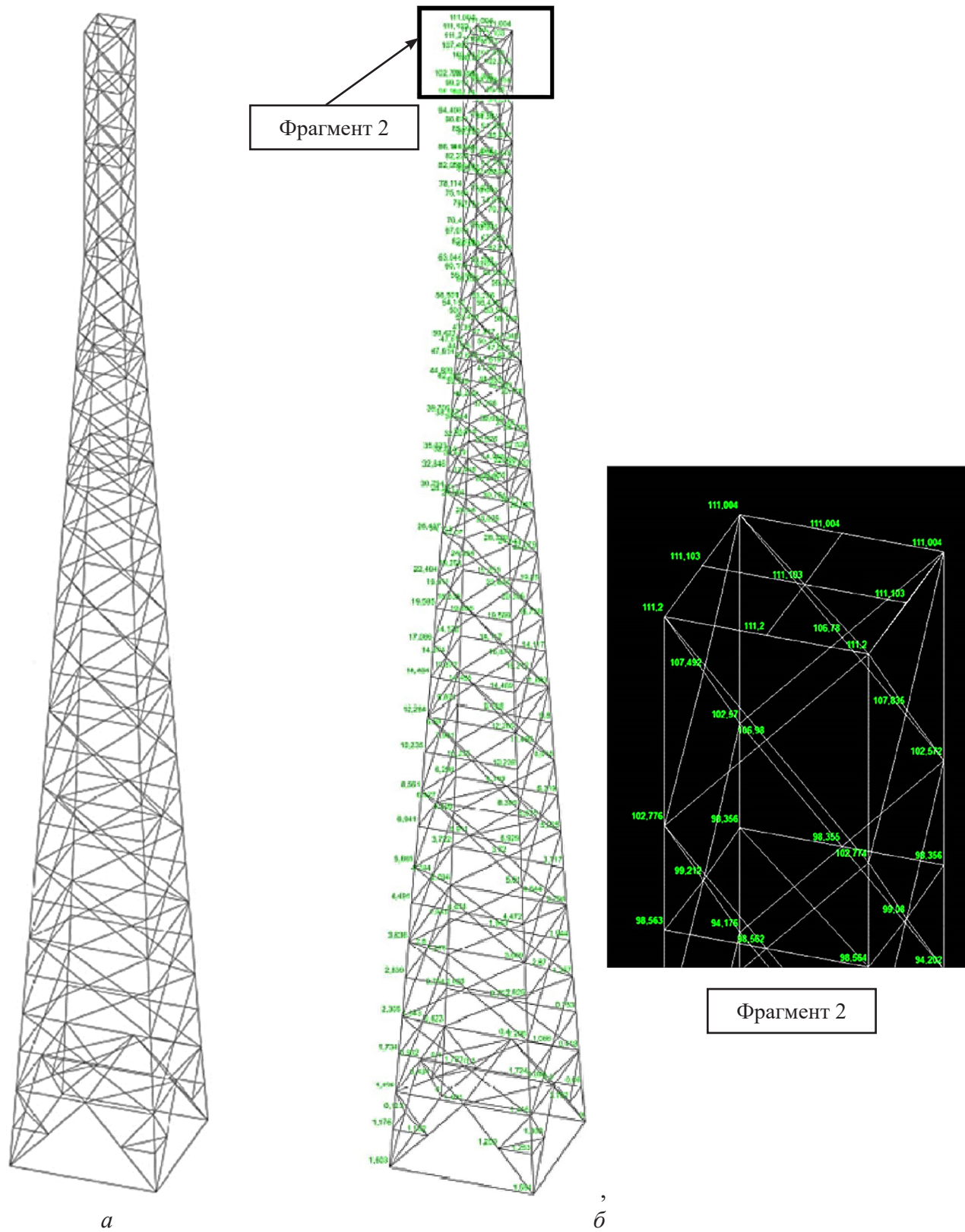


Рис. 4. Модель телекоммуникационной башни (а) и горизонтальные перемещения, образовавшиеся от приложенной ветровой нагрузки (б)

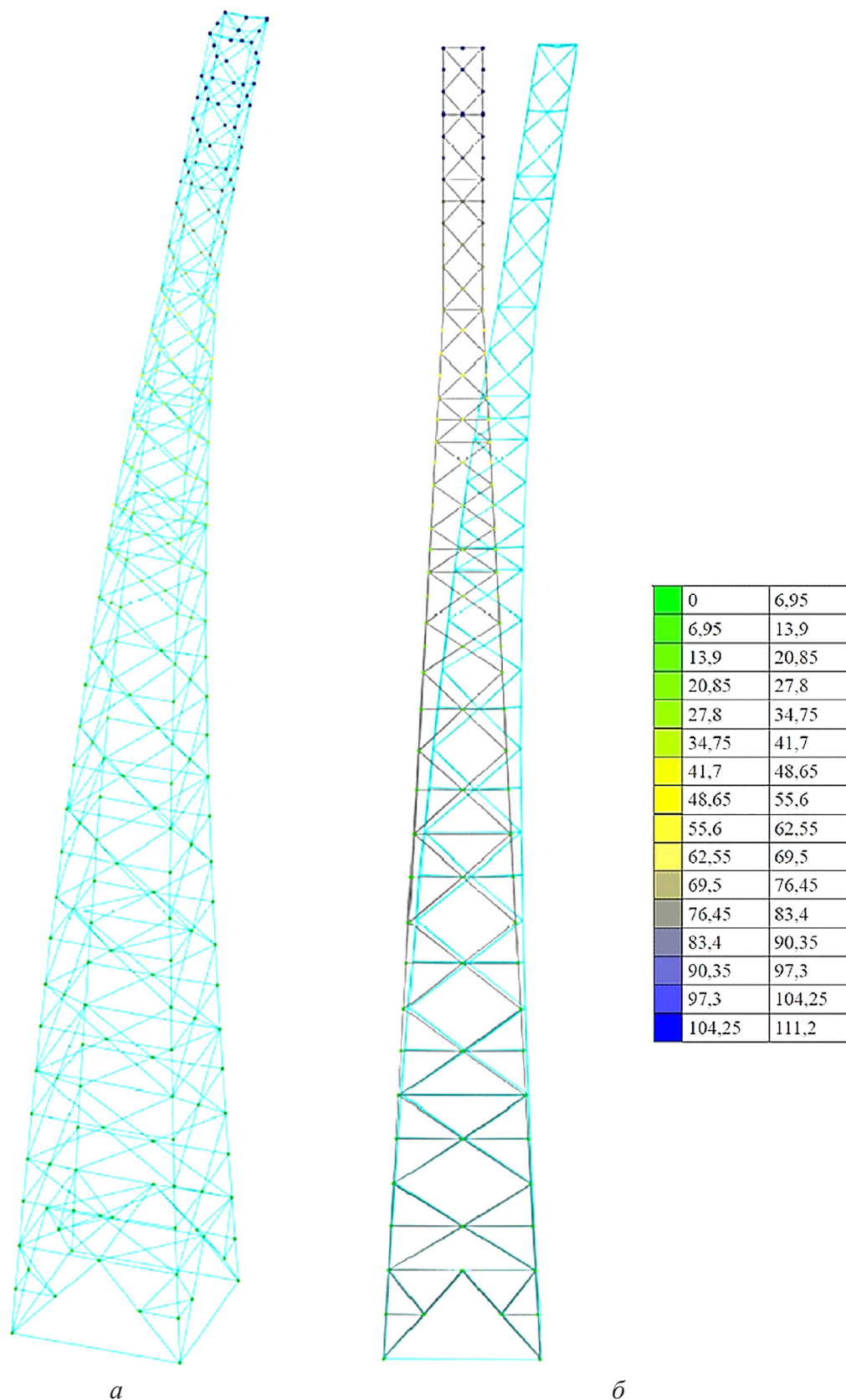


Рис. 5. Деформация башенного сооружения от действия ветровой нагрузки без установки ДКГ

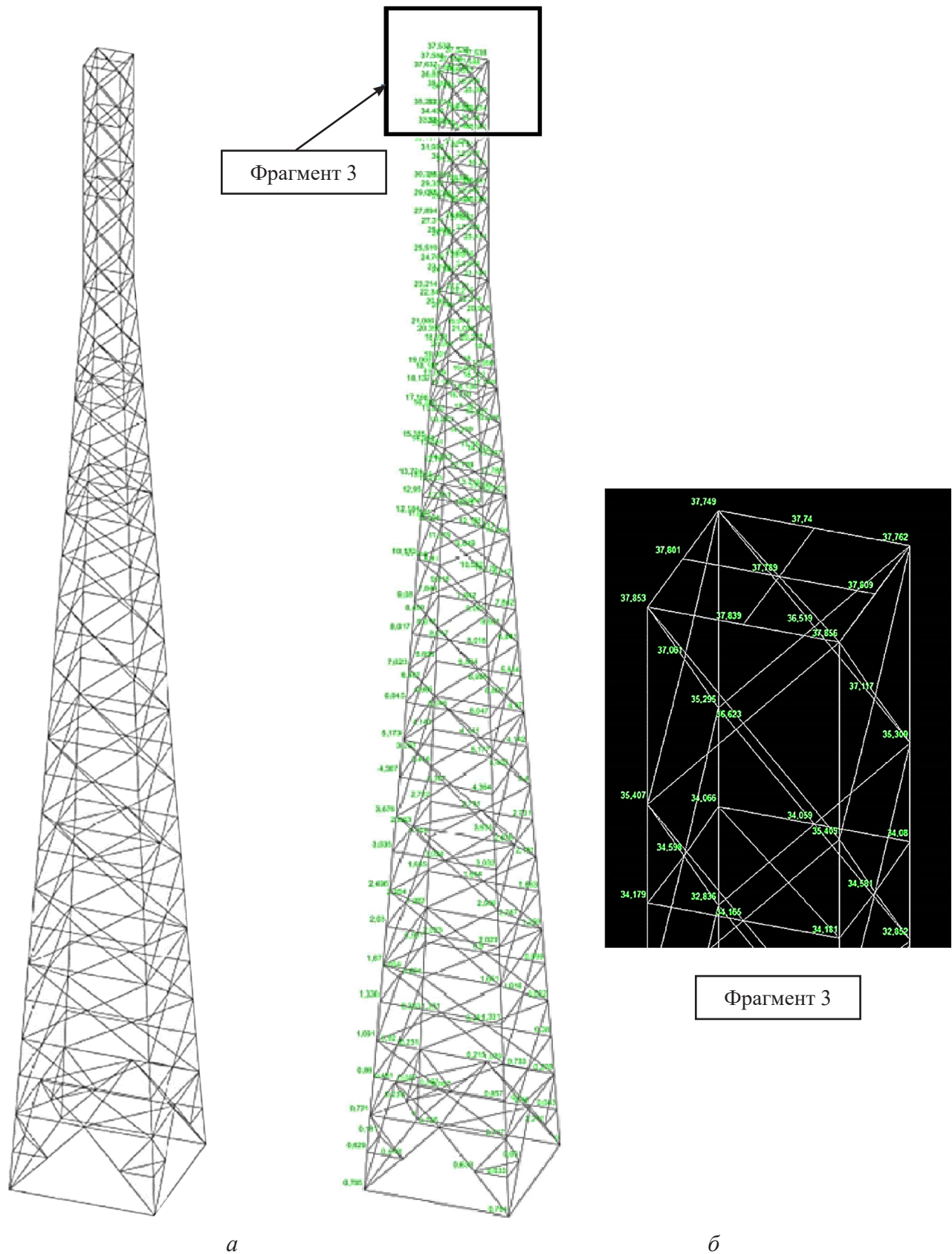
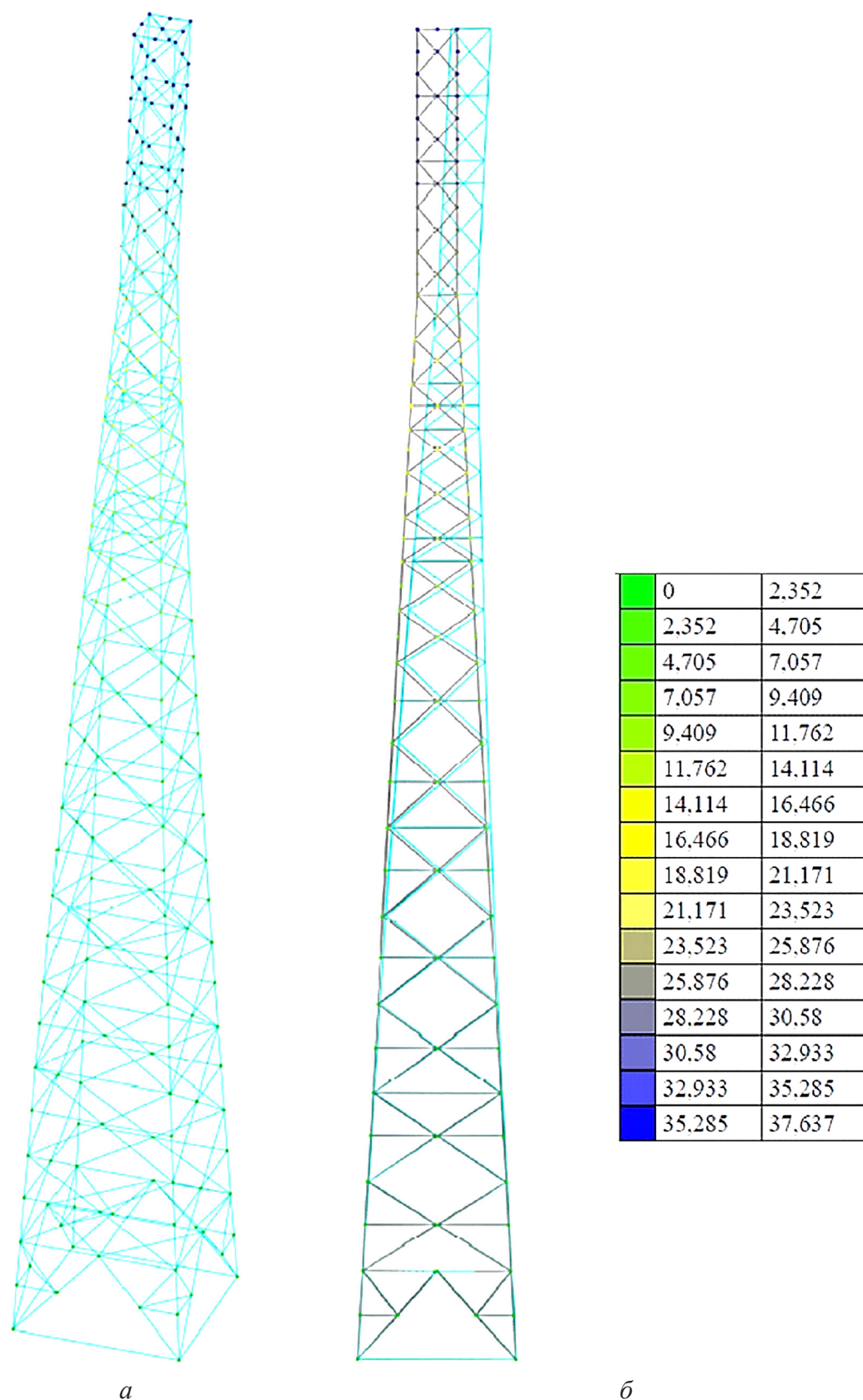


Рис. 6. Модель телекоммуникационной башни с динамическим гасителем (а) и горизонтальные перемещения, образовавшиеся от приложенной ветровой нагрузки (б)



а б
Рис. 7. Деформация башенного сооружения с динамическим гасителем от действия ветровой нагрузки

20 мм для башни без применения ДГК и 7 мм — для конструкции башни с использованием ДГК.

Оценка представленных результатов показывает, что применение ДГК в башне связи позволяет снизить амплитуду колебаний, возникающих в конструкции более чем в 2 раза, а максимальные горизонтальные перемещения от ветрового воздействия примерно в 3 раза.

Таким образом, доказано, что использование ДГК для повышения устойчивости башенных сооружений рассматриваемого типа способствует уменьшению интенсивности амплитуды колебаний, вызванных ветровыми воздействиями, а также снижению перемещений в конструкции, образующихся от ветровой нагрузки, и, как следствие, увеличению усталостного ресурса конструкции в целом.

Библиографический список

1. Иванова Ж. В. Влияние сложных природно-климатических условий на конструктивные решения зданий и сооружений различного назначения / Ж. В. Иванова // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов. В 2 томах. Том 1, Санкт-Петербург, 2–3 декабря 2021 года. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГПС, 2021. — 237 с. — С. 140–143.
2. Барштейн М. Ф. Воздействие ветра на здания и сооружения / М. Ф. Барштейн // Нагрузки и надежность строительных конструкций: труды ЦНИИСК. — М.: Стройиздат, 1973. — Вып. 21. — С. 65–84.
3. Tanaka H. Effect of Tuned Mass Dampers on Wind Induced Response of Tall Buildings / H. Tanaka, C. Y. Mak // J. Wind Eng Ind Aerodyn. — 1983. — Iss. 14. — Pp. 357–368.
4. Сабитов Л. С. Конструкции башенных сооружений: специальность 05.23.01 — Строительные конструкции, здания и сооружения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Л. С. Сабитов; Казанский государственный энергетический университет. — Ростов-на-Дону, 2021. — 38 с. — С. 29–38.
5. Бирбраер А. Н. Экстремальные воздействия на сооружения / А. Н. Бирбраер, А. Ю. Родлер. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — 594 с.
6. Brian W. Smith Communication structures / W. Brian. — London: Published by Thomas Telford Publishing, 2007. — 338 p.
7. Pavan Kumar M. Effect of wind speed on structural behaviour of monopole and self-support telecommunication towers / Kumar M. Pavan, P. Markandeya Raju, M. Navya et al. // Asian journal of civil engineering (BHRC). — 2017. — Vol. 18(6). — Pp. 911–927.
8. Benin A. V. Designing scenarios of damage accumulation / A. V. Benin, S. Nazarova, A. M. Uzdin // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2019. — Vol. 983. — Pp. 600–610. — DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_57.
9. Богданова Г. А. Методика оценки параметров реакции многоэтажных зданий с нелинейными динамическими гасителями колебаний при сейсмических воздействиях / Г. А. Богданова // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов. В 2 т. Т. 1, Санкт-Петербург, 2–3 декабря 2021 года. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГПС, 2021. — 237 с. — С. 52–55.
10. Bogdanova G. Methodology for Assessing the Response Parameters of Multi-storey Buildings with Non-linear Dynamic Vibration Dampers in Case of Seismic Impacts / G. Bogdanova, A. Benin // Lecture Notes in Civil Engineering this link is disabled. — 2022. — Vol. 180. — Pp. 553–564. — DOI: 10.1007/978-3-030-83917-8_50.
11. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07—85 (с Изменениями № 1, 2, 3, 4). — Утв. Приказом Минстроя России от 03.12.2016 № 891/пр. — М.: ФАУ «ФЦС», 2022. — 102 с.
12. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7—81 (с Изменениями № 2, 3). — Утв. Приказом Минстроя России от 24.05.2018 № 309/пр. — М.: ФАУ «ФЦС», 2022. — 100 с.

Дата поступления: 14.06.2023

Решение о публикации: 08.07.2023

Контактная информация:

БОГДАНОВА Галина Алексеевна — канд. техн. наук, доц.; galina_zdanya@mail.ru

ИВАНОВА Жанна Васильевна — канд. техн. наук, доц.; symava@mail.ru

The Use of Dynamic Vibration Dampers to Increase the Stability of Tower Communication Structures under Wind Loads

G. A. Bogdanova, Zh. V. Ivanova

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

For citation: Bogdanova G. A., Ivanova Zh. V. The Use of Dynamic Vibration Dampers to Increase the Stability of Tower Communication Structures under Wind Loads // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 660–672. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-660-672

Summary

Purpose: To investigate the application of dynamic vibration dampers in communication tower structures to protect them from the effects of wind loads. **Methods:** To analyze the design features of existing tower structures. To consider the effect of various factors including wind loads on the choice of tower structure design. To analyze the climatic parameters of the construction area and to determine the type of tower structure as the subject for conducting this research. To determine the quality criteria of vibration damping, on the basis of which the selection of design dynamic vibration dampener (DVD) construction is carried out, and to calculate its weight. To conduct the calculation study of the selected type of building with regard to wind loads and evaluate the effectiveness of the proposed solution of the dynamic vibration dampener to increase the stability of communication tower structures in areas with wind gusts over 25 m/s. **Results:** The results of the research of dynamic vibration dampener design aimed at improvement of operating conditions of telecommunication facilities in the areas with increased wind load are presented. **Practical significance:** It is shown that the use of dynamic vibration dampers in tower constructions of cellular communication makes it possible to reduce the vibration amplitude and the maximum horizontal displacements occurring in the tower structure under wind load.

Keywords: Structures, tower structures, wind loads, dynamic damper, cellular towers.

References

1. Ivanova Zh. V. *Vliyaniye slozhnykh prirodno-klimaticheskix usloviy na konstruktivnyye resheniya zdaniy i sooruzhenij razlichnogo naznacheniya. III Betankurovkiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov. V 2 tomakh. Tom 1, Sankt-Peterburg, 2–3 dekabrya 2021 goda* [Influence of harsh natural and climatic conditions on the design of buildings and structures for various purposes. III Betancourt International Engineering Forum: Proceedings. In 2 volumes. Volume 1, St. Petersburg, December 2–3, 2021]. St. Petersburg: FGBOU VO PPS Publ., 2021, 237 p., pp. 140–143. (In Russian)
2. Barshtejn M. F. *Vozdejstvie vetra na zdaniya i sooruzheniya* [Impact of wind on buildings and constructions]. *Nagruzki i nadezhnost stroitelnykh konstrukcij Trudy CNIISK* [Loads and reliability of building structures: works of TsNIISK]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1973, Iss. 21, pp. 65–84. (In Russian)
3. Tanaka H., Mak C. Y. Effect of Tuned Mass Dampers on Wind Induced Response of Tall Buildings. *J. Wind Eng Ind Aerodyn*, 1983, Iss. 14, pp. 357–368.
4. Sabitov L. S. *Konstrukcii bashennykh sooruzhenij specialnost 05.23.01 — Stroitelnye konstrukcii zdaniya i sooruzheniya avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora texnicheskix nauk* [Tower structures: speciality 05.23.01 — Building structures, buildings and constructions: abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences]. Rostov-on-Don: Kazanskiy gosudarstvennyj energeticheskij universitet Publ., 2021, 38 p. (In Russian)
5. Birbraer A. N., Rodler A. Yu. *E'kstremalnye vozdejstviya na sooruzheniya* [Extreme impacts on structures]. St. Petersburg: Politexn. un-t Publ., 2009, 594 p. (In Russian)

6. Brian W. Smith Communication structures. London: Published by Thomas Telford Publishing, 2007, 338 p.
7. Pavan Kumar M., Markandeya Raju P., Navya M. et al. Effect of wind speed on structural behaviour of monopole and self-support telecommunication towers. *Asian journal of civil engineering (BHRC)*. 2017, vol. 18(6), pp. 911–927.
8. Benin A. V., Nazarova S., Uzdin A. M. Designing scenarios of damage accumulation. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, vol. 983, pp. 600–610. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_57.
9. Bogdanova G. A. *Metodika ocenki parametrov reakcii mnogoetazhnyx zdaniy s nelinejnymi dinamicheskimi gasitelyami kolebanij pri seismicheskix vozdeystviyax. III Betankurovkiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov. V 2 tomakh. Tom 1, Sankt-Peterburg, 2–3 dekabrya 2021 goda. III Betancourt International Engineering Forum: Proceedings. In 2 volumes. Volume 1, St. Petersburg, December 2–3, 2021* [Methodology for assessing the response parameters of multi-storey buildings with non-linear dynamic vibration dampers under seismic impacts]. St. Petersburg: FGBOU VO PSPS Publ., 2021, 237 p., pp. 52–55. (In Russian)
10. Bogdanova G., Benin A. Methodology for Assessing the Response Parameters of Multi-storey Buildings with Non-linear Dynamic Vibration Dampers in Case of Seismic Impacts. *Lecture Notes in Civil Engineering* this link is disabled, 2022, 180, pp. 553–564. DOI: 10.1007/978-3-030-83917-8_50.
11. *SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP 2.01.07—85 (s Izmeneniyami № 1, 2, 3, 4). Utv. Prikazom Ministroya Rossii ot 03.12.2016 № 891/pr* [SP 20.13330.2016. Loads and impacts. Updated edition of SNIIP 2.01.07-85 (with Amendments № 1, 2, 3, 4). Approved. Order of the Ministry of Construction of Russia dated December 03, 2016 № 891 / pr]. Moscow: FAU “FTsS” Publ., 2022, 102 p. (In Russian)
12. *SP 14.13330.2018. Stroitel'stvo v seismicheskikh rayonakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP II-7—81 (s Izmeneniyami № 2, 3). Utv. Prikazom Ministroya Rossii ot 24.05.2018 № 309/pr* [SP 14.13330.2018. Construction in seismic areas. Updated version of SNIIP II-7-81 (with Amendments No. 2, 3). Approved. Order of the Ministry of Construction of Russia dated May 24, 2018 № 309 / pr]. Moscow: FAU “FTsS” Publ., 2022, 100 p. (In Russian)

Received: June 14, 2023

Accepted: July 08, 2023

Author's information:

Galina A. BOGDANOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; galina_zdanya@mail.ru

Zhanna V. IVANOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; syrmava@mail.ru

УДК 691.175.3

Прогнозирование значений предела прочности при растяжении и модуля упругости композитной арматуры большого диаметра по косвенным признакам

Е. Р. Богданова, А. В. Бенин

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

Для цитирования: Богданова Е. Р., Бенин А. В. Прогнозирование значений предела прочности при растяжении и модуля упругости композитной арматуры большого диаметра по косвенным признакам // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 673–684. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-673-684

Аннотация

Цель: Рассмотреть проблемы, связанные с экспериментальным определением упруго-прочностных свойств композитной полимерной стеклопластиковой арматуры больших диаметров. Проанализировать состояние вопроса, провести обзор имеющихся методов определения упругих и прочностных характеристик композитной арматуры. Показать необходимость разработки методики прогнозирования упругих и прочностных свойств композитной полимерной арматуры большого диаметра с использованием методов косвенного измерения. Провести серию испытаний АКП на осевое растяжение и рассчитать значения упруго-прочностных характеристик, используя правило смеси для композитных материалов. Произвести сопоставительный анализ данных, полученных экспериментальными и аналитическими методами. **Методы:** Сравнительный анализ расчетных значений упруго-прочностных характеристик композитной арматуры с экспериментальными данными. **Результаты:** Указана необходимость совершенствования существующей нормативной методики определения упруго-прочностных характеристик стержней композитной арматуры. Установлены расчетные формулы, позволяющие произвести аналитический прогноз предела прочности и модуля упругости композитной стеклопластиковой арматуры. Произведена верификация полученных расчетных данных. Выявлена необходимость в проведении дополнительных испытаний с целью наработки статистической базы данных. **Практическая значимость:** Предложенная методика косвенного измерения характеристик композитной арматуры может быть рекомендована к дальнейшей экспериментальной апробации с целью снижения риска получения некорректных значений упруго-прочностных характеристик композитной полимерной арматуры большого диаметра при постановке прямого эксперимента.

Ключевые слова: Композитная арматура, прочностные свойства, анизотропия АКП, правило смеси, экспериментальные исследования, испытания на осевое растяжение.

Введение

Постановлением Правительства РФ от 23 декабря 2021 г. № 2425 в единый перечень продукции, подлежащей обязательной сертификации, была внесена композитная полимерная арматура (АКП), которая до сегодняшнего времени по ряду

причин не нашла широкого применения в практике строительства на территории РФ. В России процесс внедрения неметаллической арматуры идет более медленными темпами, чем за рубежом. Массовое производство композитной полимерной арматуры (АКП) в России было органи-

зовано только с 2008 года. Среди отечественных производителей АКП можно отметить ООО «Композит Групп Челябинск» (г. Челябинск), ООО «Бийский завод стеклопластиков» (г. Бийск, Алтайский край), ООО «Пласт-Композит» (г. Санкт-Петербург), ООО «КомАР» (г. Сарапул, Удмуртская республика), ООО «ПолиКомпозит» (г. Псков) и другие.

Разработка и введение большого числа нормативно-технической документации, регламентирующей применение АКП на территории РФ [1–8], привели к усовершенствованию технологий производства арматуры данного типа, увеличению спроса на композитную арматуру, росту объема производства АКП, а также расширению номенклатуры выпускаемых стержней. Активное наращивание объемов производства АКП стимулирует научно-исследовательскую деятельность по изучению физико-механических свойств неметаллической арматуры, особенностей ее совместной работы с бетоном и оптимальной области ее применения в строительстве. Значительный вклад в развитие данного направления внесли как отечественные, так и зарубежные исследователи: А. А. Гвоздев, Н. П. Фролов, В. Ф. Степанова, А. В. Бучкин, В. Г. Хозин, А. Н. Блазнов, А. Н. Луговой, Брахим Бенмокрэйн, Б. Брик, В. Франк, Р. Н. Кришна. Следует отметить, что в нашей стране одними из первых интерес к композитной арматуре проявили сотрудники испытательной лаборатории ЛИИЖТа, проведя в 1967 году серию сравнительных экспериментов [9]. Композитная арматура, благодаря ряду своих специфических физико-химических свойств (высокая коррозионная стойкость, антимагнитные и диэлектрические свойства) может найти широкое применение там, где использование стальной арматуры недопустимо или нецелесообразно. Но в то же время массовое применение композитной арматуры сдерживается ее основными недостатками, главными из которых являются низкий

модуль упругости и, как следствие, повышенная деформативность армоконструкции при изгибе, низкая теплостойкость, несвариваемость, существенные трудности при анкеровке, «старение» эпоксидных и полиэфирных матриц с течением времени под действием ультрафиолетовых лучей.

Многочисленные экспериментальные данные из литературных источников [10–13] подтверждают перспективность применения АКП и необходимость проведения дальнейших исследований в этой области с целью расширения возможностей применения данного строительного материала при армировании конструкций.

Необходимым условием создания надежного сооружения является получение достоверной и полной информации о механических характеристиках применяемых строительных материалов. В связи с чем исследователям новых строительных материалов необходимы методы точного определения истинных значений механических характеристик. В то же время производителям для подтверждения и контроля качества выпускаемой продукции также нужны быстроспроизводимые и высокоточные методы, позволяющие определять механические характеристики материала. Зачастую темпы разработки новых материалов опережают темпы внедрения методов их испытаний. Так, существующие методы определения упругих и прочностных характеристик композитных материалов разработаны для исследования гомогенных материалов с изотропными свойствами и не всегда позволяют достаточно точно оценить требуемые характеристики анизотропных материалов. В связи с тем, что композитная арматура относится к волокнистым композитам, отличительной особенностью которых является анизотропия свойств, то способность композитного стержня арматуры воспринимать поперечные нагрузки крайне мала. Недостаточная сопротивляемость АКП действию поперечных сил приводит к дополнительным трудно-

стям при экспериментальном определении ее механических свойств, особенно композитных стержней большого диаметра [14, 15]. Необходимость дополнительного изготовления специальных концевых муфт на испытываемом стержне АКП, либо при малых диаметрах стержня до 8 мм применение специализированных захватов с регулируемой силой обжатия образца, приводит к увеличению трудозатрат и сроков испытания, а также к существенному удорожанию самого испытания в целом. На сегодняшний день большое число отечественных и зарубежных ученых занимаются вопросами анкеровки АКП и разработкой специальной оснастки для ее испытаний [16–22].

Высокая статическая неоднородность экспериментальных значений прочности композитных стержней арматуры, получаемых при испытаниях на растяжение, обусловлена несовершенством нормативного метода испытания. Зачастую в ходе проведения испытаний происходит влияние зажимов испытательной машины и оснастки на результат испытаний: в этом случае происходит либо разрушение образцов в зоне действия захватов, либо проскальзывание образца. Все это свидетельствует о необходимости разработки методики, позволяющей либо проводить информативные и краткосрочные испытания, либо прогнозировать упруго-прочностные свойства образцов материалов с выраженными анизотропными свойствами. В качестве альтернативного метода осевому растяжению с целью определения упруго-прочностных характеристик композитных материалов ряд исследователей [23–25] рекомендует использовать испытания на продольный изгиб. Другим коллективом авторов [26] рассматривается прогнозирование свойств композитных материалов, находящихся под действием растягивающих усилий, с помощью сопоставления кривых напряжение — деформация волокна с аналогичными кривыми матрицы. При этом

кривая напряжение — деформация композитного материала должна будет располагаться между отдельными кривыми деформации армирующего волокна и матрицы.

В данной статье рассматривается возможность использования метода косвенного измерения прочностных и упругих свойств композитных стержней арматуры большого диаметра, таких как предел прочности и модуль упругости.

Цель

Определение упруго-прочностных свойств композитных стержней арматуры диаметром более 16 мм методом осевого растяжения согласно ГОСТ 32492—2015 предполагает изготовление в средней части образца участка местного ослабления в виде шейки, в отличие от стандартного образца. При этом возрастают как трудозатраты по изготовлению испытательного образца, так и стоимость проведения испытания в целом. С другой стороны, использование стандартного образца для больших диаметров композитной арматуры требует заливки муфт большой длины и толщины с целью исключения разрушения образца или путем среза (рис. 1) навивки или разрушением самой муфты, что не дает возможности определить истинные прочностные характеристики. Также следует отметить, что в соответствии с ГОСТ 31938—2022 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия» максимальный диаметр АКП, на который распространяется его действие, составляет 22 мм.

ГОСТ 31938—2022 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия» кроме упруго-прочностных характеристик АКП нормирует также процентное содержание непрерывного армирующего волокна в матрице [4], которое должно быть не менее 80 %. При этом экспериментальное определение массовых долей



Рис. 1. Срез навивки на испытанном образце

ТАБЛИЦА 1. Результаты испытаний

Показатель	Значение по ГОСТ, не менее	Диаметр арматуры					
		5 мм	8 мм	10 мм	18 мм	26 мм	32 мм
Номинальный диаметр d , мм	—	5,18	8,21	10,21	17,51	232	32,64
Массовая доля волокна ω_a , %	80	78,94	79,80	80,41	81,96	80,40	81,60
Предел прочности σ , МПа	800	1200	1060	1054	1004	Данные в ходе испытания не получены	
Модуль упругости E , ГПа	50	52,80	50,01	50,65	52,49	50,80*	51,20*

* — значения начального модуля упругости получены с использованием данных о нагрузке, составляющей 20 % от разрушающей.

наполнителя и матрицы в композите не требует длительной пробоподготовки и легко воспроизводимо. А полученные значения массовых долей волокна и матрицы композита могут быть использованы для прогнозирования его упруго-прочностных свойств.

В данной работе обоснована возможность прогнозирования упруго-прочностных свойств АКП большого диаметра с использованием данных, полученных методом косвенных измерений, к которым относятся изначальное определение массовых долей компонентов композитной арматуры и последующий расчет искомых характеристик.

Прямые измерения.

Постановка эксперимента

Согласно ГОСТ 32486—2021 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения струк-

турных характеристик» массовое содержание волокна определяется методом сжигания образца в муфельной печи при температуре 625 °С, дальнейшем взвешивании массы образца до и после сжигания и нахождении разницы между полученными массами. Номинальный диаметр образцов определен методом гидростатического взвешивания, для получения экспериментальных значений предела прочности и модуля упругости образцов были проведены испытания на осевое растяжение [1, 2].

Для испытания использовались стержни стеклопластиковой арматуры номинальным диаметром 5, 8, 10, 18, 26 и 32 мм. Часть данных была получена при испытаниях в ИЛ «Механическая лаборатория им. проф. Н. А. Белелюбского» ПГУПС, а другая часть — в ходе анализа литературных источников [15]. Сводные данные представлены в табличной форме (табл. 1).

Косвенные измерения

При расчете модуля упругости структурно неоднородного материала опираясь на правило смеси для композитных материалов, согласно которому некоторая характеристика композита описывается суммой характеристик компонентов с учетом их объемных долей [27], можно получить наибольшие (в приближениях Фойгта (1)) и наименьшие (в приближениях Рейсса (2)) значения модулей упругости и произвести дальнейшее построение и оценку вилки Хилла [28]:

$$E = \frac{V_A}{V_A + V_M} E_A + \frac{V_M}{V_A + V_M} E_M \quad (1)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{V_A}{V_A + V_M} \frac{1}{E_A} + \frac{V_M}{V_A + V_M} \frac{1}{E_M}, \quad (2)$$

где V_M , E_M — объем и модуль упругости матрицы; V_A , E_A — объем и модуль упругости армирующего наполнителя.

Формулы (1) и (2) могут быть выражены через объемные доли компонентов композита по формуле (3):

$$E = v_a E_a + v_m E_m. \quad (3)$$

ТАБЛИЦА 2. Характеристики компонентов АКП

Показатель	Наполнитель (стекловолокно)		Матрица (ПЭТФ)
	Тип E	Тип S	
Плотность, г/см ³	2,54	2,40–2,58	1,38–1,40
Прочность элементарного волокна, МПа	3500	4600–4900	—
Модуль упругости, ГПа	73	82–93	2,5–3
Прочность смолы на растяжение, МПа	—	—	40–140
Удлинение до разрыва, %	4,8	5,4	4

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчета объемных долей

Показатель	Диаметр арматуры					
	5 мм	8 мм	10 мм	18 мм	26 мм	32 мм
Номинальный диаметр d , мм	5,18	8,21	10,21	17,51	26,32	32,64
Объемная доля волокна v_a , %	67,66	67,80	69,62	70,90	69,61	71,23

$$\frac{1}{\hat{A}} = v_a \frac{1}{E_a} + v_m \frac{1}{E_m}. \quad (4)$$

Объемная доля армирующего стекловолокна в композите определяется по формуле (5):

$$v_a = \frac{V_a}{V} = \frac{\omega_a \rho_m}{\omega_a \rho_m + \omega_m \rho_a}, \quad (5)$$

где V — общий объем композита;

ω_a , ω_m — массовые доли волокна и матрицы в композите,

ρ_a , ρ_m — плотность волокна и матрицы в композите.

В табл. 2 представлены характеристики матрицы и волокна, заявленные производителями АКП.

По результатам расчета верхней и нижней границ модуля Юнга построены графики зависимости $E = f(v_a)$ (рис. 2). Отдельно на графике (рис. 3) нанесены значения модуля упругости, полученные в результате испытания на осевое растяжение (табл. 1), с учетом рассчитанных значений объемных долей армирующего волокна (табл. 3), с целью проведения верификации расчетных данных.

Из полученного графика (рис. 2) можно сделать вывод о том, что рассмотренная методика,

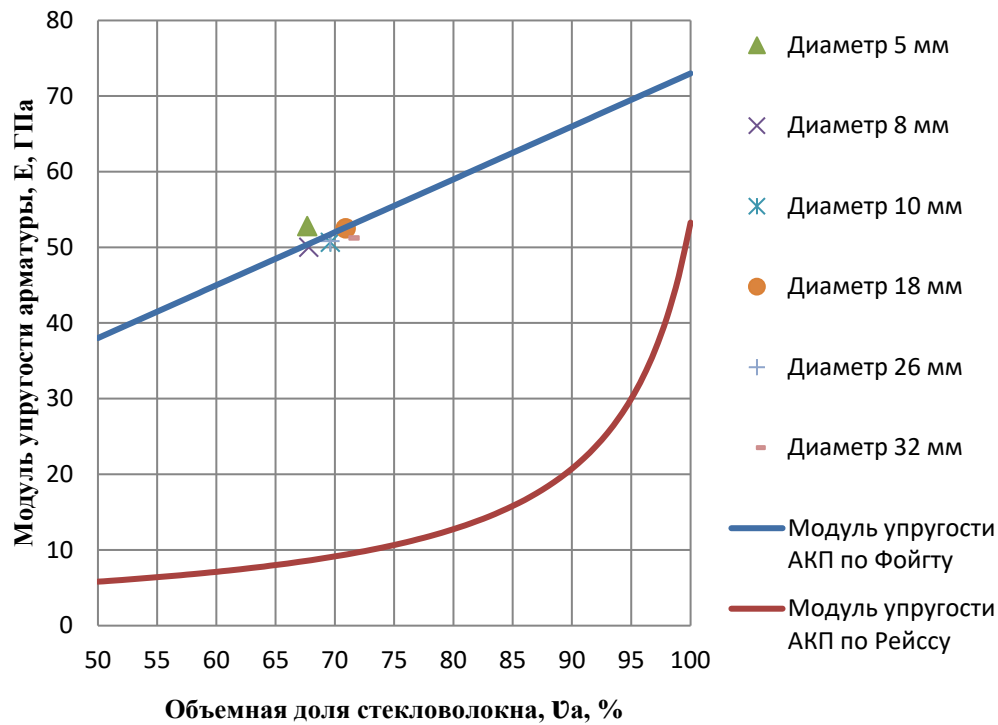


Рис. 2. График зависимости модуля упругости АКП от объемной доли армирующего материала

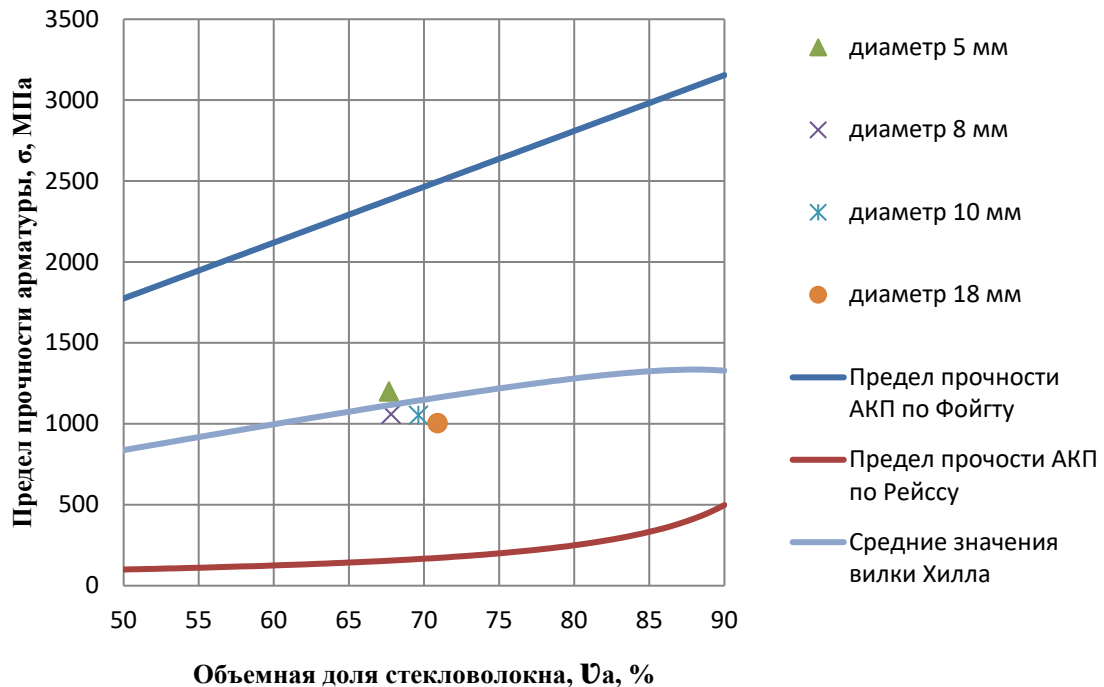


Рис. 3. График зависимости предела прочности АКП от объемной доли армирующего материала

основанная на использовании оценки значений модуля упругости путем построения вилки Хилла, по верхней границе (формула Фойгта (1))

позволяет получить корректные значения, эквивалентные данным, полученным при постановке прямого эксперимента.

Аналогичные формулы можно составить для расчета верхней и нижней границ предела прочности:

$$\sigma = \nu_a \sigma_a + \nu_m \sigma_m . \quad (6)$$

$$\frac{1}{\sigma} = \nu_a \frac{1}{\sigma_a} + \nu_m \frac{1}{\sigma_m} . \quad (7)$$

По результатам расчета верхней и нижней границ предела прочности на растяжение для АКП построены графики зависимости $\sigma = f(\nu_a)$ (рис. 3).

На графике (рис. 3) видны значительные отклонения расчетных данных от данных экспериментов. Значения прочности АКП, полученные экспериментальными методами, оказываются меньше рассчитанных по правилу смеси (6) значений. Микроструктурные особенности процесса разрушения АКП, а также особенности технологии ее производства не позволяют получить значения предела прочности АКП аналитическим методом. На графике (рис. 3) прослеживается распределение экспериментальных значений предела прочности по кривой средних значений вилки Хилла.

Выводы

1. Расчет модуля упругости в приближениях Фойгта позволяет получить корректные значения, эквивалентные данным, полученным при постановке прямого эксперимента.

2. Расчетные значений предела прочности АКП укладываются в вилку Хилла, при этом прослеживается распределение экспериментальных значений предела прочности по кривой средних значений вилки Хилла.

3. Предложенная методика косвенного измерения характеристик композитной арматуры может быть рекомендована к дальнейшей экспериментальной апробации — с целью снижения риска получения некорректных значений упруго-прочностных характеристик композитной полимерной арматуры большого диаметра при постановке прямого эксперимента.

Библиографический список

1. ГОСТ 31938—2022. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия. — Утв. Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии № 444-ст от 1 июня 2022 г. — М.: Российский институт стандартизации, 2022. — 20 с.

2. ГОСТ 32492—2015. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения физико-механических характеристик. — Утв. Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии № 2198-ст от 24 декабря 2015 г. — М.: Стандартиформ, 2016. — 17 с.

3. ГОСТ 32487—2015. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения характеристик стойкости к агрессивным средам. — Утв. Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии № 2197-ст от 24 декабря 2015 г. — М.: Стандартиформ, 2016. — 8 с.

4. ГОСТ 32486—2021. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения структурных характеристик. — Утв. Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии № 2196-ст от 24 декабря 2015 г. — М.: Стандартиформ, 2016. — 20 с.

5. СП 405.1325800.2018. Конструкции бетонные с неметаллической фиброй и полимерной арматурой. Правила проектирования. — Утв. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 декабря 2018 г. № 850/пр. — М.: Стандартиформ, 2019. — 24 с.

6. СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования. — Утв. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 8 августа 2014 г. № 452/пр. — М.: Стандартиформ, 2015. — 47 с.

7. ТР 013-1-14. Применение композитной арматуры. Технические рекомендации по применению неметаллической арматуры в бетонных конструкциях. — Утв. НИИЖБ — М., 2004. — 5 с.

8. СТО 83269053-001—2010. Применение в транспортном строительстве неметаллической композитной арматуры периодического профиля. — Утв. ООО НПФ «УралСпецАрматура». — Пермь, 2010. — 58 с.
9. Филин А. П. Исследование работы элементов конструкций, армированных неметаллической арматурой / А. П. Филин, Я. Е. Иохельсон, П. Е. Александров и др. — Л.: Институт инженеров железнодорожного транспорта, 1967. — 59 с.
10. Малбиев С. А. Полмеры в строительстве: учеб. пособие для вузов / С. А. Малбиев, В. К. Горшков, П. Б. Разговоров. — М.: Высшая школа, 2008. — 455 с.
11. Фролов Н. П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции / Н. П. Фролов. — М.: Стройиздат, 1980. — 104 с.
12. Завгороднев А. В. Перспективы применения композитной арматуры в морском гидротехническом строительстве / А. В. Завгороднев, А. М. Уманский, А. Т. Беккер и др. // Горный информационный бюллетень (научно-технический журнал). — 2014. — № 54-9. — С. 137–148.
13. Селезнев В. А. Эксплуатационные характеристики полимерной композитной арматуры / В. А. Селезнев, В. А. Какуша, В. А. Ушков и др. // Промышленное и гражданское строительство. — 2021. — № 1. — С. 42–50.
14. Бенин А. В. Особенности испытаний композитной полимерной арматуры / А. В. Бенин, С. Г. Семенов // Промышленное и гражданское строительство. — 2014. — № 9. — С. 42–46.
15. Волик А. Р. Особенности испытаний на растяжение композитной арматуры / А. Р. Волик, С. А. Сазон, К. Ю. Чурило // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка. — 2020. — Т. 10. — № 1. — С. 110–118.
16. Садин Э. Я. Анкеровка в бетоне стеклопластиковой арматуры, производимой в Республике Беларусь / Э. Я. Садин // Архитектура и строительство. — 2016. — № 3. — С. 68–71.
17. Фролов Н. В. К вопросу об испытании стержневой полимеркомпозитной арматуры на осевое растяжение / Н. В. Фролов, М. А. Полоз, Е. Г. Колесникова // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2016. — № 11. — С. 74–77.
18. Анкерное устройство для композитной арматуры: пат. 109172 Российская Федерация: МПК Е 04 С 5/12 / В. Н. Николаев, В. В. Николаев; заявл. 12.05.2011; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 28.
19. Анкер стержня стеклопластиковой арматуры: пат. 2032044 Российская Федерация: МПК Е 04 С 5/12 / В. Е. Казаринов; заявл. 13.01.1992; опубл. 27.03.1995.
20. Способ образования анкерного устройства композитной арматуры и анкерное устройство: пат. 2776854 Российская Федерация: МПК Е 02 D 5/74 / Х. А. Джантимиров, П. Х. Джантимиров, Е. А. Дудукалова и др.; заявл. 16.11.2021; опубл. 27.07.2022, Бюл. № 21.
21. Устройство для анкерования композитной арматуры: пат. 2755614 Российская Федерация: МПК Е 04 С 5/12 / Д-К. Г. Накашидзе, Б. В. Накашидзе, П. Б. Березин; заявл. 24.02.2021; опубл. 17.09.2021, Бюл. № 26.
22. Способ контроля прочности стержня композитной арматуры и устройство для его осуществления: пат. 2709597 Российская Федерация: МПК G 01 N 3/12. G 01 N 3/24 / С. А. Пушкарев, Ф. А. Уразбахтин, Р. Ш. Низамов и др.; заявл. 14.11.2018; опубл. 18.12.2019, Бюл. № 35.
23. Хорохордин А. Ю. Совершенствование методики анализа механических испытаний стеклопластиковой арматуры / А. Ю. Хорохордин, В. А. Абанин, М. Ю. Локтев и др. // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», Бийский технологический институт (филиал). — 2015. — С. 150–154.
24. Селяев В. П. Исследование свойств волокнистых композитов методом продольного изгиба / В. П. Селяев, П. В. Селяев, М. Ф. Алимов и др. // Региональная архитектура и строительство. — 2014. — № 2. — С. 5–15.
25. Луговой А. Н. Исследование механических характеристик однонаправленно армированного стеклопластика методом продольного изгиба: специальность 05.02.01 — Материаловедение в машиностроении: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. Н. Луговой; ООО «Бийский завод стеклопластиков». — Барнаул, 2005. — С. 23–24.

26. Пащенко А. А. Армирование неорганических вяжущих веществ минеральными волокнами / А. А. Пащенко, В. Л. Сербии, А. Л. Паславская и др. — М.: Стройиздат, 1988. — 200 с.

27. Мэттьюз Ф. Композитные материалы: Механика и технология / Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс; пер. с англ. С. Л. Баженова. — М.: Техносфера, 2004. — 406 с.

28. Победря Б. Е. Механика композиционных материалов / Б. Е. Победря. — М.: Моск. ун-т, 1984. — 336 с.

Дата поступления: 25.07.2023

Решение о публикации: 13.08.2023

Контактная информация:

БОГДАНОВА Екатерина Романовна — аспирант;
univer006@mail.ru

БЕНИН Андрей Владимирович — канд. техн. наук, доц.;
benin.andrey@mail.ru

Forecasting Ultimate Tensile Strength and Elastic Modulus Values of Large-Diameter Composite Rebar Using Indirect Indicators

E. R. Bogdanova, A. V. Benin

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

For citation: Bogdanova E. R., Benin A. V. Forecasting Ultimate Tensile Strength and Elastic Modulus Values of Large-Diameter Composite Rebar Using Indirect Indicators // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 673–684. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-673-684

Summary

Purpose: To consider the problems of experimental determination of elastic and strength properties of large-diameter composite polymer glass fiber reinforced plastic rebar (FRP-rebar). To analyze the state of the issue, to make an overview of existing methods for determining elastic and strength properties of FRP-rebar. To show the necessity of developing methods of predicting the large-diameter FRP-rebar elastic and strength properties by means of indirect measurement methods. To carry out a series of tensile tests of FRP-rebar and to calculate the elastic-strength characteristics values using the rule of mixtures for composite materials. To make a comparative study of data obtained by experimental and analytical methods. **Methods:** Comparative analysis of the FRP-rebar elastic-strength characteristics calculated values with experimental data. **Results:** The need to improve the existing regulatory method for determining the elastic-strength characteristics of composite reinforcement bars is indicated. Calculation formulas of analytical prediction of the ultimate tensile strength and elastic modulus of FRP-rebar have been established. The calculated values obtained have been verified. The need of additional tests to build a statistical database has been identified. **Practical significance:** The proposed method for indirect measurement of FRP-rebar properties can be recommended for further experimental testing to reduce the risk of obtaining error values of elastic and strength characteristics of large-diameter FRP-rebar when conducting direct experiments.

Keywords: Fiber reinforced plastic rebar (FRP-rebar), strength properties, FRP-rebar anisotropic properties, the rule of mixtures, experimental studies, axial tensile tests.

References

1. GOST 31938—2022. *Armatura kompozitnaya polimernaya dlya armirovaniya betonnykh konstrukcij. Obshchie tekhnicheskie usloviya. Utv. Federal'nyim agentstvom po*

tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii № 444-st ot 1 iyunya 2022 g. [GOST 31938—2022. Composite polymer reinforcement for reinforcement of concrete structures. General Specifications. Approved Federal Agency for

Technical Regulation and Metrology № 444-st dated June 1, 2022]. Moscow: Russian Institute of Standardization Publ., 2022, 20 p. (In Russian)

2. *GOST 32492—2015. Armatura kompozitnaya polimernaya dlya armirovaniya betonnyh konstrukcij. Metody opredeleniya fiziko-mekhanicheskikh harakteristik. Utv. Federal'nym agentstvom po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii № 2198-st ot 24 dekabrya 2015 g.* [GOST 32492—2015. Composite polymer reinforcement for reinforcement of concrete structures. Methods of determination of physical and mechanical characteristics. Approved Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 2198-st of December 24, 2015]. Moscow: Russian Institute of Standardization Publ., 2016, 17 p. (In Russian)

3. *GOST 32487—2015. Armatura kompozitnaya polimernaya dlya armirovaniya betonnyh konstrukcij. Metody opredeleniya harakteristik stojkosti k agressivnym sredam. Utv. Federal'nym agentstvom po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii № 2197-st ot 24 dekabrya 2015 g.* [GOST 32487—2015. Composite polymer reinforcement for reinforcement of concrete structures. Methods for Determining Resistance to Aggressive Environments. Approved Federal Agency for Technical Regulation and Metrology № 2197-st of December 24, 2015]. Moscow: Russian Institute of Standardization Publ., 2016, 8 p. (In Russian)

4. *GOST 32486—2021. Armatura kompozitnaya polimernaya dlya armirovaniya betonnyh konstrukcij. Metody opredeleniya strukturnyh harakteristik. Utv. Federal'nym agentstvom po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii № 2196-st ot 24 dekabrya 2015 g.* [GOST 32486—2021. Composite polymer reinforcement for reinforcement of concrete structures. Structural Characterization Methods. Approved Federal Agency for Technical Regulation and Metrology № 2196-st of December 24, 2015]. Moscow: Russian Institute of Standardization Publ., 2016, 20 p. (In Russian)

5. *SP 405.1325800.2018. Konstrukcii betonnye s nemetallicheskoj fibroj i polimernoj armaturoj. Pravila proektirovaniya. Utv. Ministerstvom stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoj Federatsii ot*

24 dekabrya 2018 g. № 850/pr [SP 405.1325800.2018. Concrete structures with non-metallic fiber and polymer reinforcement. Design rules. Approved. Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 24, 2018 № 850/pr]. Moscow: Russian Institute of Standardization Publ., 2019, 24 p. (In Russian)

6. *SP 164.1325800.2014. Usilenie zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami. Pravila proektirovaniya. Utv. Ministerstvom stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoj Federatsii ot 8 avgusta 2014 g. № 452/pr* [SP 164.1325800.2014. Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials. Design rules. Approved. Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated August 8, 2014 № 452/pr]. Moscow: Russian Institute of Standardization Publ., 2015, 47 p. (In Russian)

7. *TR 013-1-14. Primenenie kompozitnoj armatury. Tekhnicheskie rekomendacii po primeneniyu nemetallicheskoj armatury v betonnyh konstrukciyah. Utv. NIIZHB* [Technical regulation 013-1-14. Use of composite reinforcement. Technical recommendations for the use of non-metallic reinforcement in concrete structures. Approved NIIZHB]. Moscow, 2004, 5 p. (In Russian)

8. *STO 83269053-001—2010. Primenenie v transportnom stroitel'stve nemetallicheskoj kompozitnoj armatury periodicheskogo profilya. Utv. OOO NPF "UralSpec-Armatura"* [Standart of organization Use of non-metallic composite reinforcement of periodic profile in transport construction. Appr. by OOO NPF UralSpetsRebar]. Perm, 2010, 58 p. (In Russian)

9. Filin A. P., Iohel'son Ya. E., Aleksandrov P. E. et al. *Issledovanie raboty elementov konstrukcij, armirovannyh nemetallicheskoj armaturoj* [Study of the operation of structural elements reinforced with non-metallic reinforcement]. Leningrad: Institut inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta Publ., 1967, 59 p. (In Russian)

10. Malbiev S. A., Gorshkov V. K., Razgovorov P. B. *Polmery v stroitel'stve: ucheb. posobie dlya vuzov* [Polymers in construction: textbook for universities]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2008, 455 p. (In Russian)

11. Frolov N. P. *Stekloplastikovaya armatura i stekloplastbetonnye konstrukcii* [Fiberglass rebars and fiberglass structures]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1980, 104 p. (In Russian)
12. Zavgorodnev A. V., Umanskij A. M., Bekker A. T. et al. Perspektivy primeneniya kompozitnoj armatury v morskoy gidrotekhnicheskoy stroitel'stve [Prospects of FRP bars application marine hydraulic construction]. *Gornyy informatsionnyy byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)* [Mining information bulletin (scientific and technical journal)]. 2014, Iss. 54(9), pp. 137–148. (In Russian)
13. Seleznev V. A., Kakusha V. A., Ushkov V. A. et al. Ekspluatatsionnye karakteristiki polimernoy kompozitnoj armatury [Performance characteristics of polymer composite reinforcement]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering]. 2021, Iss. 1, pp. 42–50. (In Russian)
14. Benin A. V., Semenov S. G. Osobennosti ispytaniy kompozitnoy polimernoy armatury [Features of testing composite polymer reinforcement]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering]. 2014, Iss. 9, pp. 42–46. (In Russian)
15. Volik A. R., Sazon S. A., Churilo K. Yu. Osobennosti ispytaniy na rastyazhenie kompozitnoj armatury [Features of tensile testing composite polymer reinforcement]. *Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Yanki Kupaly* [Bulletin of Grodno State University named after Yanka Kupala]. Ser. 6. Tekhnika [Technique]. 2020, vol. 10, Iss. 1, pp. 110–118. (In Russian)
16. Sadin E. Ya. Ankerovka v betone stekloplastikoy armatury, proizvodimoy v Respublike Belarus' [Anchoring in concrete of fiberglass reinforcement made in the Republic of Belarus]. *Arhitektura i stroitel'stvo* [Architecture and engineering]. 2016, Iss. 3, pp. 68–71. (In Russian)
17. Frolov N. V., Poloz M. A., Kolesnikova E. G. K voprosu ob ispytanii sterzhnevoj polimerkompozitnoj armatury na osevoe rastyazhenie [Research of the polymer composite reinforcement test under axial loading]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shuhova* [Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov]. 2016, Iss. 11, pp. 74–77. (In Russian)
18. Nikolaev V. N., Nikolaev V. V. *Ankernoe ustroystvo dlya kompozitnoy armatury* [Anchor device for composite reinforcement]. Patent RF, no. 109172, 2011. (In Russian)
19. Kazarinov V. E. *Anker sterzhnya stekloplastikoy armatury* [Anchor of the fiberglass reinforcement rod]. Patent RF, no. 2032044, 1995. (In Russian)
20. Dzhantimirov Kh. A., Dzhantimirov P. Kh., Dudukalova E. A. et al. *Sposob obrazovaniya ankernogo ustroystva kompozitnoy armatury i ankernoe ustroystvo* [Method for the formation of an anchor device for composite reinforcement and an anchor device]. Patent RF, no. 2776854, 2022. (In Russian)
21. Nakashidze D-K. G., Nakashidze B. V., Berezin P. B. *Ustroystvo dlya ankerovki kompozitnoy armatury* [Device for anchoring composite reinforcement]. Patent RF, no. 2755614, 2021. (In Russian)
22. Pushkarev S. A., Urazbakhtin F. A., Nizamov R. Sh. et al. *Sposob kontrolya prochnosti sterzhnya kompozitnoy armatury i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for controlling the strength of a composite reinforcement bar and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2709597, 2019. (In Russian)
23. Horohordin A. Yu., Abanin V. A., Loktev M. Yu. et al. Sovershenstvovanie metodiki analiza mekhanicheskikh ispytaniy stekloplastikoy armatury [Improving the method of analysis of mechanical testing of fiberglass reinforcement]. *Tekhnologii i oborudovanie khimicheskoy, biotekhnologicheskoy i pishchevoy promyshlennosti: materialy VIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh s mezhdunarodnym uchastiem. FGBOU VPO "Altayskiy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet im. I. I. Polzunova", Biyskiy tekhnologicheskij institut (filial)* [Technologies and equipment of the chemical, biotechnological and food industry: materials of the VIII All-Russian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists with international participation. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Altai State Technical University named after I. I. Polzunova", Biysk Technological Institute (branch)]. 2015, pp. 150–154. (In Russian)

24. Selyaev V. P., Selyaev P. V., Alimov M. F. et al. *Issledovanie svoystv voloknistykh kompozitov metodom prodol'nogo izgiba* [Investigation of the properties of fibrous composites by the method of longitudinal bending]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction]. 2014, Iss. 2, pp. 5–15. (In Russian)
25. Lugovoj A. N. *Issledovanie mekhanicheskikh harakteristik odnonapravlenno armirovannogo stekloplastika metodom prodol'nogo izgiba: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Study of the mechanical characteristics of unidirectional reinforced fiberglass using the flexure method. Dissertation abstract for the degree of candidate of technical sciences]. Barnaul, Publ., 2005, 24 p. (In Russian)
26. Pashchenko A. A., Serbii V. L., Paslavskaya A. A. et al. *Armirovanie neorganicheskikh vyazhushchih veshchestv mineral'nymi voloknami* [Reinforcement of inorganic binders with mineral fibers]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1988, 200 p. (In Russian)
27. Matthews F., Rawlings R. *Kompozitnye materialy: Mekhanika i tekhnologiya* [Composite materials: Engineering and Science]. Moscow: Technosfera Publ., 2004, 406 p. (In Russian)
28. Pobedrya B. E. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of composite materials]. Moscow: Mosk. un-t Publ., 1984, 336 p. (In Russian)

Received: July 25, 2023

Accepted: August 13, 2023

Author's information:

Ekaterina R. BOGDANOVA — Postgraduate Student;
univer006@mail.ru

Andrey V. BENIN — PhD in Engineering, Associate
Professor; benin.andrey@mail.ru

УДК 624.21.016

Метод продольной надвигки с плавучей опорой металлических комбинированных пролетных строений мостов

П. И. Татаренко, С. В. Чижов, Ю. В. Авдей, А. А. Антонюк

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

Для цитирования: Татаренко П. И., Чижов С. В., Авдей Ю. В., Антонюк А. А. Метод продольной надвигки с плавучей опорой металлических комбинированных пролетных строений мостов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 685–693. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-685-693

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос о необходимости применения технологии монтажа металлического комбинированного пролетного строения в виде решетчатой фермы с треугольной решеткой и жестким нижним поясом с ездой понизу однопролетных мостов методом продольной надвигки с применением плавучей опоры. Показать значимость и эффективность данного метода. Дать последовательность основным операциям монтажа. Изобразить общую схему надвигки. Обозначить порядок проверки пролетного строения на всех этапах монтажа. Показать методику проверки плавучей опоры по двум группам предельных состояний. **Методы:** Сравнение продольной надвигки с применением плавучей опоры с продольной надвигкой по временным опорам, а также сборкой пролетного строения на временных подмостях. Анализ полученных значений напряжений при проверке пролетного строения на всех этапах монтажа, а также аналитических выражений методики проверки плавучей опоры. **Результаты:** Указаны преимущества продольной надвигки с применением плавучей опоры по сравнению с другими видами монтажа металлического комбинированного пролетного строения. Обозначены основные операции и особенности монтажа металлического комбинированного пролетного строения. Дана общая схема установки обустройств на примере строительства автодорожного моста через реку Пезуапсе, а также даны комментарии к проверке металлического комбинированного пролетного строения. Выражены основные формулы проверки плавучей опоры. **Практическая значимость:** Особенности и преимущества данного метода монтажа металлического комбинированного пролетного строения позволяют упростить строительство однопролетных мостов с данными пролетными строениями, а также повысить экономическую эффективность подобных проектов. Методика проверки плавучей опоры может быть рекомендована к практическому использованию.

Ключевые слова: Метод надвигки с применением плавучей опоры, автодорога, однопролетный мост, комбинированное пролетное строение, металл, технология строительства, проверка плавучей опоры.

Введение

В настоящее время все большее распространение получают однопролетные мосты с комбинированным пролетным строением в виде решетчатой фермы с треугольной решеткой и жестким нижним поясом с ездой понизу.

При строительстве большинства мостов с данным комбинированным пролетным строением были использованы такие варианты сооружения пролетного строения, как сборка пролетного строения на подмостях уже в пролете и метод продольной надвигки по временным опорам.

Однако нужно учитывать множество факторов, которые могут усложнять монтаж. Например, при большой глубине водотока и наличии судоходства экономически неэффективно, а иногда попросту невозможно загромождать русло реки [1].

В данном случае лучшим вариантом монтажа пролетного строения будет являться продольная навивка с применением плавучей опоры.

Причины распространения комбинированных пролетных строений в виде решетчатой фермы с треугольной решеткой и жестким нижним поясом с ездой понизу

Данные пролетные строения, используемые в строительстве автодорожных, а также железнодорожных мостов, имеют существенные достоинства:

– комбинированное пролетное строение в виде решетчатой фермы с треугольной решеткой и жестким нижним поясом с ездой понизу перекрывает большие пролеты по сравнению с железобетонными пролетными строениями [2];

– по сравнению с металлическими или сталежелезобетонными балочными пролетными строениями данные пролетные строения имеют меньшую строительную высоту, что позволяет значительно сократить объем подходов насыпей [3];

– в сравнении с металлическими балочными пролетными строениями, эффективно используются свойства металла, так как в данном пролетном строении, за исключением жесткого нижнего пояса, элементы работают преимущественно на осевые усилия [4];

– архитектурная выразительность, достигаемая строгими геометрическими формами, а также отсутствием стоек и подвесок в комбинированной ферме, делает данный вариант гораздо привлекательнее по сравнению с его «предшественником» — классической фермой [5].

Последовательность работ при продольной навивке с применением плавучей опоры

Данный метод монтажа пролетного строения состоит из таких работ, как:

1. Сборка краном пролетного строения на стапеле.

2. С помощью тяговых и (или) толкающих устройств перемещение пролетного строения в продольном направлении вдоль оси моста и вперед до положения, позволяющего установить плавучую опору под консоль пролетного строения.

3. Балластировка и заведение плавучей опоры под консоль навиваемого пролетного строения.

4. Откачка водного балласта, что позволяет поместить пролетное строение на плавучую опору с одновременной заменой накаточных устройств на каретку с балансиром и демонтажем гидравлических домкратов.

5. Раскрепление плавучей опоры от возможного сноса течением с помощью земляных якорей, якорей адмиралтейского типа, якорей-присосов.

6. Продольная навивка пролетного строения и синхронное перемещение плавучей опоры в направлении навивки с помощью тяговых и (или) толкающих устройств.

7. Фиксация пролетного строения на береговой опоре.

8. Снятие анкеров и освобождение плавучей опоры балластировкой.

9. Помещение пролетного строения на опорные части [6].

Особенности продольной навивки с применением плавучей опоры

Данный вид монтажа пролетного строения помимо преимуществ, описанных выше, имеет ряд особенностей, требующих пристального внимания рабочих, а также высокой их квалификации [7]:

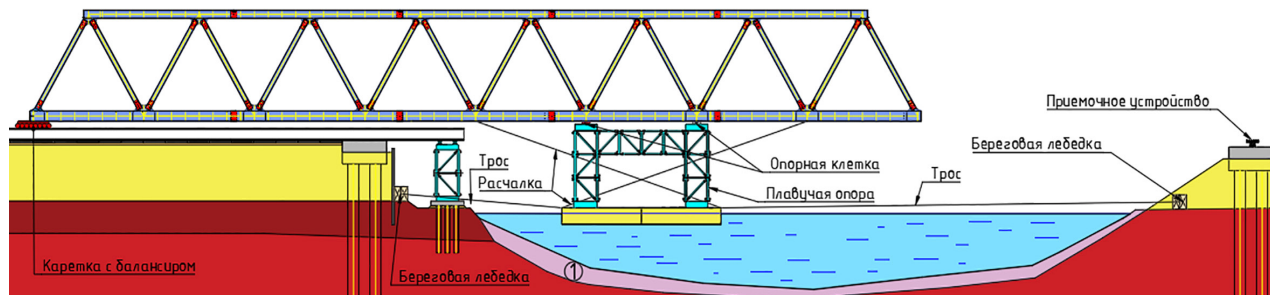


Рис. 1. Общая схема установки устройств при продольной надвижке с применением плавучей опоры на примере строительства автодорожного моста через реку Псезуапсе

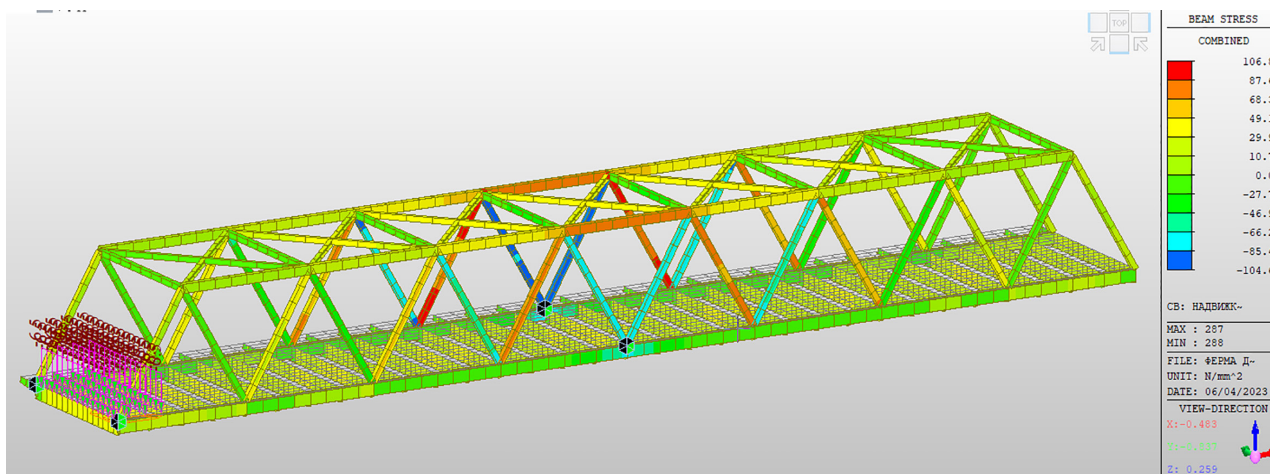


Рис. 2. Эпюра напряжений, когда пролетное строение находится над плавучей опорой

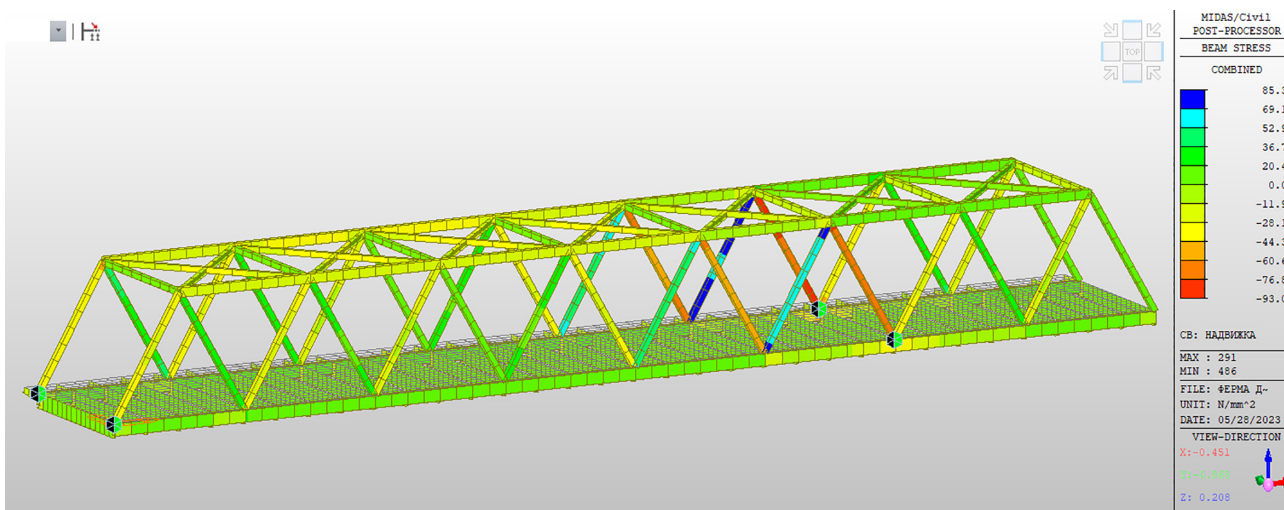


Рис. 3. Эпюра напряжений, когда пролетное строение находится на плавучей опоре и происходит надвижка

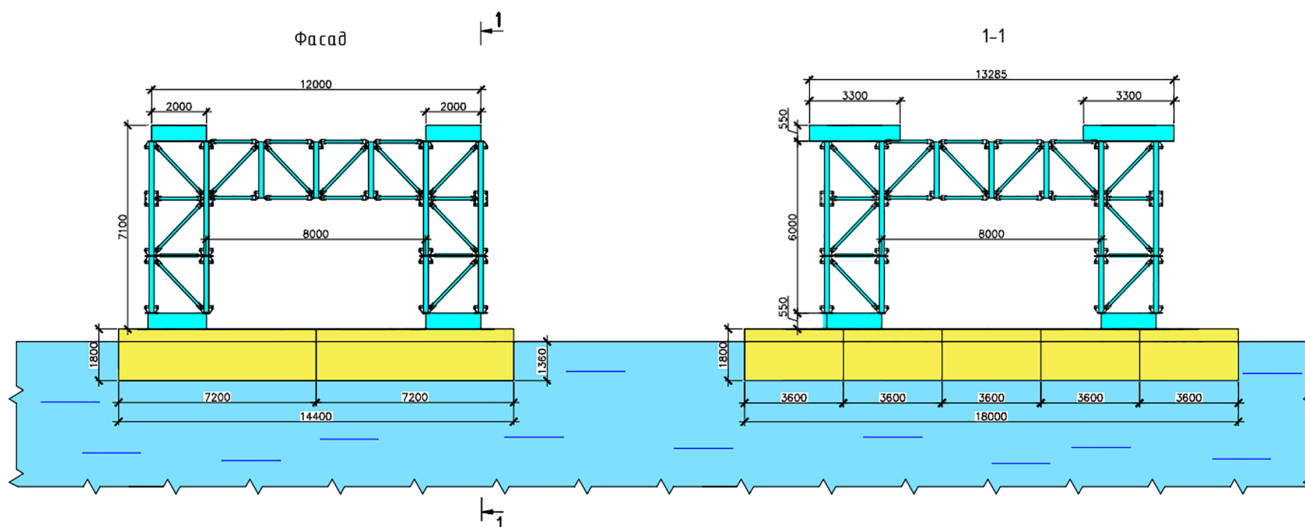


Рис. 4. Конструкция плавучей опоры

– плавучую опору необходимо закреплять установленными на берегу и в реке земляными и адмиралтейскими якорями;

– плавучие опоры должны быть соединены с пролетным строением расчалками, оснащенными винтовыми стяжками;

– во время надвигки с помощью расположенных на плашкоуте лебедок и полиспастов регулируется длина троса, соединяющего плавучую опору и якоря;

– необходимо подводить плавучую опору к пролетному строению и выводить из-под него в направлении вниз по течению;

– одновременная работа толкающих устройств и лебедок, а также перемещение плавучей опоры только в направлении надвигки позволяют минимизировать риск возникновения аварии в ходе монтажа пролетного строения данным методом;

– при надвигке следует корректировать объем балласта плавучей опоры для компенсации возрастающей на нее нагрузки от веса консоли пролетного строения. При этом накаточное устройство должно обеспечивать возможность вертикальных перемещений конца пролетного строения, находящегося на берегу, что достига-

ется использованием кареток, выполненных по балансирной схеме.

Помимо прочего, необходимо, чтобы была выполнена полная проверка прочности пролетного строения на всех этапах монтажа. На рис. 2 и 3 представлена проверка по напряжениям элементов комбинированной фермы с помощью программного комплекса MIDAS Civil на примере строительства автодорожного моста через реку Псезуапсе.

Проверка условия прочности:

$$\sigma_{\max} = 104,85 \text{ МПа} < [\sigma] = 295 \text{ МПа.}$$

Условие выполняется.

Проверка условия прочности:

$$\sigma_{\max} = 93,03 \text{ МПа} < [\sigma] = 295 \text{ МПа.}$$

Условие выполняется.

На рис. 4 представлена конструкция плавучей опоры при строительстве моста через реку Псезуапсе. Плавучая опора состоит из понтонов типа КС-63 и элементов МИК-С и МИК-П [8].

Порядок проверки плавучей опоры

При продольной надвигке с применением плавучей опоры выполняется проверка плавучей опоры [9]:

1. По первому предельному состоянию (на расчетные нагрузки):

- *Плавуемость*:

$$\gamma_{\text{в}} \sum V_{\text{п}} \geq \sum Q \gamma,$$

где $\gamma_{\text{в}}$ — удельный вес воды, кН/м³;

$\sum V_{\text{п}}$ — предельное водоизмещение плавсистемы при максимальной осадке;

$\sum Q$ — расчетный вес плавучей системы, кН(тс), равный сумме расчетных весов:

- пролетного строения;
- плавучих опор Q ;
- регулировочного и остаточного балласта $Q_{\text{рег}} + Q_{\text{ост}}$;

$\gamma = 1,25$ — коэффициент надежности по назначению.

$$Q_{\text{рег}} = LBh_{\text{рег}} \gamma;$$

$$Q_{\text{ост}} = LBh_{\text{ост}};$$

где L — длина плашкоута плавучей опоры, м;

B — ширина плашкоута плавучей опоры, м.

- *Остойчивость*, способность выведенной действием внешних сил из положения равновесия опоры возвращаться в него после прекращения действия этих сил:

$$\rho - a_c > 0,$$

где ρ — метацентрический радиус, м;

a_c — расстояние от центра водоизмещения до центра тяжести системы.

- *Прочность* плашкоута и надстройки.

Расчет прочности *надстройки* плавучей опоры выполняется по аналогии с расчетом временных опор для полунавесного монтажа.

Нагрузка на одну стойку надстройки:

$$N_{\text{ст}} = \frac{P + Q_{\text{н}}}{n_{\text{ст}}} \pm \frac{\sum M_w + Pe}{\sum y_i^2} \cdot y_{\text{max}} < [N_{\text{ст}}],$$

где P — расчетный вес пролетного строения;

$Q_{\text{н}}$ — расчетный вес надстройки;

$n_{\text{ст}}$ — количество стоек надстройки плавучей опоры.

$[N_{\text{ст}}]$ — предельная нагрузка на стойку (для МИК-С равна 1000 кН);

y_i — ордината поперек оси перевозимого пролетного строения от оси i -й стойки до центра стоечного поля надстройки плавучей опоры, м;

e — эксцентриситет (возможное смещение) положения пролетного строения относительно центра стоечного поля, м;

$$\sum M_w = W_1 h_1 + W_2 h_2,$$

здесь W_1, W_2 — воздействие ветра, приходящееся соответственно на перевозимое пролетное строение и надстройку, кН;

h_1, h_2 — расстояние от центра тяжести пролетного строения и надстройки до низа последней на палубе, м.

Прочность *плашкоута* плавучей опоры проверяется как прочность пластинки на упругом основании.

Строятся эпюры поперечной силы Q и изгибающего момента M , после чего максимальные значения усилий сравниваются с предельно допустимыми по рис. 5.

Порядок построения эпюр:

1) приближенно определяется интенсивность гидростатического давления воды по днищу плашкоута по формуле:

$$q = \frac{\sum P}{LB},$$

где $\sum P$ — суммарная расчетная вертикальная нагрузка, приходящаяся на плавучую опору, включая балласт;

L и B — длина и ширина плашкоута плавучей опоры.

- 2) строится эпюра нагрузок на судно;
 3) определяются ординаты эпюры поперечной силы Q как для консольной балки длиной $L/2$:

$$y_1 = ql_1 \text{ и т. д.}$$

- 4) ординаты эпюры моментов M в любом сечении находят как площадь эпюры Q слева от рассматриваемого сечения:

$$\eta_1 = \frac{y_1 l_1}{2},$$

$$\eta_2 = \frac{y_1 l_1 + (y_1 + y_2) l_2}{2}.$$

2. По второму предельному состоянию (на нормативные нагрузки):

- Объем водного балласта с учетом деформаций и допустимых осадок плавучей системы:

$$V = V_{\text{раб}} + V_{\text{рег}} + V_{\text{ост}},$$

где $V_{\text{раб}}$ — объем рабочего балласта, м³;

$V_{\text{рег}}$ — объем регулировочного балласта, м³;

$V_{\text{ост}}$ — объем остаточного балласта, м³.

- Осадка и сухой борт. Осадка плавучей опоры определяется по формуле:

$$t = \frac{\sum Q}{k_b \sum \omega},$$

где $\sum Q$ — приходящиеся на плавучую опору нагрузки, кН(тс);

$\sum \omega$ — площадь плавучей опоры по ватерлинии;

k_b — коэффициент полноты водоизмещения.

Сухой борт для плашкоутов из понтонов КС:

$$\Delta = H_{\text{п}} - t \frac{L}{2} \sin \varphi \geq 0,2 \text{ м,}$$

где $H_{\text{п}}$ — высота понтона, м;

L — длина плашкоута, м;

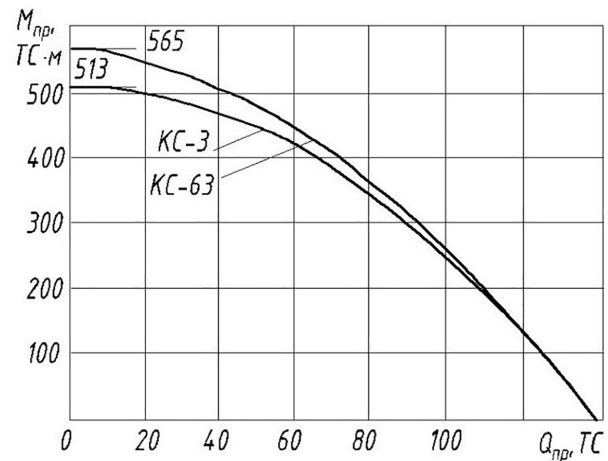


Рис. 5. График предельных усилий на понтон при изгибе в плоскости бортов от местной нагрузки при высоте понтона 1,8 м

$$\sin \varphi = \frac{\sum M (1 + \mu)}{\sum Q n (\rho - a_c)},$$

где $\sum M = W_1 h_1 + W_2 h_2 + W_3 h_3$;

$$\rho = \frac{J - \sum i}{V},$$

здесь J — момент инерции площади плашкоута плавучей опоры (в уровне ватерлинии) относительно оси ее наклона, м⁴;

$\sum i$ — моменты инерции понтонов с водным балластом относительно их собственных осей, м⁴;

V — объем погруженной части опор плавучей системы или отдельной опоры, м³;

a_c — расстояние от центра тяжести системы до центра водоизмещения,

$$a_c = \frac{Q_1 a_1 + Q_2 a_2 + Q_3 a_3}{Q_1 + Q_2 + Q_3},$$

здесь Q_1 — вес перевозимого ПС;

Q_2 — вес надстройки;

Q_3 — вес плашкоута с учетом водного балласта;

a_1, a_2, a_3 — расстояние от центра водоизмещения до центра тяжести пролетного строения, надстройки временной опоры и плашкоута с учетом водного балласта, м [10].

Заключение

1. Монтаж комбинированного пролетного строения в виде решетчатой фермы с треугольной решеткой и жестким нижним поясом с ездой понизу при большой глубине реки и наличии судоходства целесообразнее выполнять продольной надвижкой с применением плавучей опоры, поскольку в данном методе отсутствуют работы по сооружению временных опор, а плавучая опора является подвижной, что позволяет полностью не перекрывать русло реки и обеспечивать судоходство на момент строительства.

2. Следует отметить высокие требования к квалификации рабочих, осуществляющих монтаж пролетного строения, так как необходимо обеспечивать неподвижное положение пролетного строения относительно плавучей опоры и осуществлять постоянный контроль за положением пролетного строения на плавучей опоре. Помимо прочего, необходимо выполнить проверку плавучей опоры по двум группам предельных состояний.

3. Монтаж пролетного строения производится исключительно в теплое время года, так как наличие льда в реке полностью ограничивает применение данного метода.

4. В процессе монтажа пролетного строения необходимо учитывать такие особенности, как достаточная глубина воды в реке, небольшая скорость течения воды в реке и небольшая сила ветра поперек оси моста.

5. Использование данного метода сооружения пролетного строения, в силу его достоинств и особенностей, возможно и на других проектах мостов с аналогичными пролетными строениями, а также схожими геологическими и гидроло-

гическими условиями, что позволит отказаться от временных опор, а значит, получить экономическую выгоду при строительстве данным методом.

Библиографический список:

1. Вайчулис А. Ю. Тенденции и перспективы инвестиционного процесса в строительстве / А. Ю. Вайчулис, В. В. Жукова, Б. В. Волков // Перспективы развития строительного комплекса. — 2015. — № 1. — С. 135–140.
2. Томилов С. Н. Особенности деформаций главных балок железобетонных пролетных строений автодорожных мостов при их усилении внешней арматурой / С. Н. Томилов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2020. — № 3. — С. 151–158.
3. Гречухин В.А., Лосев А.Ю. Исследование процесса надвижки сталежелезобетонного пролетного строения больших мостов / В. А. Гречухин, А. Ю. Лосев // Наука и техника. — 2017. — № 6. — С. 485–492.
4. Смирнов А. Н. Механические свойства длительно работающих сталей и природа предела текучести / А. Н. Смирнов // Технология металлов. 2004. — С. 35–42.
5. Протасов К. Г. Другие виды мостов комбинированных систем / К. Г. Протасов // Металлические мосты. — М.: Транспорт, 1973. — С. 321–332.
6. Устройство металлических пролетных строений автодорожных мостов: СТО НОСТРОЙ 2.29.160—2014. — М.: СОЮЗДОРСТРОЙ, 2016. — 238 с.
7. Софронов Д. С. Качество трудового ресурса строительной отрасли / Д. С. Софронов // Вестник МГСУ. — 2012. — № 3. — С. 159–163.
8. Науменко А. А. Создание модели процесса плавучих опор при строительстве в водных условиях / А. А. Науменко, И. Л. Благовидова, А. В. Пьянов и др. // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № S2. — С. 239–247.
9. Специальные вспомогательные сооружения и устройства для строительства мостов: СТО 136—2009. — М.: Институт Гипростроймост, 2009. — 301 с.
10. Смирнов В. Н. Вспомогательные сооружения для строительства мостов / В. Н. Смирнов. — СПб.: ПГУПС, 2004. — 74 с.

Дата поступления: 25.07.2023

Решение о публикации: 26.08.2023

Контактная информация:

ТАТАРЕНКО Павел Игоревич — аспирант;
pavel-tatarenko99@mail.ru

ЧИЖОВ Сергей Владимирович — канд. техн.
наук, доц.; sergchizh@yandex.ru

АВДЕЙ Юлия Владимировна — канд. пед. наук,
доц.

АНТОНЮК Анатолий Анатольевич — инженер
кафедры «Мосты»; aaa.12.03.1992@mail.ru

The Incremental Launching Method with a Floating Support of Metal Combined Bridge Superstructures

P. I. Tatarenko, S. V. Chizhov, Y. V. Avdey, A. A. Antonyuk

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

For citation: Tatarenko P. I., Chizhov S. V., Avdey Y. V., Antonyuk A. A. The Incremental Launching Method with a Floating Support of Metal Combined Bridge Superstructures // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 685–693. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-685-693

Summary

Purpose: To consider the necessity of applying the erection technology of metal combined superstructure in the form of a lattice truss with a triangular lattice and a rigid bottom chord with driving underneath single span bridges by the incremental launching method with the use of floating support. To show the significance and efficiency of this method. To give the sequence of the main installation operations. To draw a general scheme of launching. To outline the procedure for checking the superstructure at all stages of erection. To show the method of checking the floating support according to two groups of limit states. **Methods:** Comparison of incremental launching using a floating support with incremental launching using auxiliary supports, as well as construction of the span on falsework. Analysis of the stress values obtained during the inspection of the superstructure at all stages of erection, as well as of the analytical expressions of the floating support inspection methodology. **Results:** The advantages of the incremental launching with the use of floating support in comparison with other types of installation of metal combined superstructure are specified. The main operations and features of metal combined superstructure erection are outlined. The general scheme of installation of facilities is given on the example of construction of the highway bridge over the river Psezuapse, as well as comments on the verification of the metal combined superstructure are given. The basic formulas for checking the floating support are expressed. **Practical significance:** Features and advantages of this method of installation of metal combined superstructure will simplify the construction of single-span bridges with the superstructure of this kind, as well as increase the economic efficiency of such projects. The method of floating support testing can be recommended for practical use.

Keywords: The incremental launching method with the use of floating support, highway, single-span bridge, combined superstructure, metal, construction technology, floating support inspection.

References

1. Vaychulis A. Yu., Zhukova V. V., Volkov B. V. Tendentsii i perspektivy investitsionnogo protsessa v stroitel'stve [Trends and prospects of the investment process in construction]. *Perspektivy razvitiya*

stroitel'nogo kompleksa [Prospects for the development of the construction complex]. 2015, Iss. 1, pp. 135–140. (In Russian)

2. Tomilov S. N. Osobennosti deformatsiy glavnykh balok zhelezobetonnykh proletrykh stroeniy avto-

dorozhnykh mostov pri ikh usilenii vneshney armaturoy [Features of deformations of the main beams of reinforced concrete spans of road bridges when they are reinforced with external reinforcement]. *Vestnik Inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta* [Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University]. 2020, Iss. 3, pp. 151–158. (In Russian)

3. Grechukhin V. A., Losev A. Yu. Issledovanie protsessa nadvizhki stalezhelezobonnogo proleznogo stroeniya bol'shikh mostov [Investigation of the sliding process of the steel-reinforced concrete superstructure of large bridges]. *Nauka i tekhnika* [Science and Technology]. 2017, Iss. 6, pp. 485–492. (In Russian)

4. Smirnov A. N. Mekhanicheskie svoystva dlitel'no rabotayushchikh staley i priroda predela tekuchesti [Mechanical properties of long-term steels and the nature of the yield point]. *Tekhnologiya metallov* [Tekhnologiya metallov]. 2004, pp. 35–42. (In Russian)

5. Protasov K. G. Drugie vidy mostov kombinirovannykh sistem [Other types of bridges of combined systems]. *Metallicheskie mosty* [Metallic bridges]. Moscow: Transport Publ., 1973, pp. 321–332. (In Russian)

6. *Ustroystvo metallicheskiikh proleznikh stroeniy avtodorozhnykh odezhd: STO NOSTROY 2.29.160—2014* [Arrangement of metal span structures of road pavements: STO NOSTROY 2.29.160—2014]. Moscow: SOYuZDORSTROY Publ., 2016, 238 p. (In Russian)

7. Sofronov D. S. Kachestvo trudovogo resursa stroitel'noy otrasli [The quality of the labor resource of the construction industry]. *Vestnik MGSU* [Vestnik MGSU]. 2012, Iss. 3, pp. 159–163. (In Russian)

8. Naumenko A. A., Blagovidova I. L., Pyanov A. V. et al. Sozдание modeli protsessa plavuchikh opor pri stroitel'stve v vodnykh usloviyakh [Creation of a process model for floating supports during construction in water conditions]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Proceedings of the Krylov State Scientific Center]. 2019, Iss. S2, pp. 239–247. (In Russian)

9. *Spetsial'nye vspomogatel'nye sooruzheniya i ustroystva dlya stroitel'stva mostov: STO 136—2009* [Special auxiliary structures and devices for the construction of bridges: STO 136—2009]. Moscow: Institut Giprostroykost Publ., 2009, 301 p. (In Russian)

10. Smirnov V. N. *Vspomogatel'nye sooruzheniya dlya stroitel'stva mostov* [Auxiliary facilities for the construction of bridges]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2004, 74 p. (In Russian)

Received: July 25, 2023

Accepted: August 26, 2023

Author's information:

Pavel I. TATARENKO — Postgraduate Student;
pavel-tatarenko99@mail.ru

Sergey V. CHIZHOV — PhD in Engineering,
Associate Professor; sergchizh@yandex.ru

Yulia V. AVDEY — PhD in Pedagogy, Associate
Professor

Anatoly A. ANTONYUK — Engineer of the
Department “Bridges”; aaa.12.03.1992@mail.ru

УДК 551.583.2

Анализ выбросов парниковых газов стран BRICS и пути сокращения выбросов на железнодорожном транспорте

Р. Г. Ахтямов, Е. И. Макарова, А. А. Гаврилова

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

Для цитирования: Ахтямов Р. Г., Макарова Е. И., Гаврилова А. А. Анализ выбросов парниковых газов стран BRICS и пути сокращения выбросов на железнодорожном транспорте // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 694–705. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-694-705

Аннотация

Цель: Анализ выбросов парниковых газов стран BRICS, а также путей сокращения выбросов на железнодорожном транспорте. **Методы:** Оценен вклад стран BRICS в глобальные выбросы парниковых газов на основе массива статистических данных за период с 1990 по 2019 год. Определена величина выбросов CO₂ на единицу произведенной энергии в странах BRICS с 1965 по 2021 год, а также источники выбросов CO₂. **Результаты:** Наиболее эффективный способ смягчения последствий изменения климата — это прямое сокращение выбросов. В целом выбросы железнодорожной отрасли зависят от степени электрификации. Однако при оценке не только прямых, но и косвенных выбросов основное значение приобретает источник энергии и его углеродный след. Значимым является развитие интермодальных перевозок в странах BRICS, так как данные маршруты имеют потенциал снижения выбросов. Углеродное регулирование приводит к перераспределению в сфере международных грузовых перевозок стран BRICS. Конкурентные преимущества все больше проявляются у железнодорожного транспорта. Однако данный эффект зависит от того, какими будут мероприятия по адаптации к изменениям рынка перевозок со стороны других видов транспорта. **Практическая значимость:** Сформулированы пути повышения устойчивости транспортной инфраструктуры. Низкоуглеродная транспортная отрасль стран BRICS может являться существенным компонентом снижения валовых выбросов парниковых газов, особенно учитывая имеющуюся значительную зависимость от ископаемого углеродного топлива, а также некоторую инерцию, которая обусловлена длительным сроком службы имеющейся инфраструктуры, работающей на ископаемом топливе. Снижение выбросов парниковых газов от объектов железнодорожного транспорта стран BRICS может заключаться в реализации следующих мер: сокращение прямых выбросов; разработка и реализация технологий поглощения парниковых газов с учетом геопространственного распределения транспортных объектов и их специфики; привлечение инвестиций и обеспечение доступа к более дешевому финансированию данных проектов; интеграция вопросов смягчения последствий изменения климата в стратегии транспортных компаний; продолжение электрификации транспорта и перехода на альтернативные виды топлива; использование цифровых технологий для оптимизации транспортных систем в направлении сокращения влияния железнодорожной отрасли на окружающую среду.

Ключевые слова: Глобальное потепление, устойчивое развитие, железнодорожная отрасль, изменение климата, низкоуглеродная транспортная отрасль, выбросы углекислого газа, технологии поглощения выбросов.

Введение

Выбросы парниковых газов, в том числе углекислого газа, являются основной причиной глобальных климатических изменений. Для того чтобы избежать наиболее неблагоприятных последствий климатических изменений, следует сокращать общие валовые выбросы парниковых газов. Однако распределение ответственности за выбросы и мер по смягчению и адаптации к климатическим изменениям между регионами, странами, отраслями и отдельными лицами в настоящий момент является предметом анализа и широких дискуссий.

Так, центральной частью процесса развития, в соответствии с положениями Декларации ООН по проблемам окружающей среды (Стокгольм, 1972) и Конференции ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, 1992), должно быть достижение устойчивого развития и реализация подходов по защите окружающей среды. При этом наличие значительной части как морально, так и физически устаревшего оборудования в некоторых отраслях оказывает существенное влияние на валовые выбросы парниковых газов [1].

Формирование и работа Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) явились результатом принятия и реализации Киотского протокола к Рамочной конвенции ООН об изменении климата (Киото, 1997). Вместе с тем правительства отдельных государств разрабатываются меры более эффективного использования энергии, а также поддержка разработки и внедрения новых и (или) возобновляемых источников энергии и инновационных технологий, в том числе технологий поглощения парниковых газов, которые уже поступили в атмосферу [2–4].

По итогам Парижского соглашения по борьбе с изменением климата (КС-21) участники (197 стран) приняли на себя обязательства по разра-

ботке долгосрочной стратегии экономического развития при условии снижения выбросов парниковых газов. На сегодняшний день Парижское соглашение ратифицировано странами, общий вклад которых в валовые выбросы составляет 96,98 %, в том числе страны BRICS.

По итогам 26-й сессии Конференции Сторон Рамочной конвенции ООН (РКИК) об изменении климата (Глазго, 2021) согласована открытая повестка дня по рынкам углеродных единиц и отчетности. В том числе финансирование мероприятий по смягчению последствий климатических изменений, снижению выбросов, а также повышению устойчивости климатической системы. Кроме того, идет снижение доли устаревших технологий, применяемых в энергетическом секторе. Однако оценка мер по смягчению последствий климатических изменений показала имеющийся разрыв между существующими выбросами парниковых газов и величиной тех выбросов, которые необходимы для реализации Парижского соглашения [5–9]. Сторонами РКИК принят подход, заключающийся в стремлении сохранить возможность удержания прироста общемировой средней температуры в пределах 2 °C по отношению к доиндустриальному уровню [10–15].

Материалы и методы

Анализ вклада стран BRICS в глобальные выбросы парниковых газов проведен по материалам статистических данных [16] за различные временные интервалы. Выявление отраслевых особенностей и анализ эффективности подходов к регулированию является одним из направлений по снижению количества выбросов парниковых газов. При выборе стратегии сокращения выбросов целесообразно опираться как на экономические возможности, так и на технически достижимый результат для каждой отдельной страны. На рис. 1 приведено накопление выбросов CO₂ в странах BRICS с 1901 по 2021 год, ГтCO₂.

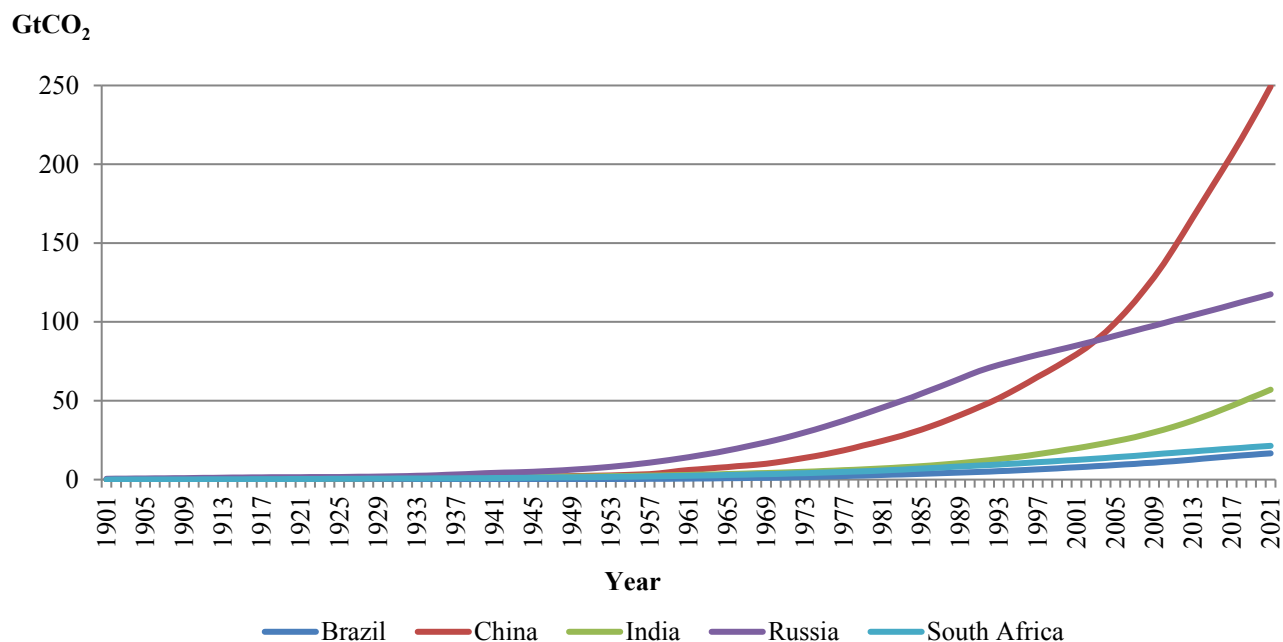


Рис. 1. Накопление выбросов CO₂ в странах BRICS с 1901 по 2021 год, ГтCO₂

Как видно из рис. 1, очевидный тренд на рост выбросов CO₂ в странах BRICS связан с активным развитием промышленности и генерацией энергии. При этом некоторое замедление роста величины выбросов в России с 1990 года связано с замедлением производства в связи с экономическим кризисом. Вероятно, подобная тенденция сохранится или усилится вследствие глобального и регионального кризисов после 2022 года.

Реализация подходов к регулированию выбросов в России включает в себя развитие законодательства, в том числе создание рынка углеродных единиц и создание необходимых условий для устойчивого развития экономики при сокращении выбросов парниковых газов (ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов»). Значительная часть потенциала декарбонизации может быть реализована за счет модернизации оборудования и снижения энергоёмкости технологий.

Поскольку глобальные и национальные энергетические системы менялись на протяжении десятилетий, вклад различных источников топлива в выбросы парниковых газов менялся

как географически, так и во времени. На рис. 2 приведена динамика величины выбросов CO₂ на единицу произведенной энергии в странах BRICS с 1965 по 2021 год.

Как видно из рис. 2, выбросы углекислого газа, связанные с энергетикой и промышленным производством, могут происходить от различных видов топлива. Вклад каждого из этих источников значительно изменился с течением времени и по-прежнему сильно различается по регионам. В настоящее время преобладают твердое и жидкое топливо, хотя вклад газа также заметен. Производство цемента и сжигание в факелах на глобальном уровне остаются сравнительно небольшими.

Тенденции существенно различаются по регионам. Ранняя индустриализация началась с потребления твердого топлива, однако со временем этот энергетический баланс диверсифицировался. Сегодня выбросы CO₂ распределяются примерно поровну между углем, нефтью и газом. Энергетика Азии остается доминирующей в потреблении твердого топлива, и доля цемента здесь значительно выше, чем в других регионах.

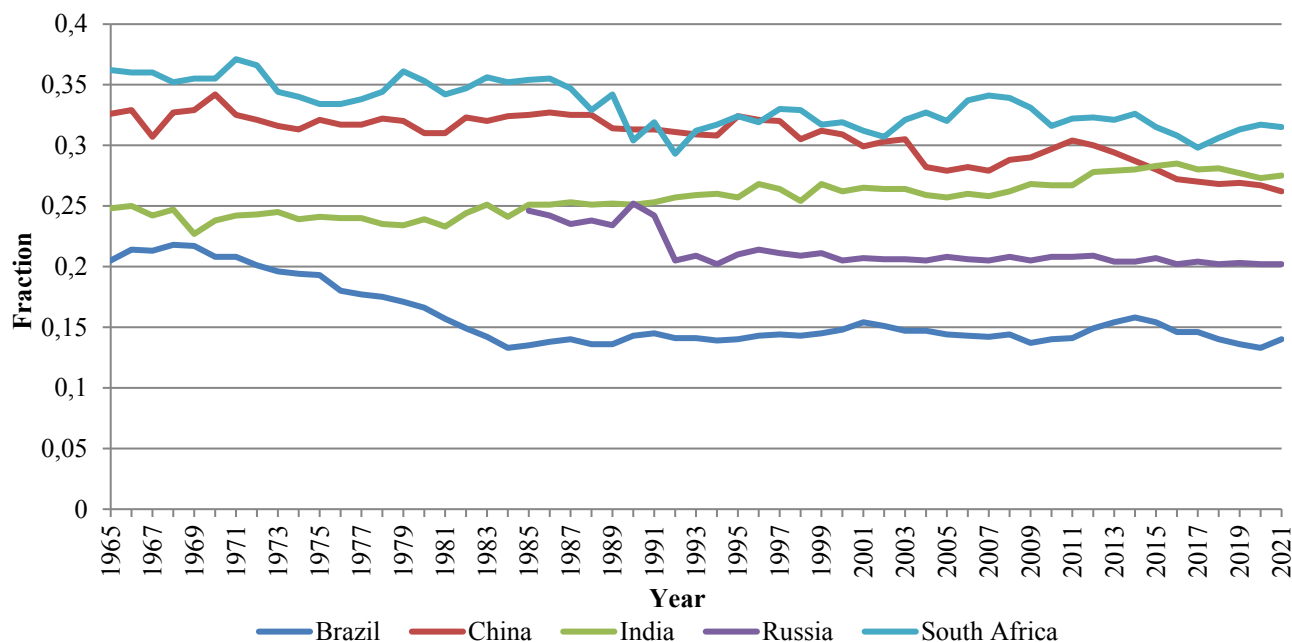


Рис. 2. Величина выбросов CO₂ на единицу произведенной энергии в странах BRICS с 1965 по 2021 год, доля единицы

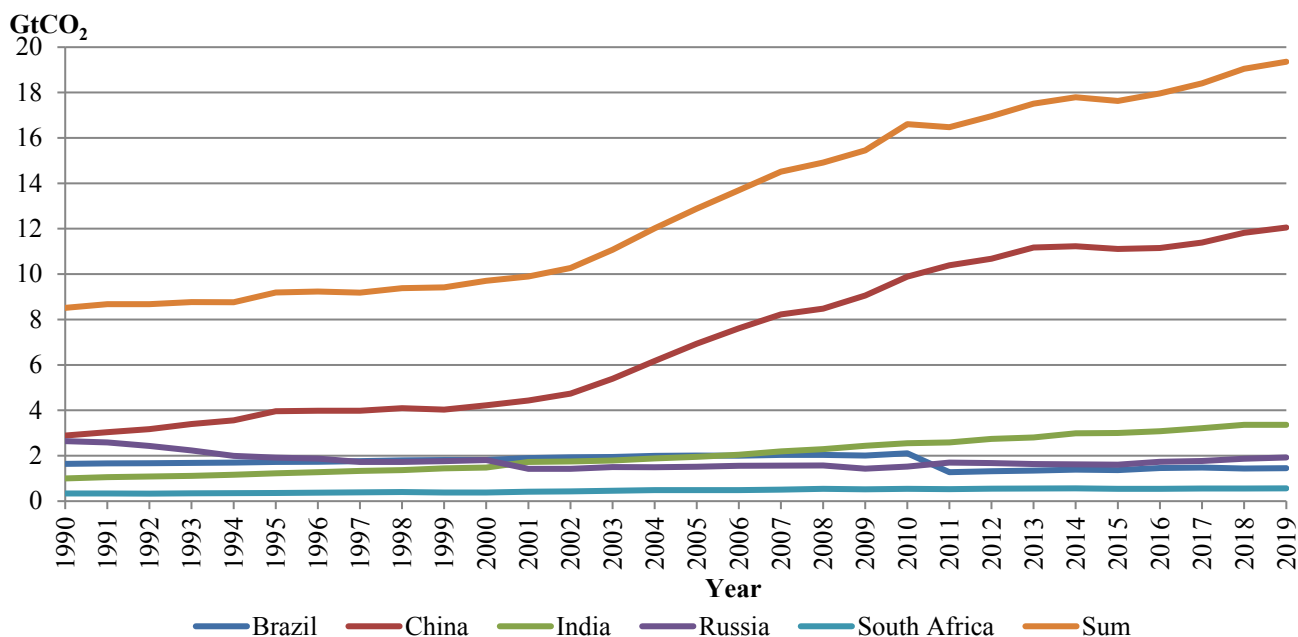


Рис. 3. Общие выбросы всех видов парниковых газов в странах BRICS с 1990 по 2019 год, ГтCO₂

На рис. 3 приведены общие выбросы всех видов парниковых газов в странах BRICS с 1990 по 2019 год, ГтCO₂.

Анализ рис. 3 показывает, что суммарная величина выбросов всех видов парниковых газов

в странах BRICS с 1990 по 2019 год составляет 391,91 ГтCO₂. За 2019 год выбросы парниковых газов в странах BRICS составили 19,36 ГтCO₂. Во всем мире за 2019 год в атмосферу поступило 37,08 ГтCO₂. Таким образом, вклад стран BRICS

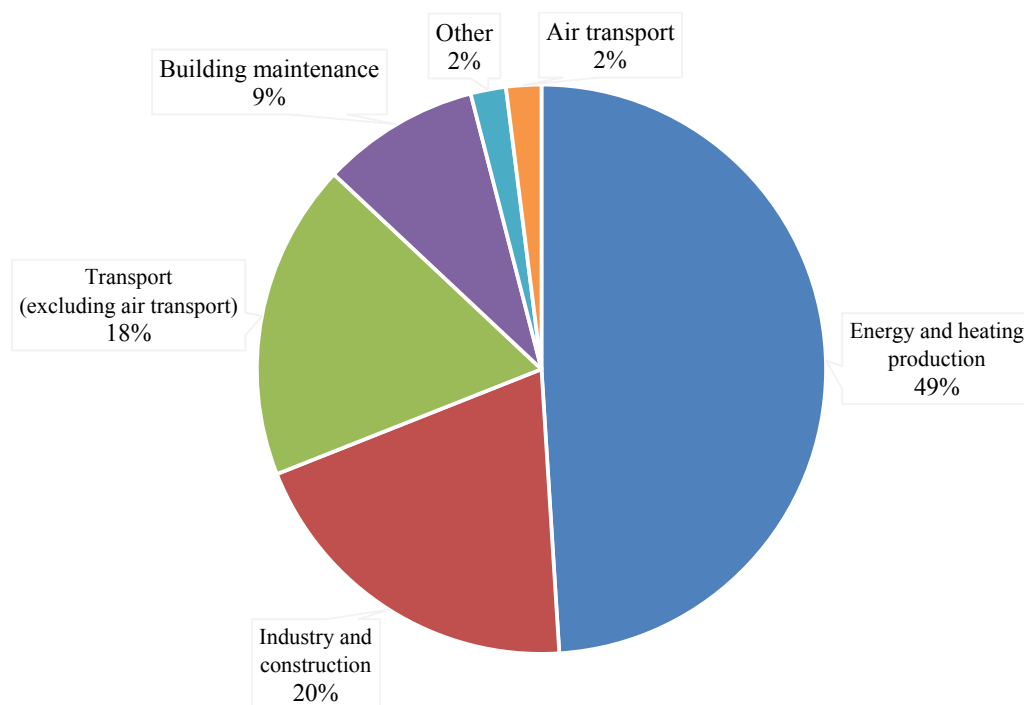


Рис. 4. Источники выбросов CO₂ в мире, доля от общего объема выбросов, %

составляет 52,2 % общемирового выброса парниковых газов.

Большинство из этих газов возникает из-за использования энергии, строительства сооружений для добычи и сжигания полезных ископаемых, выбросов транспорта. На рис. 4 приведены доли от общего объема выбросов CO₂ в мире, в том числе транспорта.

Как видно из рис. 4, основная доля от общего объема выбросов углекислого газа приходится на производство электроэнергии и отопление, однако доля транспорта (за исключением авиационного) составляет 18 %.

Достигнуть углеродной нейтральности можно с помощью применения технологий сокращения или поглощения выбросов. На сегодняшний день существуют несколько технологий поглощения выбросов:

- лесовозобновление или облесение;
- биоэнергетика с улавливанием и хранением углерода;
- усиленное выветривание;

- улавливание углерода из воздуха и его хранение;
- удобрение океана;
- фиксация углерода в почве.

Результаты

Технологии поглощения выбросов имеют известную степень ограниченности своего потенциала по удалению парниковых газов из атмосферы. Кроме того, пока данные технологии не имеют широкого распространения, в этой связи усложняется оценка их эффективности по смягчению климата. При этом наиболее эффективный способ смягчения последствий изменения климата это прямое сокращение выбросов. Если транспортная отрасль ограничивается оценкой только прямых выбросов парниковых газов и таким образом пытается достичь углеродной нейтральности, это может оцениваться обществом как маскировка под экологичность (гринвошинг). Это обусловлено тем, что углеродный след формируется всеми видами выбросов, возникающих

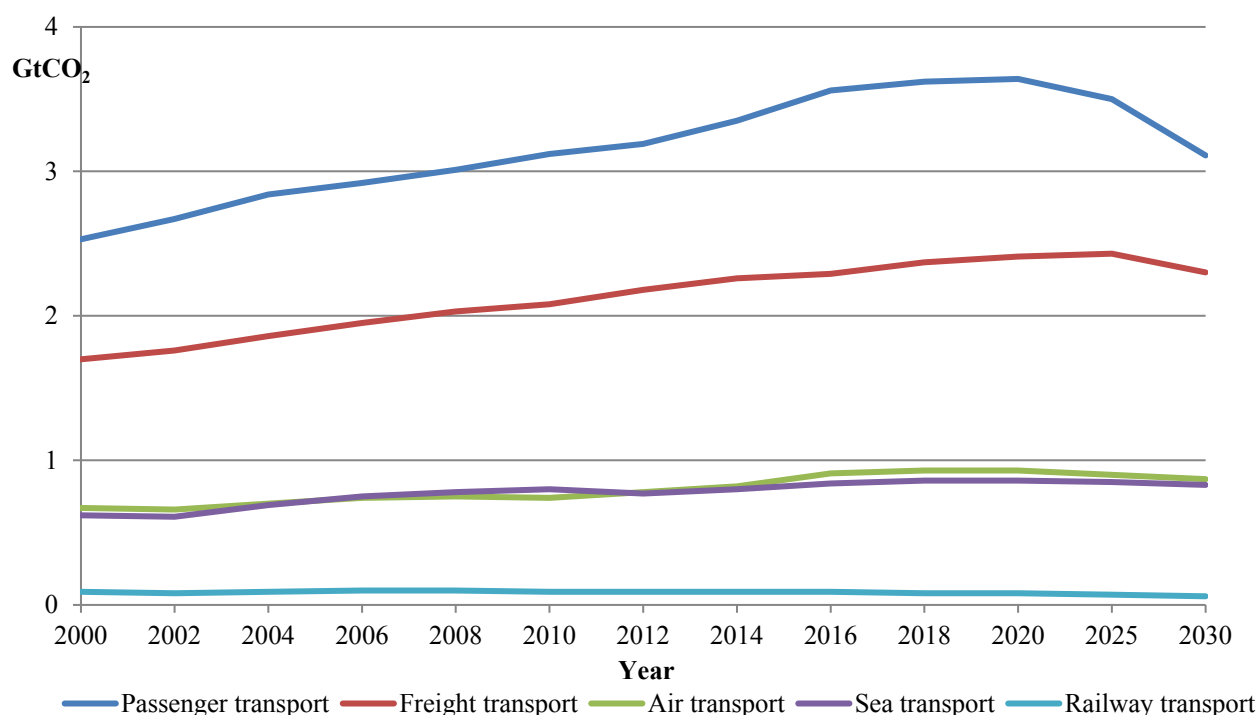


Рис. 5. Величина выбросов CO₂ по видам транспорта (в том числе прогноз при устойчивом развитии)

при деятельности предприятия: вид и источник сырья, технология производства, предоставляемые услуги, обращение с отходами и др.

В целом выбросы железнодорожной отрасли зависят от степени электрификации. Однако при оценке не только прямых, но и косвенных выбросов основное значение приобретают источник энергии и его углеродный след. Значимым является развитие интермодальных перевозок в странах BRICS, так как данные маршруты имеют потенциал снижения выбросов, а также должны быть включены в программы устойчивого развития регионов через равномерное распределение нагрузок, повышение безопасности перевозок и др.

Ключевыми положениями такого регулирования являются принцип материальной ответственности источника загрязнения («загрязнитель платит», *polluter pays*) и принцип «пользователь платит» (*user pays*). Посредством такого регулирования государство (или наднациональный институт) включает издержки пользования общим ресурсом в издержки источника загрязнения.

На долю железнодорожной отрасли приходится 7 % международных грузоперевозок, при этом доля потребления энергии в мировом масштабе составляет 3 %. Величина прямого вклада железнодорожной отрасли в выбросы углекислого газа составляет 0,3 % общемирового (рис. 5).

Как видно из рис. 5, преимущества железнодорожных перевозок имеют свою специфику, связанную с источником энергии. Это приобретает особую значимость в связи с тем, что грузовые перевозки в странах BRICS осуществляются преимущественно тепловозами. Использование тепловозов обусловлено низкой степенью электрификации железных дорог стран BRICS, а также существенными затратами на проведение работ по электрификации железных дорог и обеспечение функционирования данной инфраструктуры. Величина прямых выбросов парниковых газов от тепловозов оценивается в диапазоне от 25 до 60 г CO₂ на тонно-километр, что обусловлено техническими характеристиками локомотивов. При этом величина выбросов парниковых

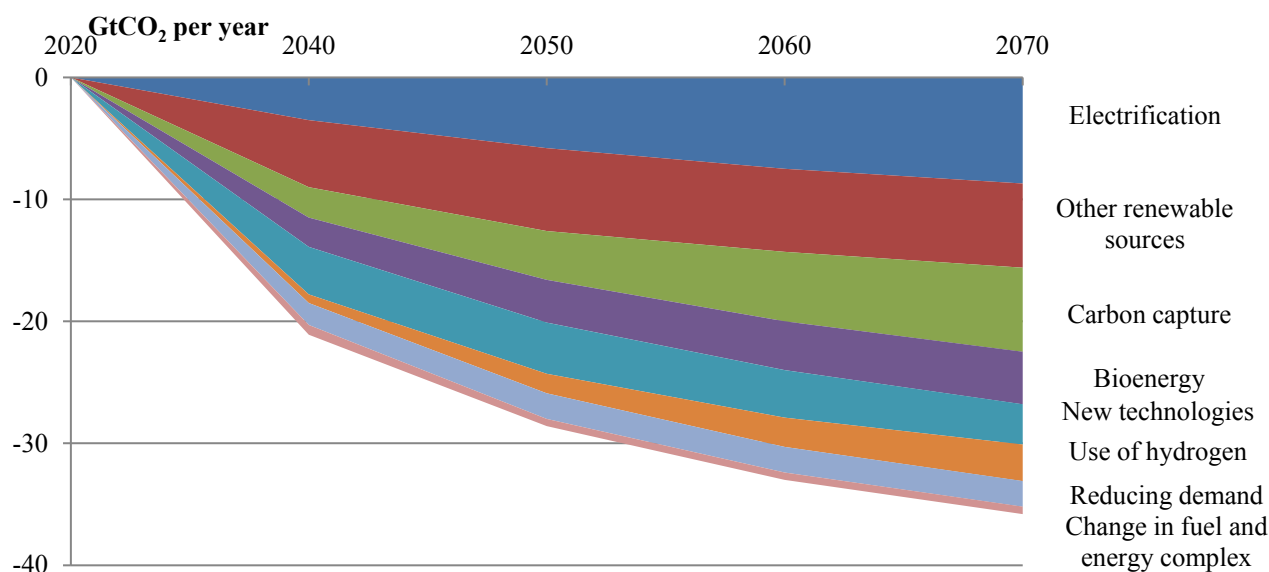


Рис. 6. Планируемое сокращение глобальных выбросов CO₂ от энергетического сектора по видам

газов от электровозов составляет от 10 до 25 г CO₂ на тонно-километр. Даже такой разброс, имеющий значение для регулирования выбросов парниковых газов, сохраняет за железнодорожной отраслью значимые экологические преимущества. В силу объективных обстоятельств, связанных с наличием маршрутов с низкой загрузкой, проведение полной электрификации на железных дорогах стран BRICS может оцениваться как экономически нецелесообразное.

Углеродное регулирование приводит к перераспределению в сфере международных грузовых перевозок стран BRICS. Конкурентные преимущества все больше проявляются у железнодорожного транспорта. Однако данный эффект зависит от того, какими будут мероприятия по адаптации к изменениям рынка перевозок со стороны других видов транспорта. В долгосрочной перспективе на железнодорожную отрасль стран BRICS окажет влияние не только электрификация, но и переход на альтернативные виды топлива (рис. 6).

Обновление как подвижного состава, так и транспортной инфраструктуры позволяет сократить косвенные выбросы парниковых газов

(рис. 6). Для того чтобы данные изменения были реализованы с максимальным экономическим эффектом, целесообразно продолжение поддержки перехода на низкоуглеродное развитие.

Кроме того, сокращение углеродного следа происходит вследствие внедрения современных цифровых технологий, которые оптимизируют производственный процесс и способствуют интеграции между различными видами транспорта. Следует отметить, что внедрение цифровых решений, способных привести к снижению выбросов парниковых газов от железнодорожной отрасли стран BRICS, а также повысить привлекательность железнодорожного транспорта как экологичного вида транспорта, — целесообразно.

Анализ результатов

В XIX веке железные дороги стали символом происходящей промышленной революции. В XXI веке железная дорога, как и вся транспортная отрасль, претерпевает значительные изменения. Реализация стратегии снижения выбросов парниковых газов определяет новые преимущества железнодорожного транспорта, в том числе проведение исследований, разработки и внедре-

ния технологий поглощения выбросов парниковых газов. Виды технологий поглощения парниковых газов, которые могут быть использованы в транспортной отрасли, могут быть отнесены к следующим категориям:

1. *Лесоразведение и лесовосстановление* связано с поглощением углекислого газа в процессе роста лесов. Данная технология поглощения углекислого газа является известной, кроме того, она может быть использована с низкими затратами. Однако следует учитывать, что для поглощения значительных объемов углекислого газа необходимы большие площади восстановленных или высаженных лесов. При этом существует угроза высвобождения запасенного в древесине углерода при нарушении технологий посадки. Возможны выбросы закиси азота при внесении удобрений для стимулирования роста лесов. Также необходима защита лесов от природных пожаров. В засушливых районах потребность в воде также может быть значимым лимитирующим фактором.

2. *Производство биоэнергии с улавливанием и хранением углерода*. Так как в процессе формирования биомасса накапливает углерод и хранит его в виде органического материала, то при сжигании или преобразовании в другие виды энергии, производстве электричества или других видов энергоресурсов происходит поглощение углекислого газа из атмосферы. Однако необходимо учитывать, что углекислый газ, который образуется при сжигании биомассы, должен улавливаться и захораниваться. Преимуществом данной технологии поглощения парниковых газов является то, что она реализована на демонстрационных моделях, при этом ее эффективность и эколого-экономическая целесообразность должна оцениваться применительно к местам возможного расположения.

3. *Прямое улавливание углекислого газа из окружающего воздуха и захоронение*. Существенная часть антропогенно-обусловленных выбросов парниковых газов формируется в рас-

пределенных источниках выбросов. Зачастую улавливание данных выбросов в источнике не является эффективным и нецелесообразным. Для удаления данных выбросов можно производить улавливание углекислого газа непосредственно из окружающего воздуха. Реализация технологии прямого улавливания из атмосферы требует источник энергии и (или) тепла с минимальным углеродным следом, что накладывает ограничение на выбор подходящего места расположения территориями, где есть доступ к такому источнику. При прямом улавливании используется сорбент для поглощения углекислого газа в твердой или жидкой фазе. После поглощения углекислого газа сорбент регенерируется с выделением высококонцентрированного углекислого газа с его дальнейшей транспортировкой и захоронением. Например, в подземных пустотах, из которых идет добыча углеводородов, с последующим закачиванием в горные породы.

Заключение

Низкоуглеродная транспортная отрасль стран BRICS может являться существенным компонентом снижения валовых выбросов парниковых газов, особенно учитывая имеющуюся значительную зависимость от ископаемого углеродного топлива, а также некоторую инерцию, которая обусловлена длительным сроком службы имеющейся инфраструктуры, работающей на ископаемом топливе. Анализ докладов МГЭИК показывает, что сдерживание концентрации углекислого газа в 450 ppm к 2100 году либо невозможно, либо требует существенно больших затрат при условии отсутствия широкого внедрения технологий поглощения выбросов парниковых газов. Так, реализация прогнозного сценария климатических изменений со средним ростом температуры до 2 °С выше доиндустриального уровня предусматривает удаление из атмосферы до 4 ГтСО₂ в год к 2040 году. При этом величина затрат на

сокращение выбросов парниковых газов может быть на 40 % выше без использования рассматриваемых технологий поглощения выбросов парниковых газов, по сравнению с прогнозным сценарием, предусматривающим внедрение данных технологий поглощения выбросов.

В качестве одной из целей Транспортной стратегии РФ до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года предусмотрено развитие транспортной системы России с ее трансформацией в цифровой и низкоуглеродной области. Данная трансформация возможна путем ускорения внедрения новых технологий, в том числе технологий поглощения выбросов парниковых газов, что предполагает создание отрасли и инвесторам условий для снижения энерго- и углеродоемкости.

Снижение выбросов парниковых газов от объектов железнодорожного транспорта стран BRICS может заключаться в реализации следующих мер: сокращение прямых выбросов; разработка и реализация технологий поглощения парниковых газов, с учетом геопространственного распределения транспортных объектов и их специфики; привлечение инвестиций и доступ к более дешевому финансированию ряда инновационных проектов; интеграция вопросов смягчения климатических изменений в стратегии развития транспортных компаний; продолжение электрификации транспорта и перехода на альтернативные виды топлива; использование цифровых технологий для оптимизации транспортных систем в направлении сокращения влияния железнодорожной отрасли на окружающую среду.

Библиографический список

1. Titova T. Methodical approaches for durability assessment of engineering structures in cold regions / T. Titova, R. Akhtyamov, E. Nasyrova // *Lecture Notes in Civil Engineering*. — 2020. — Iss. 49. — Pp. 473–478. — DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_49/.
2. Bardyshev O. A. Monitoring of technical condition of technical devices at hazardous production facilities / O. A. Bardyshev, V. A. Popov, S. K. Korovin et al. // *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. — 2020. — Iss. 1. — Pp. 52–56. — DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-52-56.
3. Baydarashvili M. Conservation of mineral resources in transport and civil construction / M. Baydarashvili, A. Sakharova, N. Shrednik et al. // *Lecture Notes in Civil Engineering*. — 2020. — Iss. 50. — Pp. 479–486. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_50.
4. Nasyrova E. Geoenvironmental assessment of urban water bodies / E. Nasyrova, A. Elizaryev, S. Aksenov et al. // *E3S Web of Conferences*. — 2019. — Vol. 110, № 02045. — DOI: 10.1051/e3sconf/201911002045.
5. Ulyasheva V. M. Increasing the efficiency of methods for cleaning of ventilation emissions at construction enterprises / V. M. Ulyasheva, A. M. Gritimlin, N. A. Chernikov // *Water and Ecology*. — 2018. — Iss. 4. — Pp. 92–97. — DOI: 10.23968/2305-3488.2018.23.4.92-98.
6. Miloslavskaya S. Intermodal transportation using inland water transport in Russia and abroad / S. Miloslavskaya, A. Panychev, A. Myskina et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2019. — Vol. 698(6), № 066059. — DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066059.
7. Bryn M. J. Geodetic Monitoring of Deformation of Building Surrounding an Underground Construction / M. J. Bryn, D. A. Afonin, N. N. Bogomolova // *Procedia Engineering*. — 2017. — Iss. 189. — Pp. 386–392. — DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.061.
8. Baydarashvili M. Criteria of Geocoprotection in Construction / M. Baydarashvili // *Procedia Engineering*. — 2017. — Iss. 189. — Pp. 616–621. — DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.098.
9. Terekhov L. D. Experimental study of soil thawing around shallow sewage pipelines in winter / L. D. Terekhov, S. B. Mayny, N. A. Chernikov // *Water and Ecology*. — 2019. — Iss. 24(4). — Pp. 71–78. — DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.4.71-78.
10. Titova T. Accident at river-crossing underwater oil pipeline / T. Titova, R. Akhtyamov, E. Nasyrova et al. //

MATEC Web of Conferences. — 2018. — Iss. 239, № 06003. — DOI: 10.1051/mateconf/201823906003.

11. Uzdin A. M. On the Reliability of Finite-Element Evaluation of the Dynamic Interaction of a Structure with the Base / A. M. Uzdin, M. V. Freze, M. Y. Fedorova // Soil Mechanics and Foundation Engineering. — 2018. — Iss. 55(3). — Pp. 201–208. — DOI: 10.1007/s11204-018-9526-0.

12. Ershova S. Study of Life Quality and Urban Environment Quality in Russian Megapolises / S. Ershova, T. Orlovskaya, E. Panfilova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Iss. 463(4), № 042040. — DOI: 10.1088/1757-899X/463/4/042040.

13. Dudkina O. I. On the Strong Law of Large Numbers for Linear Combinations of Concomitants / O. I. Dudkina, N. V. Gribkova // Vestnik St. Petersburg University: Mathematics. — 2020. — Iss. 53(3). — Pp. 282–286. — DOI: 10.1134/S1063454120030061.

14. Kolos A. The effect of different additives on the swelling process of heavy clays / A. Kolos, V. Alpysova, G. Osipov // Lecture Notes in Civil Engineering. — 2020. —

Iss. 50. — Pp. 295–306. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_31.

15. Vvedenskij R. V. Environmental impact of the tunnel construction / R. V. Vvedenskij, S. G. Gendler, T. S. Titova // Magazine of Civil Engineering. — 2018. — Iss. 79(3). — Pp. 140–149. — DOI: 10.18720/MCE.79.15.

16. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions Country Profiles. — URL: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions#co2-and-greenhouse-gas-emissions-country-profiles> (дата обращения: 08.03.2023).

Дата поступления: 28.05.2023

Решение о публикации: 07.07.2023

Контактная информация:

АХТЯМОВ Расул Гумерович — канд. техн. наук, доц.;
ahtamov_zchs@mail.ru

МАКАРОВА Елена Игоревна — д-р техн. наук, доц.;
makarova@mail.ru

ГАВРИЛОВА Алина Анатольевна — ст. преподаватель;
A.A.Gavrilova.eco@yandex.ru

Analysis of Greenhouse Gas Emissions in BRICS and Ways to Reduce Emissions from Rail Transport

R. G. Akhtyamov, E. I. Makarova, A. A. Gavrilova

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

For citation: Akhtyamov R. G., Makarova E. I., Gavrilova A. A. Analysis of Greenhouse Gas Emissions in BRICS and Ways to Reduce Emissions from Rail Transport // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 694–705. (In Russian). DOI: 10.20295 1815-588X-2023-3-694-705

Summary

Purpose: To analyze greenhouse gas emissions from the BRICS countries, as well as ways to reduce emissions from rail transport. **Methods:** The contribution of the BRICS countries to global greenhouse gas emissions based on an array of statistical data for the period from 1990 to 2019 has been estimated. The value of CO₂ emissions per unit of energy produced in the BRICS countries from 1965 to 2021, as well as the sources of CO₂ emissions, have been determined. **Results:** It is shown that the most effective way to combat climate change is to directly reduce emissions. In general, the emissions of the railway industry depend on the level of electrification. However, when assessing not only direct but also indirect emissions, the energy source

and its carbon footprint become of primary importance. The development of intermodal transportation in BRICS countries is significant because these routes have the potential to reduce emissions. Carbon regulation leads to a redistribution in the sphere of international freight transportation among BRICS countries. Competitive advantages are increasingly evident in the railway transportation sector. However, this effect depends on the measures taken to adapt to changes in the transportation market by other modes of transportation. **Practical significance:** Ways to improve the sustainability of transport infrastructure have been formulated. The low-carbon transport industry in the BRICS countries can be seen as an important component in reducing gross greenhouse gas emissions given the current high level of reliance on fossil carbon fuels and the inertia driven by the long life of fossil fuel infrastructure. Without the use of negative emission technologies, the required costs for reducing greenhouse gas emissions can be 40 % higher than with the use of negative emission technologies. As part of the reduction of greenhouse gas emissions by railway transport facilities in the BRICS countries, the following measures can be implemented: direct reduction of greenhouse gas emissions; introduction and implementation of technologies for negative emissions at railway transport facilities, taking into account their geospatial distribution and their specific characteristics; attracting investments and ensuring access to more affordable financing for these projects; integration of climate change mitigation issues into the strategies of transportation companies; further electrification in transportation and transitioning to alternative fuel sources; utilization of digital technologies to optimize transportation systems and reduce the environmental impact of the railway industry.

Keywords: Global warming, sustainable development, railway industry, climate change, low-carbon transport industry, carbon dioxide emissions, negative emission technologies.

References

1. Titova T., Akhtyamov R., Nasyrova E. et al. Methodical approaches for durability assessment of engineering structures in cold regions. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020, Iss. 49, pp. 473–478. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_49.
2. Bardyshev O. A., Popov V. A., Korovin S. K. et al. Monitoring of technical condition of technical devices at hazardous production facilities. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*, 2020, Iss. 1, pp. 52–56. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-1-52-56.
3. Baydarashvili M., Sakharova A., Shrednik N. Conservation of mineral resources in transport and civil construction. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020, Iss. 50, pp. 479–486. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_50.
4. Nasyrova E., Elizaryev A., Aksenov S. et al. Geoenvironmental assessment of urban water bodies. *E3S Web of Conferences*, 2019, Iss. 110, № 02045. DOI: 10.1051/e3sconf/201911002045.
5. Ulyasheva V. M., Grititlin A. M., Chernikov N. A. Increasing the efficiency of methods for cleaning of ventilation emissions at construction enterprises. *Water and Ecology*, 2018, Iss. 4, pp. 92–97. DOI: 10.23968/2305-3488.2018.23.4.92-98.
6. Miloslavskaya S., Panychev A., Myskina A. et al. Intermodal transportation using inland water transport in Russia and abroad. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Iss. 698(6), № 066059. DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066059.
7. Bryn M. J., Afonin D. A., Bogomolova N. N. Geodetic Monitoring of Deformation of Building Surrounding an Underground Construction. *Procedia Engineering*, 2017, Iss. 189, pp. 386–392. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.061.
8. Baydarashvili M. Criteria of Geocoprotection in Construction. *Procedia Engineering*, 2017, Iss. 189, pp. 616–621. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.098.
9. Terekhov L. D., Mayny S. B., Chernikov N. A. Experimental study of soil thawing around shallow sewage pipelines in winter. *Water and Ecology*, 2019, Iss. 24(4), pp. 71–78. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.4.71-78.
10. Titova T., Akhtyamov R., Nasyrova E. et al. Accident at river-crossing underwater oil pipeline. *MATEC Web of Conferences*, 2018, Iss. 239, № 06003. DOI: 10.1051/matecconf/201823906003.

11. Uzdin A. M., Freze M. V., Fedorova M. Y. et al. On the Reliability of Finite-Element Evaluation of the Dynamic Interaction of a Structure with the Base. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2018, Iss. 55(3), pp. 201–208. DOI: 10.1007/s11204-018-9526-0.
12. Ershova S., Orlovskaya T., Panfilova E. Study of Life Quality and Urban Environment Quality in Russian Megapolises. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Iss. 463(4), № 042040. DOI: 10.1088/1757-899X/463/4/042040.
13. Dudkina O. I., Gribkova N. V. On the Strong Law of Large Numbers for Linear Combinations of Concomitants. *Vestnik St. Petersburg University: Mathematics*, 2020, Iss. 53(3), pp. 282–286. DOI: 10.1134/S1063454120030061.
14. Kolos A., Alpysova V., Osipov G. et al. The effect of different additives on the swelling process of heavy clays. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020, Iss. 50, pp. 295–306. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_31.
15. Vvedenskij R. V., Gendler S. G., Titova T. S. Environmental impact of the tunnel construction. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, Iss. 79(3), pp. 140–149. DOI: 10.18720/MCE.79.15.
16. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions Country Profiles. Available at: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions#co2-and-greenhouse-gas-emissions-country-profiles> (accessed: March 8, 2023).

Received: May 28, 2023

Accepted: July 07, 2023

Author's information:

Rasul G. AKHTYAMOV — PhD in Engineering,
Associate Professor; ahtamov_zchs@mail.ru

Elena I. MAKAROVA — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; makarova@mail.ru

Alina A. GAVRILOVA — Senior Lecturer;
A.A.Gavrilova.eco@yandex.ru

УДК 504.064.2

Аккумуляция тяжелых металлов в почвах и фитомассе на урбанизированных территориях

А. А. Гаврилова, Е. И. Макарова, Р. Г. Ахтямов

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

Для цитирования: Гаврилова А. А., Макарова Е. И., Ахтямов Р. Г. Аккумуляция тяжелых металлов в почвах и фитомассе на урбанизированных территориях // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 706–714. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-706-714

Аннотация

Цель: Провести качественную и количественную оценку содержания тяжелых металлов (Fe, Zn, Pb, Cd) в почвах и надземных вегетационных органах растений семейства Маслиновые, а именно Сирень обыкновенная (*Syringa vulgaris*), произрастающих на урбанизированных территориях, на примере центральной части города Санкт-Петербурга. Провести оценку аккумуляции железа, цинка, кадмия и свинца почвенным покровом и фитомассой в зависимости от удаленности улично-дорожной сети, прилегающей к садово-парковым зонам, и интенсивности движения автотранспортного потока по исследуемым автомагистралям. **Методы:** Экспериментальным методом, на основании «Методики определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов», был определен состав и интенсивности движения автотранспортного потока, проходящего по автомагистралям, прилегающим к зонам исследования. В дальнейшем полученные данные были статистически обработаны. На объектах исследования было выделено, на разной удаленности от источника загрязнения, в общей сложности 20 точек отбора проб. На основании принятых «Методических указаний по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства» производились отбор проб и дальнейшая пробоподготовка к исследованию методом пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии. В лаборатории испытательного центра «Экологическая безопасность и охрана труда» ФГБОУ ВО ПГУПС методом пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии был проведен количественный анализ содержания тяжелых металлов (Fe, Zn, Pb, Cd) в отобранных образцах почв и фитомассы. **Результаты:** Определен количественный и качественный состав интенсивности автотранспортного потока, проезжающего в центральной части города Санкт-Петербурга. Определены концентрации тяжелых металлов (Fe, Zn, Cd, Pb) во всех отобранных пробах почв и фитомассе в начале и в конце вегетационного периода, листья кустарников Сирень обыкновенная, произрастающих в центральных районах города Санкт-Петербурга. В большинстве проб выявлены повышенные концентрации тяжелых металлов в надземных вегетационных органах кустарников, отобранных в конце вегетационного периода, в сравнении с отобранными пробами в начале вегетационного периода. **Практическая значимость:** Показано, что аккумуляция тяжелых металлов в растениях и почве в значительной степени зависит от расположения источника загрязнения и его интенсивности. Полученные данные могут быть рекомендованы к практическому использованию.

Ключевые слова: Тяжелый металл, железо, цинк, кадмий, свинец, автомобильная дорога, интенсивность, автотранспортный поток, парковая зона, почва, фитомасса, растительная проба, экологическое состояние, урбанизированная территория.

Введение

Динамичная урбанизация территорий и параллельно с этим интенсивное развитие улично-дорожной сети, увеличение интенсивности движения автотранспортных потоков приводят к распространению и аккумуляции загрязняющих веществ, которые негативно воздействуют на окружающую среду и живые организмы. На образованных антропогенных ландшафтах резко нарушаются естественные экологические системы, а это приводит к ухудшению экологической обстановки на урбанизированных территориях, особенно в центральных частях городов, где уже исторически сложена архитектура и отличительно уплотненный градостроительный план. В данных условиях важную роль играют островки флоры и фауны [1].

Различного вида растительность выполняет продуцирующую роль в урбосистеме. В процессе жизнедеятельности растений происходит поглощение из окружающей среды загрязняющих веществ и выделение жизнеобеспечивающих газов для других живых организмов. Но загрязнение окружающей среды антропогенными агентами приводит к снижению или полному угнетению фотосинтеза и минерального обмена у растений. Между растениями и средами в процессе обмена веществ зеленые насаждения пассивно и активно осуществляют поглощение различных веществ, например тяжелых металлов. В небольшой концентрации растениям для обмена веществ необходимы некоторые тяжелые металлы, при этом переизбыток тяжелых металлов может оказывать воздействие на рост, размер и количество надземных органов растений, а также снижать устойчивость к вредным веществам, что приводит к угнетению и гибели растений [2].

Источниками поступления в окружающую среду вредных веществ на урбанизированных территориях являются: отходы производства и потребления, сбросы сточных вод с производств,

сжигание топлива на различных отраслях промышленности и транспортными средствами [3–8]. В крупных городах в атмосферу поступает порядка 70 % загрязняющих веществ от автотранспорта, и этот показатель может составлять до 95 % от всех выбросов [3]. Основными источниками поступления тяжелых металлов (Fe, Zn, Pb, Cd) в окружающую среду на территории мегаполиса является автотранспорт, механический износ подвижных частей двигателя внутреннего сгорания, покрышек шин и тормозной системы автомобиля, а также их химический износ [9].

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования качественного и количественного содержания тяжелых металлов в почвах садово-парковых зон и растительной массе растений, произрастающих на урбанизированных территориях, были выделены 8 парковых зон в центральных районах Санкт-Петербурга: Никольский сад, сад Дворца Юсуповых, Покровский сквер, Балтийский сад, Лопухинский сад, сад Олимпия, Летний сад. Данные зоны были определены в качестве объектов исследования по следующим критериям: общественная доступность, близость расположения жилых зданий и общественных сооружений, близость к объектам улично-дорожной сети, интенсивность автотранспортного потока на прилегающих дорожных сетях, произрастание кустарников — Сирень обыкновенная.

На основании «Методики определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов» экспериментальным путем был определен состав автотранспортных средств, движущихся по автомагистралям, прилегающим к выбранным садово-парковым зонам, с последующей статистической обработкой полученных данных [10]. Отбор и подготовка проб почв и фитомассы проводились на основании принятых Методических

указаний по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства [11]. Всего было выделено 20 мест пробоотбора, находящихся на разноудаленном расстоянии от улично-дорожной сети [12, 13]. В лаборатории испытательного центра «Экологическая безопасность и охрана труда» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I» проводилась пробоподготовка образцов почвы и фитомассы, отобранных полевым методом, а также количественный и качественный анализ на содержание тяжелых металлов (Fe, Zn, Pb, Cd) в отобранных образцах — методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты, с последующей статистической обработкой, определения натурального состава и количества автотранспортных средств, движущихся по автомагистралям, прилегающим к объектам исследования, а также полученных данных количественного анализа содержания тяжелых металлов, таких как железо, цинк, кадмий и свинец, полученные методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопией, в отобранных пробах почв и растений, были статистически проанализированы и представлены в виде гистограмм с ранжированием удаленности от улично-дорожной сети (рис. 1–4).

Анализ данных аккумуляции железа в почве и фитомассе растений показывает, что концентрация тяжелого металла в большинстве отобранных проб в почве выше, чем ее содержание в вегетационных органах зеленых масс. Это говорит о буферной способности почвы и толерантности растений к данному виду загрязнения. Однако в некоторых пробах выявлено превышение концентрации железа в пробах листьев, отобранных в конце вегетационного периода, в сравнении с показателями аккумуляции данного тяжелого

металла в почве и в пробах листьев, отобранных в начале вегетационного периода. Если сравнивать показатель аккумуляции железа в фитомассе с удаленностью от улично-дорожной сети и интенсивностью движения автотранспортного потока, то прослеживается их косвенная зависимость друг от друга.

Аккумуляция цинка в отобранных пробах почв и фитомассе фактически неизменна, что показывает сохранение толерантности растений к токсическому воздействию цинка. В пробах № 11, 12, 6, 1, 5, 19 выявлено превышение содержания цинка в отобранных пробах листьев в конце вегетационного периода, в сравнении с концентрациями в пробах почв и листьев в начале вегетационного периода. Данные показатели могут говорить о воздействии повышенной интенсивности автотранспортного потока и близости к улично-дорожной сети, а также о циркуляционных процессах переноса загрязняющих веществ от источника загрязнения на более дальние расстояния.

Концентрация кадмия в большинстве проб листьев растений в конце вегетационного периода превышает значения концентраций в пробах почв и листьев в начале вегетационного периода. Полученные данные показывают неустойчивость растений к данному виду загрязнения окружающей среды. В данном случае буферная способность почвы не препятствует аккумуляции тяжелого металла в органы растений, тем самым снижается обменная способность клеточных мембран у листьев.

Повышенная аккумуляция свинца в большинстве случаев выявлена в пробах почв, чем в пробах листьев. В пробах № 16, 17, 20, 13, 18 установлено превышение концентрации свинца в пробах листьев в конце вегетационного периода, в сравнении с концентрациями в пробах почв и листьев в начале вегетационного периода. Большинство точек отбора проб расположено в относительной близости к улично-дорожной сети с

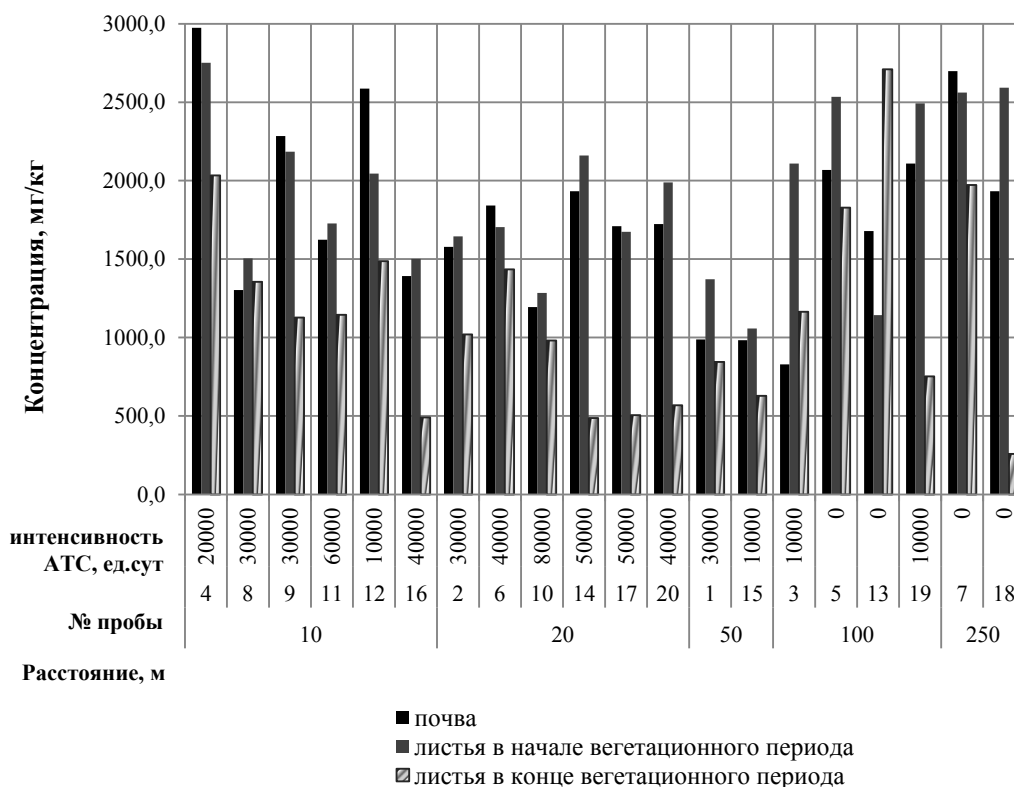


Рис. 1. Концентрация содержания железа в исследуемых пробах

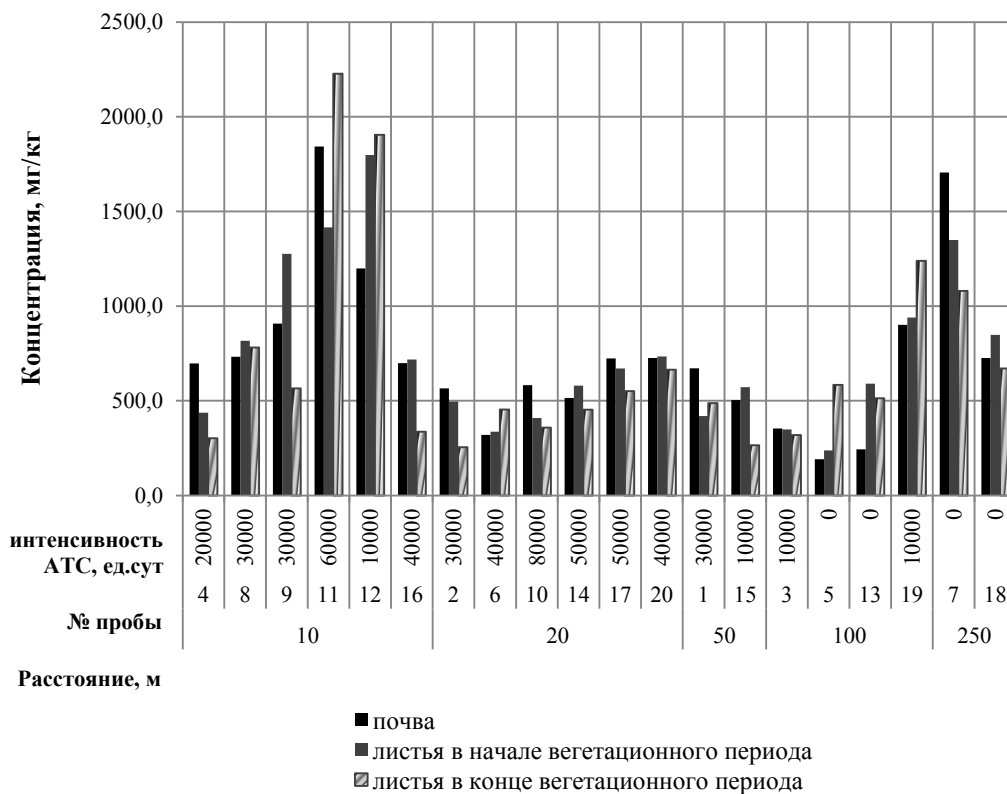


Рис. 2. Концентрация содержания цинка в исследуемых пробах

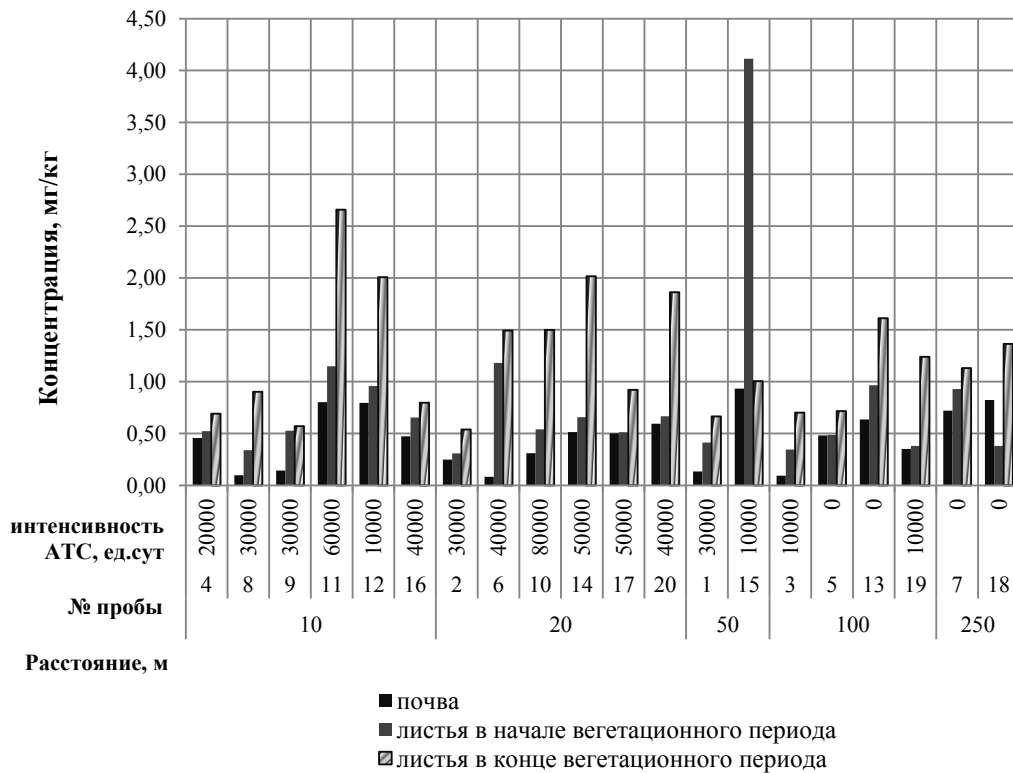


Рис. 3. Концентрация содержания кадмия в исследуемых пробах

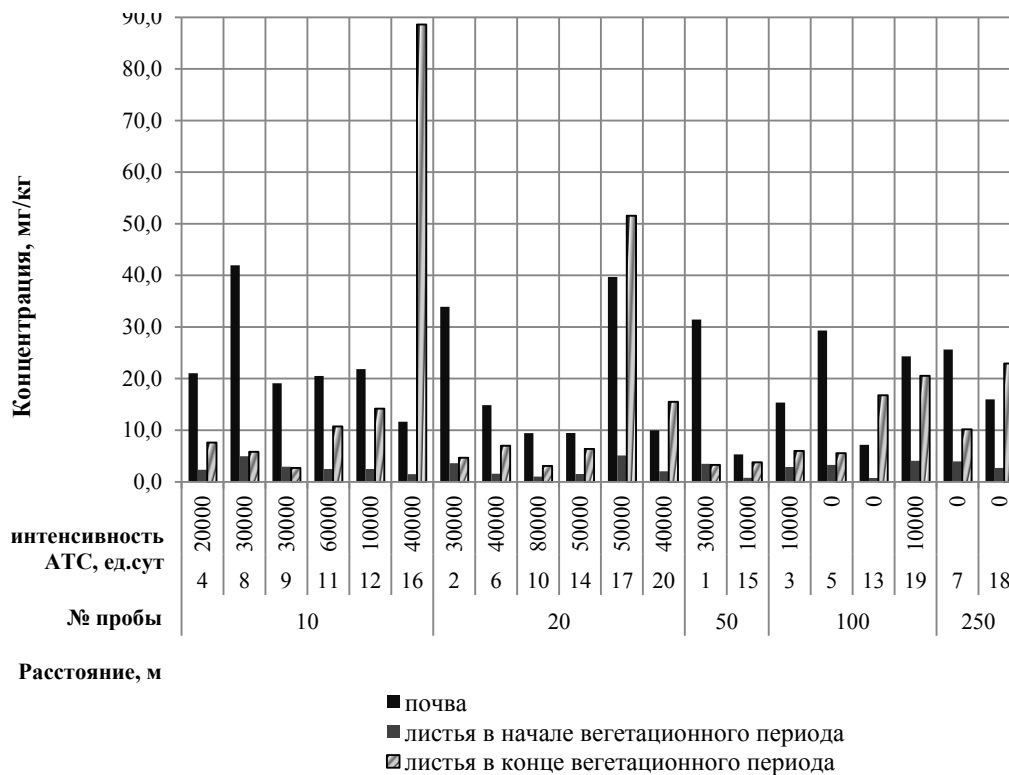


Рис. 4. Концентрация содержания свинца в исследуемых пробах

повышенной интенсивностью автотранспортного потока.

В большинстве случаев повышенное содержание концентраций тяжелых металлов в наземных вегетационных органах растений определено в пробах листьев, отобранных в конце вегетационного периода, в сравнении с пробами листьев, отобранных в начале вегетационного периода. Возможно, данный показатель характеризует аккумуляцию загрязняющих веществ не только из почв, но из атмосферного воздуха.

В результате анализа полученных результатов выявлена косвенная зависимость накопления тяжелых металлов наземными вегетационными органами кустарников, близостью расположения и интенсивностью линейного источника загрязнения окружающей среды. Общий анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что аккумуляция загрязняющих веществ в различных компонентах окружающей среды возрастает с близостью расположения и степенью вредного воздействия источника негативного влияния на окружающую среду.

Выводы

В ходе проведенного исследования был определен количественный и качественный состав интенсивности автотранспортного потока, проезжающего по улично-дорожной сети в центральной части города Санкт-Петербурга. Определены концентрации тяжелых металлов (Fe, Zn, Cd, Pb) во всех отобранных пробах почв и фитомассе в начале и в конце вегетационного периода, листья кустарников Сирень обыкновенная, произрастающих в центральных районах города Санкт-Петербурга. В большинстве проб выявлены повышенные концентрации тяжелых металлов в наземных вегетационных органах кустарников, отобранных в конце вегетационного периода, в сравнении с отобранными пробами в начале вегетационного периода. Аккумуляция железа и

свинца в почве и фитомассе в большинстве отобранных проб в почве выше, чем ее содержание в наземных вегетационных органах кустарниковых растений, отобранных в разный период. Концентрация цинка в отобранных пробах почв и листьях растений фактически одинакова, что показывает сохранение толерантности растений к вредному воздействию цинка. Концентрация кадмия в наземных органах кустарниковых растений значительно выше в конце вегетационного периода, в сравнении с концентрацией данного металла в листьях растений в начале вегетационного периода и содержанием в почвах. Аккумуляция тяжелых металлов в растениях и почве зависит от близости расположения и интенсивности линейного источника загрязнения окружающей среды.

Библиографический список

1. Ватулина Е. Я. Графическое представление результатов исследования экологической нагрузки на урбанизированную территорию при воздействии транспортных потоков / Е. Я. Ватулина, А. В. Леванчук, Л. А. Леванчук и др. // *Науковедение*. — 2016. — Т. 8. — № 2(33). — 100 с.
2. Байсеитова Н. М. Фитотоксичное действие тяжелых металлов при техногенном загрязнении окружающей среды / Н. М. Байсеитова, Х. М. Сартаева // *Молодой ученый*. — 2014. — № 2. — С. 382–384.
3. Копытенкова О. И. Гигиеническая характеристика химического загрязнения окружающей среды в процессе эксплуатации транспортно-дорожного комплекса / О. И. Копытенкова, А. В. Леванчук, И. Р. Мингулова // *Профилактическая и клиническая медицина*. — 2012. — Т. 93. — № 6 — С. 87–92.
4. Леванчук А. В. Загрязнение окружающей среды продуктами эксплуатационного износа автомобильно-дорожного комплекса / А. В. Леванчук // *Гигиена и санитария*. — 2014. — С. 17–21.
5. Рябец В. В. Анализ методов учета загрязнителей атмосферного воздуха автотранспортными средствами / В. В. Рябец // *Безопасность жизнедеятельности*. — 2023. — № 5. — С. 38–42.

6. Копытенкова О. И. Повышение качества оценки комфортности городской среды / О. И. Копытенкова, В. В. Рябец // *Здоровье — основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения.* — 2022. — Т. 17. — № 3. — С. 109–116.

7. Рябец В. В. Создание комфортной городской среды за счет обеспечения техносферной безопасности транспортных систем / В. В. Рябец // *Техносферная и экологическая безопасность на транспорте: материалы VIII Международной научно-практической конференции.* — Санкт-Петербург, 2022. — С. 114–117.

8. Рябец В. В. Методические подходы к оценке качества городской среды / В. В. Рябец, О. И. Копытенкова // *Материалы Международной научно-практической конференции «Здоровья и окружающая среда».* — Минск, 2022. — С. 29–31.

9. Рахманин Ю. А. Гигиеническая оценка атмосферного воздуха в районах с различной степенью развития дорожно-автомобильного комплекса / Ю. А. Рахманин, А. В. Леванчук // *Гигиена и санитария.* — 2016. — Т. 95. — № 12. — С. 1117–1121.

10. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. — М.: ЦИАНО, 1992. — 64 с.

11. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения

атмосферного воздуха. Утверждена приказом Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 27 ноября 2019 г. № 804.

12. Гаврилова А. А., Копытенкова О. И. Андреева Л. А., Фролов А. В. Количественная оценка аккумуляции тяжелых металлов в растениях в зависимости от удаленности автодорог в центре Санкт-Петербурга / А. А. Гаврилова, О. И. Копытенкова, Л. А. Андреева // *Безопасность жизнедеятельности.* — 2018. — № 10(214). — С. 44–47.

13. Копытенкова О. И. Анализ содержания железа в листьях кустарников парковых зон мегаполиса / О. И. Копытенкова, А. А. Гаврилова, А. М. Тинус // *Проблемы обеспечения безопасности (БЕЗОПАСНОСТЬ-2021): материалы III Международной научно-практической конференции: в 2 томах.* Уфа, 2021. — С. 198–203.

Дата поступления: 28.05.2023

Решение о публикации: 08.07.2023

Контактная информация:

ГАВРИЛОВА Алина Анатольевна — ст. преподаватель;
A.A.Gavrilova.eco@yandex.ru

МАКАРОВА Елена Игоревна — д-р техн. наук, доц.;
makarova@mail.ru

АХТЯМОВ Расул Гумерович — канд. техн. наук, доц.;
ahtamov_zchs@mail.ru

Accumulation of Heavy Metals in Soils and Phytomass in Urbanized Areas

A. A. Gavrilova, E. I. Makarova, R. G. Akhtyamov

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

For citation: Gavrilova A. A., Makarova E. I., Akhtyamov R. G. Accumulation of Heavy Metals in Soils and Phytomass in Urbanized Areas // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 706–714. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-706-714

Summary

Purpose: To carry out a qualitative and quantitative assessment of the content of heavy metals (Fe, Zn, Pb, Cd) in soils and aboveground vegetation organs of plants of the Olive family, namely the common lilac (*Syringa vulgaris*) growing in urban areas, using the example of the central part of the city of St. Petersburg. To assess

the accumulation of iron, zinc, cadmium and lead by soil cover and phytomass, depending on the remoteness of the street-traffic network adjacent to garden-park areas, and the traffic intensity along the studied highways.

Methods: The experimental method, based on the “Methodology for determining vehicle emissions for conducting summary calculations of urban air pollution”, has been used to determine the composition and traffic intensity of the traffic flow passing along highways adjacent to the study areas. Subsequently, the obtained data have been statistically processed. A total of 20 sampling points have been identified at the study sites, at different distances from the pollution source. Based on the adopted “Methodological guidelines for determining heavy metals in soils of agricultural lands and crop products”, samples have been taken and further sample preparation has been carried out for research by flame atomic absorption spectrometry. In the laboratory of the testing center “Ecological and Occupational Safety” of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education PGUPS, using the method of flame atomic absorption spectrometry, a quantitative analysis of the content of heavy metals (Fe, Zn, Pb, Cd) in selected soil and phytomass samples has been carried out.

Results: The quantitative and qualitative composition of the intensity of the traffic flow passing through the central part of the city of St. Petersburg has been determined. The concentrations of heavy metals (Fe, Zn, Cd, Pb) have been determined in all selected soil samples and phytomass at the beginning and at the end of the growing season, leaves of common lilac shrubs growing in the central regions of the city of St. Petersburg. In most samples, elevated concentrations of heavy metals have been found in the aboveground vegetation organs of shrubs taken at the end of the growing season, compared with those taken at the beginning of the growing season. **Practical significance:** It is shown that the accumulation of heavy metals in plants and soil largely depends on the location of the pollution source and its intensity. The data obtained can be recommended for practical use.

Keywords: Heavy metal, iron, zinc, cadmium, lead, highway, intensity, traffic flow, park area, soil, phytomass, plant sample, ecological state, urbanized area.

References

1. Vatulina Ye. Ya., Levanchuk A. V., Levanchuk L. A. et al. Graficheskoye predstavleniye rezul'tatov issledovaniya ekologicheskoy nagruzki na urbanizirovannuyu infrastrukturu pri vozdeystvii transportnykh potokov [Graphical presentation of the results of a study of the environmental load on urban infrastructure under the influence of traffic flows]. *Naukovedeniye*. 2016, vol. 8, Iss. 2(33), p. 100. (In Russian)

2. Bayseitova N. M., Sartayeva Kh. M. Fitotoksichnoye deystviye tyazhelykh metallov pri tekhnogennom zagryaznenii okruzhayushchey sredy [Phytotoxic effect of heavy metals in technogenic environmental pollution]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2014, Iss. 2, pp. 382–384. (In Russian)

3. Kopytenkova O. I., Levanchuk A. V., Mingulova I. R. Gigiyenicheskaya kharakteristika khimicheskogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy v protsesse ekspluatatsii transportno-dorozhnogo kompleksa [Hygienic characteristics of chemical pollution of the environment during the operation of the transport and road complex]. *Profilakticheskaya i*

klinicheskaya meditsina [Preventive and Clinical Medicine]. 2012, vol. 93, Iss. 6, pp. 87–92. (In Russian)

4. Levanchuk, A. V. Zagryazneniye okruzhayushchey sredy produktami ekspluatatsionnogo iznosa avtomobil'no-dorozhnogo kompleksa [Pollution of the environment by products of operational wear of the automobile and road complex]. *Gigiyena i sanitariya* [Hygiene and Sanitation]. 2014, vol. 93, Iss. 6, pp. 17–21. (In Russian)

5. Ryabec V. V. Analiz metodov ucheta zagryaznitelej atmosfernogo vozduha avtotransportnymi sredstvami [Analysis of accounting methods for atmospheric air pollutants by vehicles]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety]. 2023, Iss. 5, pp. 38–42. (In Russian)

6. Kopytenkova O. I., Ryabec V. V. Povyshenie kachestva ocenki komfortnosti gorodskoj sredy [Improving the quality of assessing the comfort of the urban environment]. *Zdorov'e — osnova chelovecheskogo potentsiala: problemy i puti ih resheniya* [Health is the basis of human potential: problems and ways to solve them]. 2022, vol. 17, Iss. 3, pp. 109–116. (In Russian)

7. Ryabec V. V. *Sozdanie komfortnoj gorodskoj sredy za schet obespecheniya tekhnosfernoj bezopasnosti transportnyh sistem. Tekhnosfernaya i ekologicheskaya bezopasnost' na transporte: materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Creation of a comfortable urban environment by ensuring the technospheric safety of transport systems. Technospheric and environmental safety in transport: materials of the VIII International scientific and practical conference]. St. Petersburg, 2022, pp. 114–117. (In Russian)

8. Ryabec V. V., Kopytenkova O. I. *Metodicheskie podhody k ocenke kachestva gorodskoj sredy. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Zdorov'ya i okruzhayushchaya sreda"* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Health and the Environment"]. Minsk, 2022, pp. 29–31. (In Russian)

9. Rakhmanin Yu. A., Levanchuk A. V. *Gigiyenicheskaya otsenka atmosfernogo vozdukh v rayonakh s razlichnoy stepen'yu razvitiya dorozhno-avtomobil'nogo kompleksa* [Hygienic assessment of atmospheric air in areas with varying degrees of development of the road and automobile complex]. *Gigiyena i sanitariya* [Hygiene and Sanitation]. 2016, vol. 95, Iss. 12, pp. 1117–1121. (In Russian)

10. *Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu tyazhelykh metallov v pochvakh sel'khozugodiy i produkcii rasteniyevodstva* [Guidelines for the determination of heavy metals in agricultural soils and crop production]. Moscow: TSIANO Publ., 1992, 64 p. (In Russian)

11. *Metodika opredeleniya vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv v atmosfernyj vozduh ot peredvizhnyh istochnikov dlya provedeniya svodnyh raschetov zagryazneniya atmosfernogo vozduha* [Methodology for determining emissions of pollutants into the atmospheric air from mobile

sources for conducting summary calculations of atmospheric air pollution]. Utverzhdena prikazom Ministerstva prirodnyh resursov i ekologii RF ot 27 noyabrya 2019 g. № 804. (In Russian)

12. Gavrilova A. A., Kopytenkova O. I., Andreyeva L. A. et al. *Kolichestvennaya otsenka akkumulyatsii tyazhelykh metallov v rasteniyakh v zavisimosti ot udalennosti avtodorog v tsentre Sankt-Peterburga* [Quantitative assessment of the accumulation of heavy metals in plants depending on the remoteness of roads in the center of St. Petersburg]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety]. 2018, Iss. 10(214), pp. 44–47. (In Russian)

13. Kopytenkova O. I., Gavrilova A. A., Tinus A. M. *Analiz sodержaniya zheleza v list'yakh kustarnikov parkovykh zon megapolisa. Problemy obespecheniya bezopasnosti (BEZOPASNOST'-2021): materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 2 tomakh* [Analysis of the iron content in the leaves of shrubs in park areas of the metropolis. Problems of ensuring security (SAFETY-2021): materials of the III International scientific-practical conference: in 2 volumes]. Ufa, 2021, pp. 198–203. (In Russian)

Received: May 28, 2023

Accepted: July 08, 2023

Author's information:

Alina A. GAVRILOVA — Senior Lecturer;

A.A.Gavrilova.eco@yandex.ru

Elena I. MAKAROVA — Dr. Sci. in Engineering, Professor; makarova@mail.ru

Rasul G. AKHTYAMOV — PhD in Engineering, Associate Professor; ahtamov_zchs@mail.ru

УДК 504.054

Особенности загрязнения почвы на территории аэропорта, выявленные по результатам инженерно-экологических изысканий

О. К. Суворова, В. Я. Соловьева, М. С. Абу-Хасан, А. В. Харламова

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

Для цитирования: Суворова О. К., Соловьева В. Я., Абу-Хасан М. С., Харламова А. В. Особенности загрязнения почвы на территории аэропорта, выявленные по результатам инженерно-экологических изысканий // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 715–720. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-715-720

Аннотация

Цель: Изучение специфики загрязнения почвы по результатам проведенных инженерно-экологических изысканий, выполненных в ходе реконструкции аэропорта. Выявление наличия токсикантов в почвогрунтах в ходе натурных исследований на территории аэропорта по результатам исследований проб на химические, бактериологические, паразитологические и токсикологические показатели. Оценка соответствия качества почвогрунта требованиям СанПиН 1.2.3685—21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». **Методы:** Определение концентраций загрязняющих веществ проводилось послойно на глубинах 0,0–0,2 м; 0,2–1,0 м; 1,0–2,0; 2,0–3,0; 3,0–4,0; 4,0–5,0; 5,0–6,0; 6,0–7,0; 7,0–8,0 м. В отобранных пробах почвы определялось: содержание тяжелых металлов (свинец, кадмий, цинк, медь, никель, ртуть, мышьяк, значение pH; содержание органических токсикантов (полиароматические углеводороды (бенз(а)пирен); нефтепродукты); токсикологические показатели почвогрунтов участка на всю глубину (сводная проба) (0,0–2,0 м) (2 тест-объекта: *Escherichia coli* и *Paramecium caudatum*) **Результаты:** Выявлены несоответствия гигиеническим требованиям к содержанию в почвогрунтах следующих химических веществ: цинка, меди, кадмия, свинца и никеля, нефтепродуктов. В основном опасная категория почвы наблюдалась в поверхностном слое почвогрунта (0,0–0,2 м) и на глубине 0,2–1,0 м, однако также было выявлено сверхнормативное загрязнение почвы свинцом на глубинах 2,0–3,0 м и 4,0–5,0 м и сверхнормативное загрязнение почвы никелем наблюдалось на всех горизонтах до глубины 8,0 м. По микробиологическим и паразитологическим показателям все пробы относятся к категории «чистая». **Практическая значимость:** Проведен анализ уровня загрязнения почвогрунтов на территории аэропорта в Тюменской области. Исследованы концентрации экотоксикантов в почве, проанализированы возможные причины превышения допустимого содержания загрязняющих веществ. По результатам анализа возможных причин превышения допустимого содержания загрязняющих веществ в почвогрунте установлена необходимость проведения мероприятий по защите почвогрунта от дальнейшего поступления загрязняющих веществ.

Ключевые слова: Инженерно-экологические изыскания, тяжелые металлы, экотоксиканты, концентрация, предельно-допустимая концентрация, окружающая природная среда.

В 2018 году в рамках реализации федерального проекта «Развитие региональных аэропортов и маршрутов» АО «ПИИНИИ ВТ «Ленаэропроект» были выполнены инженерно-экологические изыскания (ИЭИ) для аэропорта на территории Тюменской области [1].

В соответствии с СП 11-102—97 «инженерно-экологические изыскания для строительства выполняются для оценки современного состояния и прогноза возможных изменений окружающей природной среды под влиянием антропогенной нагрузки с целью предотвращения, минимизации или ликвидации вредных и нежелательных экологических и связанных с ними социальных, экономических и других последствий и сохранения оптимальных условий жизни населения» [2].

В ходе реконструкции аэропортов предусматривалось строительство ангарного комплекса для технического обслуживания воздушных судов.

В составе инженерно-экологических исследований были проведены исследования уровня загрязнения почвогрунтов по следующим показателям:

1. Обследование почвогрунтов поверхности участка (0,0–0,2 м; 0,2–1,0 м; 1,0–2,0; 2,0–3,0; 3,0–4,0; 4,0–5,0; 5,0–6,0; 6,0–7,0; 7,0–8,0 м) для определения величин концентраций следующих экотоксикантов [3–5]:

- тяжелые металлы (свинец, кадмий, цинк, медь, никель, ртуть), мышьяк, рН;
- органические токсиканты (полиароматические углеводороды (бенз(а)пирен); нефтепродукты);
- токсикологическое обследование грунтов участка на всю глубину (сводная проба) (0,0–2,0 м) (2 тест-объекта).

2. Обследование поверхностного слоя грунтов участка на бактериологические и паразитологические показатели:

- индекс БГКП;

- индекс энтерококков;
- патогенная кишечная флора, в том числе сальмонеллы, яйца, личинки гельминтов, цисты кишечных простейших, патогенных для человека.

Оценка степени химического загрязнения почвы при загрязнении почвы веществами неорганической природы проводилась с учетом класса опасности, ПДК и максимального значения допустимого уровня содержания элемента (K_{max}) по одному из четырех показателей вредности в соответствии с табл. 4.5 СанПиН 1.2.2386—21 [6].

Оценка уровня загрязнения почвы нефтепродуктами проводилась в соответствии с «Порядком определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами (утв. Роскомземом 10 ноября 1993 г. и Минприроды РФ 18 ноября 1993 г)»:

- < 1000 мг/кг — допустимый уровень загрязнения;
- 1000–2000 мг/кг — низкий уровень загрязнения;
- 2000–3000 мг/кг — средний уровень загрязнения;
- 3000–5000 мг/кг — высокий уровень загрязнения;
- > 5000 мг/кг — очень высокий уровень загрязнения.

Фоновые концентрации загрязняющих веществ в почве приняты согласно табл. 4.1 СП 11-102—97 [2].

По результатам проведенных исследований установлено, что Z_c (суммарный показатель химического загрязнения почвы) в пробах изменяется от 3 до 107, а категория загрязнения изменяется от допустимой до опасной.

В пробах почвы с категорией загрязнения «Опасная» обнаружены повышенные концентрации цинка, меди, кадмия, свинца и никеля. Превышения гигиенических нормативов по содержанию в почвогрунтах тяжелых металлов выявлены: по цинку, меди, кадмию, свинцу и никелю в точке

ТАБЛИЦА 1. Содержание загрязняющих веществ в пробах почвогрунта на территории аэропорта в Тюменской области

Точка отбора проб	Глубина отбора, м	рН, ед. рН	Содержание в пробе С _i / ПДК								Содержание в пробе, мг	Z _c	Категория загрязнения
			Hg	Zn	Cu	Cd	Pb	Ni	As	БП			
T001	0–0,2	8	0,01	1,11	8,33	4,20	3,81	3,51	—	5,00	938	107	Опасная
T001	0,2–1,0	7,4	0,01	0,77	0,90	0,26	3,13	1,69	—	—	130	26	Опасная
T001	1,0–2,0	7,7	0,01	0,30	0,55	—	—	0,70	—	—	59	4	Допустимая
T001	2,0–3,0	7,6	0,01	0,67	0,74	—	—	1,28	—	—	<50	7	Допустимая
T002	0–0,2	7,7	0,01	0,81	0,88	0,70	0,03	1,25	—	0,50	161	13	Опасная
T002	0,2–1,0	7,3	0,01	0,69	0,85	0,52	—	1,41	—	0,95	126	12	Допустимая
T002	1,0–2,0	7,2	0,01	0,41	0,61	—	—	0,82	—	—	82	4	Допустимая
T002	2,0–3,0	8,1	0,01	0,74	0,75	—	—	1,07	—	0,35	<50	6	Допустимая
T003	0–0,2	8,2	0,01	0,12	0,92	—	—	14,40	—	0,95	5644	51	Опасная
T003	0,2–1,0	7,9	0,01	0,58	0,84	0,54	—	1,13	—	—	1281	11	Опасная
T003	1,0–2,0	7,6	0,01	0,51	0,75	0,46	—	0,99	—	—	1173	9	Опасная
T003	2,0–3,0	8	0,01	0,49	0,68	—	0,12	0,94	—	—	84	5	Допустимая
T004	0–0,2	6,9	0,01	0,61	1,08	0,38	—	1,23	—	—	132	11	Опасная
T004	0,2–1,0	6,39	0,01	0,65	0,81	0,42	—	1,45	—	—	128	11	Опасная
T004	1,0–2,0	8,4	0,01	0,37	0,65	0,72	—	0,89	—	—	<50	11	Допустимая
T004	2,0–3,0	7,6	0,01	0,59	0,67	—	4,34	0,94	—	—	<50	27	Опасная
T004	3,0–4,0	7,8	0,01	0,34	0,26	0,18	0,13	0,69	—	—	<50	3	Допустимая
T004	4,0–5,0	7,7	0,01	0,34	0,23	0,22	3,66	0,66	—	—	<50	22	Опасная
T005	0–0,2	8	0,01	0,86	0,60	0,52	2,91	1,87	—	—	786	27	Опасная
T005	0,2–1,0	7,6	0,01	0,73	0,87	—	—	1,55	—	—	116	8	Опасная
T005	1,0–2,0	7,8	0,01	0,28	0,56	—	—	0,67	—	—	<50	4	Допустимая
T005	2,0–3,0	7,7	0,01	0,62	0,73	—	—	1,30	—	0,35	<50	7	Опасная
T005	3,0–4,0	7,7	0,01	0,61	0,74	—	—	1,28	—	—	<50	7	Опасная
T005	4,0–5,0	7,8	0,01	0,63	0,75	—	—	1,22	—	—	<50	6	Опасная
T005	5,0–6,0	7,8	0,01	0,61	0,75	—	—	1,28	—	—	<50	7	Опасная
T005	6,0–7,0	7,6	0,01	0,61	0,76	—	0,10	1,25	—	—	<50	6	Опасная
T006	0–0,2	7,7	0,01	0,77	0,85	0,26	0,09	1,22	—	0,55	173	9	Опасная
T006	0,2–1,0	7,3	0,01	0,66	0,86	—	0,29	1,48	—	0,90	138	8	Опасная
T006	1,0–2,0	7,3	0,01	0,66	0,61	—	—	0,95	—	—	90	5	Допустимая
T006	2,0–3,0	8	0,01	0,66	0,74	—	—	1,07	—	—	<50	6	Опасная
T006	3,0–4,0	8,1	0,01	0,67	0,60	0,48	—	1,29	—	—	<50	10	Опасная
T006	4,0–5,0	8	0,01	0,65	0,36	0,24	—	1,13	—	—	<50	6	Опасная
T006	5,0–6,0	7,9	0,01	0,66	0,42	0,20	—	1,20	—	—	<50	6	Опасная
T006	6,0–7,0	8	0,01	0,66	0,38	0,48	—	1,31	—	—	<50	9	Допустимая
T006	7,0–8,0	8,0	0,01	0,65	0,37	0,44	—	1,24	—	—	<50	8	Допустимая
T007	0–0,2	7,0	0,01	0,56	0,38	0,22	0,29	1,24	—	—	156	7	Опасная
T007	0,2–1,0	6,9	0,01	0,61	0,84	—	—	1,47	—	—	138	8	Допустимая
T007	1,0–2,0	8,0	0,01	0,34	0,68	—	—	0,93	—	—	<50	5	Допустимая
T007	2,0–3,0	7,7	0,01	0,51	0,72	—	—	0,99	—	—	<50	5	Допустимая
T007	3,0–4,0	7,8	0,01	0,49	0,70	—	—	0,99	—	—	<50	5	Допустимая
T007	4,0–5,0	8,0	0,01	0,48	0,68	—	—	1,02	—	—	<50	5	Опасная
T007	5,0–6,0	7,9	0,01	0,46	0,69	—	—	1,00	—	—	<50	5	Опасная

ТАБЛИЦА 2. Величины ПДК (ОДК) загрязняющих веществ и фоновые значения концентраций тяжелых металлов в почве

	Hg	Zn	Cu	Cd	Pb	Ni	As	БП	НП
Значение ПДК (ОДК), мг/кг ¹):		55	33	0,50	32	20	2	0,02	1000
Фоновое значение, мг/кг ²):	0,05	28	8	0,05	6	6	1,5	—	—

отбора проб № 1; в точках отбора проб № 2, 6, 7 превышения ПДК выявлены только по никелю; в точке отбора проб № 3 выявлены превышения никеля и нефтепродуктов (максимальное значение составило 5644 мг/кг, что характеризуется очень высоким уровнем загрязнения почвы); в точках № 4, 5 выявлены превышения ПДК по меди, никелю и свинцу.

В основном опасная категория почвы наблюдалась в поверхностном слое почвогрунта (0,0–0,2 м) и на глубине 0,2–1,0 м, однако в точке отбора проб № 4 выявлено сверхнормативное загрязнение почвы свинцом на глубинах 2,0–3,0 м и 4,0–5,0 м, а сверхнормативное загрязнение почвы никелем наблюдалось в точке отбора проб № 5 на всех горизонтах до глубины 7,0 м; в точке отбора проб № 6 на всех горизонтах до глубины 8,0 м; в точке отбора проб № 7 на глубинах 4,0–5,0 м; 5,0–6,0 м.

Превышение допустимого содержания нефтепродуктов выявлено в основном в поверхностном слое почвы, в точке отбора пробы № 3 на всех горизонтах до глубины 3,0 м.

По результатам лабораторных исследований в пробах грунтов полихлорированные бифенилы не выявлены.

Все исследованные пробы почвы относятся к категории «чистая», согласно СанПиН 2.1.7.1287—03 по микробиологическим показателям («Индекс БГКП», «Индекс энтерококков» и «Патогенные бактерии, в том числе сальмонеллы») и по паразитологическим показателям («яйца и личинки гельминтов» и «цисты кишечных патогенных простейших»).

Биотестирование 10 послонных проб грунтов было проведено с применением двух тест-объектов: *Escherichia coli* и *Paramecium caudatum*.

Протестированные пробы являются нетоксичными без разбавления.

Можно предположить, что полученные результаты исследований свидетельствуют о выявленных локальных антропогенных загрязнениях почвы, в том числе как нефтепродуктами, так и тяжелыми металлами, и являются следствием профессиональной деятельности, осуществляемой на территории аэропорта [7].

Выявленные локальные превышения содержания нефтепродуктов и тяжелых металлов в почве могут быть связаны с поступлением загрязняющих веществ при эксплуатации самолетов, в том числе при заправке топливом воздушных судов, при взлете и посадке могут возникать проливы нефтепродуктов. Нефтепродукты и тяжелые металлы, содержащиеся в присадках к топливу, также могут попадать в почву с поверхностными сточными водами с территории взлетной полосы.

Библиографический список

1. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02—96.
2. СП 11-102—97. Инженерно-экологические изыскания для строительства.
3. ПНД Ф 16.1:2:2.2:2.3:3.39—2003 ПНД Ф 16.1:2:2.2:2.3:3.39—2003. Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовой доли бенз(а)пирена в пробах почв, грунтов, твердых отходов, донных отложений, осадках сточных вод методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с флуоресцентным детектированием с использованием жидкостного хроматографа «Люмахром».
4. М-МВИ-80-2008 М-МВИ-80—2008. Методика выполнения измерений массовой доли элементов в про-

бах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии.

5. ПНД Ф 16.1:2:2—1998. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органоминеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии.

6. СанПиН 1.2.2386—21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

7. Фисунова Е. С. Особенности проведения инженерно-экологических изысканий на складах горюче-смазочных материалов аэродромов / Е. С. Фисунова // Материалы докладов Общероссийской научно-практической конференции «Инженерно-экологические изыскания —

нормативно-правовая база, современные методы и оборудование», 14–15 сентября 2020 г.

Дата поступления: 28.05.2023

Решение о публикации: 23.07.2023

Контактная информация:

СУВОРОВА Ольга Константиновна — канд. физ.-мат. наук, доц.; suolko@gmail.com

СОЛОВЬЕВА Валентина Яковлевна — д-р техн. наук, проф.

АБУ-ХАСАН Махмуд Самиевич — д-р техн. наук, проф.; pgups1967@mail.ru

ХАРЛАМОВА Алина Вадимовна — канд. техн. наук, доц.; alavina@yandex.ru

Features of Soil Contamination on the Airport Territory Revealed Through Engineering and Environmental Survey

O. K. Suvorova, V. Ya. Solovieva, M. S. Abu-Khasan, A. V. Kharlamova

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

For citation: Suvorova O. K., Solovieva V. Ya., Abu-Khasan M. S., Kharlamova A. V. Features of Soil Contamination on the Airport Territory Revealed Through Engineering and Environmental Survey // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 715–720. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-715-720

Summary

Purpose: To study soil contamination specifics based on the results of engineering and environmental surveys conducted during the airport reconstruction. Detection of toxicants in soil samples during field research on the airport grounds based on the analysis of chemical, bacteriological, parasitological, and toxicological parameters of the samples. The assessment of soil quality compliance with the requirements of sanitary rules and norms 'Hygienic Standards and Requirements for Ensuring the Safety and (or) Harmlessness of Environmental Factors for Human Habitation' (SanPiN 1.2.3685—21). **Methods:** Determination of concentrations of pollutants has been carried out in layers at depths of 0.0–0.2 m; 0.2–1.0 m; 1.0–2.0; 2.0–3.0; 3.0–4.0; 4.0–5.0; 5.0–6.0; 6.0–7.0; 7.0–8.0 m. The soil samples have been analyzed for the following parameters: heavy metal content (lead, cadmium, zinc, copper, nickel, mercury, arsenic); pH value; content of organic toxicants (polycyclic aromatic hydrocarbons (benzo[a]pyrene); petroleum products); toxicological indicators of the soil throughout the depth (composite sample) (0.0–2.0 meters) (2 test objects: *Escherichia coli* and *Paramecium caudatum*). **Results:** Discrepancies with hygiene requirements for the content of the following chemical substances in soil have been identified: zinc, copper, cadmium, lead, nickel, and petroleum products. The dangerous category of soil has been mostly observed in the surface layer of soil (0.0–0.2 m) and at a depth of 0.2–1.0 m, however, excess soil contamination has also been detected at depths of 2.0–3.0 m and 4.0–5.0 m, and excess soil contamination with nickel has been observed at all horizons up to a depth of 8.0 m. Based on microbiological and parasitological

indicators, all samples are classified as “clean”. **Practical significance:** An analysis of soil contamination levels has been conducted on the territory of the airport in the Tyumen region. Concentrations of ecotoxicants in the soil have been examined, and possible reasons for exceeding the permissible levels of pollutants have been analyzed. Based on the results of the analysis of possible reasons for exceeding the permissible content of pollutants in the soil, the need for measures to protect the soil from further pollutants has been established.

Keywords: Engineering and environmental surveys, heavy metals, ecotoxicants, concentration, maximum permissible concentration, natural environment.

References

1. SP 47.13330.2016. *Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 11-02—96* [SP 47.13330.2016. Engineering surveys for construction. The main provisions. Updated version of SNiP 11-02—96]. (In Russian)
2. SP 11-102—97. *Inzhenerno-ekologicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva* [SP 11-102—97. Engineering and environmental surveys for construction]. (In Russian)
3. PND F 16.1:2:2.2:2.3:3.39—2003 PND F 16.1:2:2.2:2.3:3.39—2003. *Kolichestvennyy khimicheskiy analiz pochv. Metodika izmereniy massovoy doli benz(a)pirena v probakh pochv, gruntov, tverdykh otkhodov, donnykh otlozheniy, osadkakh stochnykh vod metodom vysokoeffektivnoy zhidkostnoy khromatografii s fluorestantsnym detektirovaniem s ispol'zovaniem zhidkostnogo khromatografa “Lyumakhhrom”* [MON F 16.1:2:2.2:2.3:3.39—2003 MON F 16.1:2:2.2:2.3:3.39—2003 Quantitative chemical analysis of soils. Method of measuring the mass fraction of benz(a) pyrene in soil samples, soils, solid waste, bottom sediments, sewage sludge by high-performance liquid chromatography with fluorescent detection using a liquid chromatograph “Lumachrom”]. (In Russian)
4. M-MVI-80-2008 M-MVI-80—2008. *Metodika vypolneniya izmereniy massovoy doli elementov v probakh pochv, gruntov i donnykh otlozheniyakh metodami atomno-emissionnoy i atomno-absorbtsionnoy spektrometrii* [M-MVI-80-2008 M-MVI-80—2008. Methods of measuring the mass fraction of elements in soil samples, soils and bottom sediments by atomic emission and atomic absorption spectrometry]. (In Russian)
5. PND F 16.1:2:2—1998. *Kolichestvennyy khimicheskiy analiz pochv. Metodika vypolneniya izmereniy massovoy doli nefteproduktov v mineral'nykh, organogennykh, organomineral'nykh pochvakh i donnykh otlozheniyakh metodom IK-spektrometrii* [HDPE F 16.1:2:2—1998. Quantitative chemical analysis of soils. Methodology for measuring the mass fraction of petroleum products in mineral, organogenic, organomineral soils and bottom sediments by IR spectrometry]. (In Russian)
6. SanPiN 1.2.2386—21. *Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov srede obitaniya* [SanPIN 1.2.2386—21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. (In Russian)
7. Fisunova E. S. *Osobennosti provedeniya inzhenerno-ekologicheskikh izyskaniy na skladakh goryucheshmazochnykh materialov aerodromov* [Features of carrying out engineering and environmental surveys at the warehouses of fuel and lubricants of airfields]. *Materialy dokladov Obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Inzhenerno-ekologicheskie izyskaniya — normativno-pravovaya baza, sovremennye metody i oborudovanie”* [Materials of reports of the All-Russian Scientific and Practical Conference “Engineering and Environmental surveys — regulatory framework, modern methods and equipment”, September 14–15, 2020]. (In Russian)

Received: May 28, 2023

Accepted: July 23, 2023

Author's information:

Olga K. SUVOROVA — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor; suolko@gmail.com

Valentina Ya. SOLOVIEVA — Dr. Sci. in Engineering, Professor

Makhmud S. ABU-KHASAN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; pgups1967@mail.ru

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

УДК 504.064

Экологические аспекты при утилизации отработанных охлаждающих жидкостей

А. Л. Харитоненко, В. Я. Соловьева

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

Для цитирования: Харитоненко А. Л., Соловьева В. Я. Экологические аспекты при утилизации отработанных охлаждающих жидкостей // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 721–730. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-721-730

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос о состоянии проблемы сбора, утилизации и воздействия отработанных охлаждающих жидкостей на окружающую природную среду в первую очередь от автомобильного транспорта. Показать необходимость вторичной переработки выработавших свой ресурс охлаждающих жидкостей, поиска новых составов охлаждающих жидкостей и интенсификации приема отработанных антифризов у населения. **Методы:** Сравнение характеристик основных охлаждающих жидкостей между собой с приведением их преимуществ и недостатков на этапе снижения эффективности действия. Анализ типов загрязнений, накапливающихся в отработанных антифризах. Сравнение достоинств и недостатков характерных способов очистки отработанных охлаждающих жидкостей. Анализ роста источников антропогенного воздействия в рассматриваемой области. **Результаты:** Установлены наиболее важные характеристики охлаждающих жидкостей, а также наиболее характерные типы загрязнений, содержащихся в антифризах, и приведены наиболее подходящие способы их регенерации. Отмечена высокая актуальность рассматриваемой проблемы обращения отработанных антифризов в результате бурного роста автомобилизации населения при отсутствии должного контроля со стороны государства. Выявлена необходимость поиска новых безопасных антифризов при сохранении целевых качеств охлаждающих жидкостей. **Практическая значимость:** Показана необходимость пересмотра отношения к антифризам в части оценки их опасности для окружающей природной среды. Намечены пути совершенствования обращения с растворами отработанных охлаждающих жидкостей в части интенсификации сбора их у предприятий и населения. Также отмечена необходимость работы по поиску новых растворов охлаждающих жидкостей с меньшим содержанием вредных веществ в них для защиты человека и окружающей природной среды.

Ключевые слова: Охлаждающие жидкости, окружающая среда, тосол, антифриз, этиленгликоль, класс опасности, утилизация.

Во всех транспортных средствах, а также стационарных двигателях используются охлаждающие жидкости. Наиболее широко используемыми антифризами во всем мире являются охлаждающие жидкости зеленого цвета. Они содержат силикатные и фосфатные присадки, которые защищают чугунные, алюминиевые,

латунные и медные детали машин и агрегатов. В нашей стране был разработан свой вид охлаждающей жидкости — ТОСОЛ, что расшифровывается как технология органического синтеза. Основой такой жидкости являются этиленгликоль и дистиллированная вода. В качестве основного действующего вещества могут

выступать и другие органические кислоты, и спирты.

Охлаждающую жидкость можно определить как жидкость, которая предотвращает перегрев агрегата, протекая через его каналы и собирая при этом избытки тепла, которые он выделяет. Отобранное тепло будет передано другому устройству — радиатору, которое он будет использовать для отопления или, наоборот, — для охлаждения, рассеивая его. Идеальной охлаждающей жидкостью будет та, у которой высокая теплоемкость при низкой стоимости и вязкости, а также химическая инертность, благодаря которой не будет развиваться коррозия всей системы охлаждения. Кроме того, необходимо помнить о том, что жидкости, используемые в качестве охлаждающих, не должны замерзать при отрицательной температуре окружающего воздуха. Для этого любая охлаждающая жидкость, используемая в искомых целях, обычно смешивается с жидкостью, обладающей высокой температурой кипения. Полученная смешанная жидкость может действовать как полноценный антифриз даже при экстремально низких температурах [1], при этом решая проблему перегрева и в жарком климате. Охлаждающая жидкость с высокой температурой кипения может охлаждаться быстрее по мере того, как двигатель или другое устройство нагревается. Во время работы двигателя внутреннего сгорания около одной трети производимой тепловой энергии рассматривается как избыточное тепло, которое может привести к выходу его из строя, поэтому оно должно попасть в систему охлаждения. Кроме того, нужно отметить, что обычные жидкости не в состоянии в полной мере удовлетворить растущие требования по охлаждению высоконагруженных агрегатов, особенно автомобильных двигателей, поэтому важно вести работы по поиску современных жидкостей, улучшающих охлаждение двигателей.

Вследствие решения прикладной задачи возникают трудности экологического характера. Со временем, в зависимости от интенсивности и характера использования охлаждающей жидкости, она теряет свои потребительские свойства и не может быть использована для дальнейшего применения. За этим следует замена отработанной жидкости на новую, а вопрос — что делать со старой — повисает в воздухе.

Для охлаждения двигателей внутреннего сгорания используются в основном вода и органические спирты. Рассмотрим основные из них.

Вода — очень удобное вещество, которое можно использовать в качестве охлаждающей жидкости для двигателей и радиаторов. Такая охлаждающая жидкость дешева, обладает хорошими теплопередающими свойствами, находится в открытом доступе. Она обладает высокой удельной теплоемкостью, что позволяет ей быть теплоносителем, который легко перемещается между всеми деталями двигателя и радиатора, вне зависимости от того, из каких материалов эти агрегаты сделаны. Это позволяет воде избегать любых тепловых перегрузок, возникающих в результате чрезмерной температуры некоторых деталей. Вода классифицируется как идеальный хладагент из-за ее способности эффективно поглощать и выделять тепло. Кроме того, вода — это жидкость с низкой вязкостью, которая может легко течь. Таким образом, эти характеристики позволяют широко использовать воду в качестве охлаждающей жидкости радиатора. Главный недостаток воды при этом — очень низкая температура кипения — 100 °С. Поскольку температура в двигателе и радиаторе может превышать 100 °С, это может привести к испарению воды. Потеря охлаждающей жидкости может привести к образованию газовых карманов или пустот в водяных рубашках, которые могут вызвать локализованные горячие точки и деформацию деталей. Воду нельзя использовать в качестве охлаждающей

жидкости для двигателей в регионах, где температура зимой опускается ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, так как она в конечном итоге замерзнет, что приведет к серьезному повреждению деталей двигателя. В нашей стране, ввиду дефицита патентованных антифризов, вода, очищенная от примесей, — дистиллированная вода, еще долго использовалась в качестве охлаждающей, поэтому на зимний период года ее просто сливали, когда предполагался длительный перерыв в работе автомобиля или иного агрегата. Если же автомобиль необходимо было эксплуатировать и зимой, то для возобновления его работы теплая вода заливалась в радиатор вновь, что при отрицательных температурах в том числе положительно сказывалось на запуске двигателя, важным оставалось только не переохладить машину, чтобы вода не замерзла, поэтому широкое применение получали различные одеяла и утеплители. Слив такой жидкости не представлял вреда для окружающей среды, но доставлял хлопоты владельцу.

В целях сохранения эффективности, доступности и дешевизны, при обеспечении условия по использованию охлаждающих жидкостей в зимний период года с середины прошлого века стал все шире использоваться этиленгликоль [2] — органическое соединение этандиол-1,2 (рис. 1 [3]). Этиленгликоль сейчас уже широко используется в качестве автомобильного антифриза. В чистом виде он не имеет цвета и запаха, является умеренно опасным веществом, но при этом его попадание в желудок может привести к летальному исходу, что связано с его высокими токсичными свойствами. Этиленгликоль продается как антифриз, и его можно использовать как в летний, так и в зимний период года, так как его температура кипения составляет $197,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2]. Поэтому основным недостатком охлаждающих жидкостей на основе этиленгликоля является их токсичность для людей, животных и окружающей среды [4].

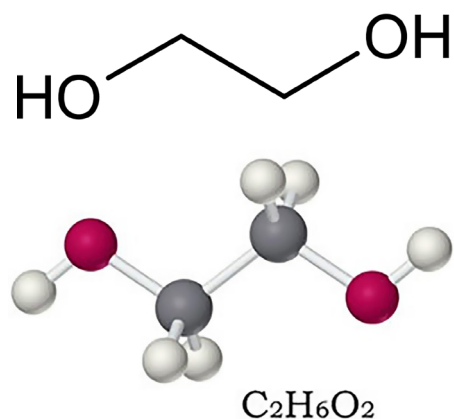


Рис. 1. Строение этиленгликоля

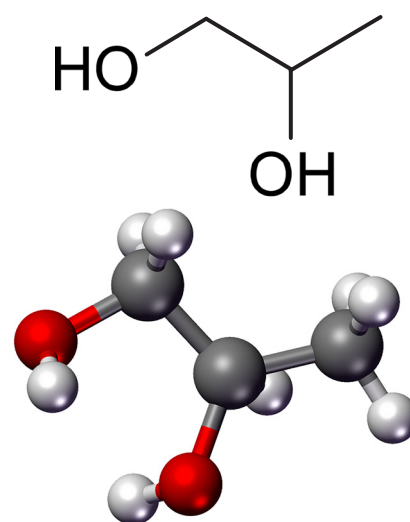


Рис. 2. Строение пропиленгликоля

Пропиленгликоль, или пропандиол-1,2 (рис. 2 [5]), является уже значительно менее токсичным веществом по сравнению с этиленгликолем. Пропиленгликоль используется в качестве антифриза там, где использование этиленгликоля было бы нецелесообразно. Любое воздействие тепла и воздуха приводит к его окислению, поэтому в автомобильной отрасли и двигателях внутреннего сгорания он мало используется. Его сфера применения — это в первую очередь системы отопления, вентиляции, кондиционирования жилых домов и общественных зданий, а также теплообменное оборудование, работающее в диапазоне температур от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+108\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6].

Параметры охлаждающих жидкостей

№ п/п	Параметры	Вода	Этиленгликоль	Пропиленгликоль
1	Температура кипения, °С	100	197	187
2	Удельная масса при 20 °С, г/см ³	1	1,1153	1,0383
3	Удельная теплоемкость, кал/(г · °С)	0,998	0,574	0,6
4	Вязкость при 20 °С, сСт	1	20,9	60,5
5	Температура замерзания, °С: – чистого раствора; – 50%-ный водный раствор	0	–13,3	
		—	–36,6	–33
6	Давление паров при 20 °С, мм рт. ст.	17,5	0,12	0,18
7	Температура вспышки, °С	—	115,6	107,2
8	Токсичность LD50 (крысы), г/кг	—	1,5	21

Судя по составу и информации от производителей отечественных охлаждающих жидкостей, в некоторых тосолах и антифризах содержится метанол, но его процентное соотношение обычно не превышает 10 % от общего состава. Метанол — яд, воздействующий в первую очередь на центральную нервную и сердечно-сосудистую системы, обладающий кумуляцией. Полулетальная доза, или доза вещества, вызывающая гибель половины членов испытываемой группы (далее — LD50), для крыс составляет 5,628 мг/кг, а 30 мл для человека могут вызвать смертельный исход, поэтому важно, чтобы содержание действительно токсичных жидкостей в охлаждающих жидкостях сводилось к минимуму.

Основные характеристики рассматриваемых веществ, используемых для охлаждения, представлены в таблице.

Все вышеперечисленное верно для исходных продуктов, больший же интерес для нас будут представлять отработанные жидкости. Со временем в охлаждающей жидкости накапливаются примеси, выпадающие в систему охлаждения, — металлы, хлориды и другие вещества, являющиеся опасными отходами. В целом отработанный антифриз современных легковых и грузовых автомобилей не обладает опасными свойствами, что в первую очередь связано со снижением использования свинца в радиаторах.

Когда автосервисы и прочие мастерские подходят ответственно к сбору отработанных технических жидкостей и собирают их в общие емкости, то сливая антифриз с различных автомобилей, тем самым разбавляют концентрации вредных веществ до неопасных значений. Тем не менее в нашей стране содержанию свинца в отработанных антифризах уделяется мало значения. Также важным представляется сбор информации о типе и составе отработанных антифризов, чтобы правильно определить порядок обращения с ними, не прибегая к лабораторному анализу [7].

В целом отработанные охлаждающие жидкости по российской классификации не относятся к опасным отходам, в соответствии с ФККО отходы автомобильных антифризов и тормозных жидкостей не имеют указания класса опасности. Связано это, конечно, в первую очередь со смешиванием хладагентов с водой, а то и непосредственно с использованием именно ее. При этом антифризы на основе этиленгликоля определены как умеренно опасные отходы [8]. Они действительно нарушают экологический баланс, но считается, что можно добиться восстановления окружающей среды примерно в течение 10 лет. Тем не менее такая обнадеживающая характеристика не должна нас успокаивать.

Комплексной программы по контролю и сбору отработанных антифризов от автомобильных

мастерских и населения как таковой нет. Если сузить круг рассматриваемых источников загрязнения до легковых автомобилей, то нужно сказать, что если в 1990 году на 1000 человек приходилось 58,5 автомобиля [9], к тому же использующих в основной своей массе в качестве антифриза дистиллированную воду, то в 2019 году в России на 1000 человек уже приходилось 315,5 штуки [10], в первую очередь имеющих в системе своего охлаждения тосолы и антифризы с почти 50%-ным содержанием этиленгликоля. Данный факт говорит о как минимум шестикратном росте использования этиленгликоля в качестве антифриза, который, скорее всего, попадает в системы канализации и почву.

Отработанные антифризы не должны сливаться в почву, открытые водоемы, ливневую канализацию и как смазочно-охлаждающие жидкости — даже в централизованные системы городской канализации [11]. При этом никого не волнует, куда автолюбители выливают весь огромный объем отработанных охлаждающих жидкостей, а если даже человек и захочет его утилизировать, то идти ему, собственно, некуда [12]. Будем надеяться, что мы придем к централизованному сбору антифризов, как постепенно приходим к сбору энергосберегающих ламп, батареек, стеклянных и пластиковых бутылок, автомобильных шин.

Если говорить об утилизации и вторичном использовании антифризов, то нужно сказать о способах их достижения. Фильтрация относится к отделению частиц от жидкостей путем пропускания их через пористую среду. Нефильтрационные методы включают гравитационное осаждение, флотацию, циклоны, а также такие процессы, как обратный осмос или ионный обмен для отделения растворенных твердых веществ.

Вопрос вторичного использования антифризов является актуальным, но влечет за собой необходимость решения некоторых проблем. На

протяжении десятилетий, по мере роста использования и стоимости сырья, популярность переработанных и экологически чистых продуктов растет, они постоянно разрабатываются и создаются как более экономичная и экологичная альтернатива.

В транспортной отрасли по мере роста стоимости этиленгликоля, основного сырья для антифриза, на рынке появлялись переработанные варианты для борьбы с более высокими ценами.

Существующие методы переработки антифриза, включая фильтрацию, ионный обмен, обратный осмос, дистилляцию, направлены на удаление примесей и продуктов разложения, которые накапливаются с течением времени и делают используемую охлаждающую жидкость коррозионно-активной. Тем не менее у многих возникают опасения по поводу эффективности переработанных охлаждающих жидкостей, которым вернули товарный вид, некоторые из которых рассмотрены ниже.

Все доступные методы восстановления свойств антифризов имеют ограничения, поэтому необходимо подробно рассмотреть наиболее распространенные примеси и угрозу, которую они представляют.

Переработанные примеси антифриза представлены следующими веществами:

- твердые частицы;
- различные присадки к охлаждающей жидкости;
- гликолевая и муравьиная кислоты;
- хлор;
- масла.

Со временем в использованной охлаждающей жидкости накапливаются твердые частицы отработанных ингибиторов коррозии, таких как силикаты и фосфаты. Эти твердые частицы являются абразивными и сокращают срок службы водяного насоса системы и разрушают мягкие металлы, используемые в двигателе и радиаторе.

Присадки к охлаждающей жидкости часто добавляют для замены израсходованных ингибиторов и герметизации системы охлаждения. С течением времени добавление таких присадок может привести к очень высокому уровню общего содержания растворенных твердых веществ. Хотя сами по себе они не вызывают коррозии, но отработанные присадки в конечном итоге выпадают и способствуют образованию твердых частиц, которые повреждают помпы, радиаторы и другие детали двигателей.

По мере старения используемой охлаждающей жидкости гликоль разлагается до вызывающих коррозию гликолевой и муравьиной кислот. По мере того, как эти кислоты накапливаются в охлаждающей жидкости, они разъедают и разъедают черные металлы.

По мере испарения охлаждающей жидкости, вследствие пренебрежения правилами и добавления не дистиллированной, а хлорированной водопроводной воды, содержание хлора будет повышаться и, подобно гликолевой и муравьиной кислотам, воздействовать на железосодержащие компоненты.

Масла и другие органические вещества из негерметичных прокладок и уплотнений могут загрязнять отработанную охлаждающую жидкость. Даже небольшое количество масла покрывает стенки системы охлаждения, препятствуя действию ингибиторов коррозии.

Для повторного использования гликоля каждое из этих загрязнений должно быть эффективно удалено, в противном случае охлаждающая жидкость, приготовленная из переработанной жидкости, будет либо сама вызывать коррозию, чем обеспечивать защиту от коррозии, либо ее срок службы значительно сократится, прежде чем загрязняющие вещества снова достигнут опасного уровня.

Для удаления обозначенных примесей доступными методами утилизации охлаждающих жидкостей будут являться:

- фильтрация;
- ионный обмен;
- обратный осмос;
- перегонка.

Установки для рециркуляции, особенно те, которые позволяют проводить переработку на месте, часто полагаются на фильтрацию для удаления примесей. Фильтрация — самый дешевый, но и худший способ переработки. Фильтрация удалит твердые частицы и может снизить содержание масла, но растворенные примеси все равно будут проходить даже через самые тонкие фильтры. Охлаждающая жидкость с высоким содержанием растворенных твердых веществ, хлоридов, гликолятов и муравьиной кислоты будет оставаться с высоким содержанием этих коррозионно-активных компонентов даже после фильтрации. Оставшиеся следы масляных эмульсий будут покрывать стенки агрегатов, препятствуя эффективному ингибированию коррозии. Конечный продукт может хорошо выглядеть внешне, но при этом содержать большое количество примесей.

Ионообменные смолы работают по принципу взаимного обмена ионами между слоями смол и охлаждающей жидкостью. Таким образом, они могут снизить содержание хлоридов, гликолятов и муравьиной кислоты в отработанной охлаждающей жидкости до безопасного уровня. Однако слои ионообменной смолы могут пропускать абразивные твердые частицы. Кроме того, ионообменные слои неэффективны для удаления неионогенных загрязнений, таких как масло. Из-за этого ионообменные слои необходимо регенерировать и тщательно контролировать, поскольку их эффективность снижается по мере использования. Этот процесс заслуживает особого внимания, так как слой отработанной смолы загрязняется даже больше, чем описанный выше процесс фильтрации.

При проведении обратного осмоса используется давление, чтобы протолкнуть этиленгликоль и воду через мембрану, оставляя после себя

ионные материалы, растворенные органические соединения и твердые вещества. Обратный осмос может производить чистые водные растворы этиленгликоля, однако этот процесс не подходит для обработки использованных антифризов на основе гликоля, содержащих эмульгированные масла. Хотя масло и не проникает через мембрану, но оно эффективно ее покрывает, останавливая весь процесс. Этот процесс нельзя использовать для производства концентратов охлаждающей жидкости, поскольку он не позволяет полностью отделить воду от рециркулируемого этиленгликоля. С помощью обратного осмоса можно производить только предварительно разбавленные охлаждающие жидкости при отсутствии загрязнения маслом, что, конечно, уже будет являться хорошим результатом.

Перегонка — единственный процесс, при котором можно получить концентрат охлаждающей жидкости. Предпочтительный метод — процесс дистилляции, отделяющий этиленгликоль от других компонентов отработанной охлаждающей жидкости. Растворенный ионный материал не перегоняется с этиленгликолем, в нем не будет взвешенных твердых частиц. Нефть и масляные эмульсии также будут разделены, если условия дистилляции будут соблюдены.

Тем не менее даже у дистилляции есть потенциальные недостатки. Некоторые растворенные ионные материалы, такие как хлорид, муравьиная кислота, этиленгликоль, а также ингибиторы коррозии, не перегоняются, если перед перегонкой не отрегулировать pH используемой охлаждающей жидкости. Только после проведения анализов и наличия соответствующей лабораторной базы можно обеспечить эффективность рассматриваемого способа, с возможной корректировкой по мере его осуществления.

Таким образом, все методы утилизации имеют свои недостатки. Очень сложно остановить свой выбор на каком-то конкретном способе, так как возможности конкретного предприятия по пере-

работке сырья статичны, а каждая новая партия отработанных охлаждающих жидкостей имеет свой уникальный состав. Данный факт приводит нас к мысли о том, что начинать сбор нужно с отдельных типов агрегатов, автомобилей или конкретных предприятий, с установившимся видом отработанной охлаждающей жидкости, так как переработчику необходимо будет провести подробный анализ каждой партии, а затем выбрать подходящий метод утилизации и воспроизводства.

Из указанных недостатков становится понятно, что антифризы, полученные в результате вторичной переработки, могут оказаться не столь эффективными, с непредсказуемыми эффектами для агрегатов, в которые они будут залиты, по сравнению с антифризом, сделанным полностью по технологии с нуля.

По нашему мнению, необходимо двигаться дальше в поиске новых [13] охлаждающих жидкостей, изменения их состава на растворы, преимущественно состоящие из воды и новых или еще не опробованных в этом качестве веществ при обеспечении целевых показателей, для которых создаются охлаждающие жидкости, и обеспечении безвредности и безопасности для человека и окружающей среды. Пока не созданы новые безопасные антифризы, необходимо организовывать централизованный сбор у авторемонтных мастерских и населения отработанных смазочно-охлаждающих жидкостей, только так проблема загрязнения окружающей природной среды отходами транспортной отрасли сдвинется с мертвой точки.

Библиографический список

1. ГОСТ 28084—89. Жидкости охлаждающие низкозамерзающие / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200020221?ysclid=ldxhmrzqbb82420256> (дата обращения: 20.01.2023).

2. ГОСТ 19710—2019. Этиленгликоль. Технические условия / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200167643>, свободный (дата обращения: 20.01.2023).
3. Этиленгликоль / Википедия — свободная энциклопедия. — URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Этиленгликоль> (дата обращения: 20.01.2023).
4. Monograph on the Potential Human Reproductive and Developmental Effects of Ethylene Glycol / Center for The Evaluation of Risks to Human Reproduction // U. S. Department of health and service. — National toxicology program, January 2004. — NIH Publication № 04-4481. — 131 p.
5. Пропиленгликоль / Википедия — свободная энциклопедия. — URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Пропиленгликоль> (дата обращения: 20.01.2023).
6. ГОСТ 33591—2015. Жидкости охлаждающие на основе гликолей для автомобилей с легкими условиями эксплуатации. Технические требования / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200167643> (дата обращения: 20.01.2023).
7. Копытенкова О. И. Анализ содержания железа в листьях кустарников парковых зон мегаполиса / О. И. Копытенкова, А. А. Гаврилова, А. М. Тинус // Проблемы обеспечения безопасности (Безопасность-2021): материалы III Международной научно-практической конференции: в 2 т. — Уфа, 2021. — С. 198–203.
8. Антифриз / Федеральный классификационный каталог отходов. — URL: <http://kod-fkko.ru/?s=антифриз> (дата обращения: 20.01.2023).
9. Статистика: Автомобилизация России / Рук-эксперт. — URL: http://ruexpert.ru/Статистика:Автомобилизация_России_ свободный (дата обращения: 20.01.2023).
10. Рябец В. В. Анализ методов учета загрязнителей атмосферного воздуха автотранспортными средствами / В. В. Рябец // Безопасность жизнедеятельности. — 2023. — № 5. — С. 38–42.
11. Федосеенко А. А. Загрязнение окружающей среды продуктами эксплуатационного износа автомобильного транспорта / А. А. Федосеенко // Технологии техносферной безопасности. — 2015. — № 2(60). — С. 313–317.
12. Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 № 644 (ред. от 30.11.2021) «Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации» / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/499036854>, свободный (дата обращения: 20.01.2023).
13. Патент № 2547823 Российская Федерация, МПК С07С 50/00 С11D 3/08 С11D 3/10. Производные 2-гидрокси-3-фенилэтинилтио (селено)-1,4-хинонов в качестве поверхностно-активных веществ и моющее средство их содержащее: № 2013152521/04. Заявитель и патентообладатель Я. В. Зачиняев; заявл. 26.11.13; опубл. 10.04.15, Бюл. № 10 / Я. В. Зачиняев, А. Л. Харитоненко, Ю. В. Сергиенко и др.

Дата поступления: 28.05.2023

Решение о публикации: 01.08.2023

Контактная информация:

ХАРИТОНЕНКО Александр Леонидович —
канд. техн. наук, доц.; tsar-87@mail.ru

СОЛОВЬЕВА Валентина Яковлевна — д-р техн. наук,
проф.; 9046185117@mail.ru

Environmental Aspects in the Disposal of Used Coolants

A. L. Kharitonenko, V. Ya. Solovieva

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

For citation: Kharitonenko A. L., Solovieva V. Ya. Environmental Aspects in the Disposal of Used Coolants // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 721–730. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-721-730

Summary

Purpose: To consider the issue of the state of the problem of collection, disposal and impact of used coolants on the environment, primarily from road transport. To show the need for recycling of spent cooling liquids, the search for new compositions of cooling liquids and the intensification of the collection of spent antifreeze from the population. **Methods:** Comparing the characteristics of main coolants, highlighting their advantages and drawbacks on the stage of efficiency reduction. Analysis of the types of contaminants accumulating in spent antifreeze. Comparison of advantages and disadvantages of typical methods for purifying spent coolants. Analysis of the growth of sources of anthropogenic impact in the considered area. **Results:** The most important characteristics of coolants have been established. The most characteristic types of contaminants contained in antifreeze are identified and the most suitable methods of their regeneration are given. The high relevance of the considered problem of the circulation of spent antifreeze as a result of the rapid growth of motorization of the population in the absence of proper control by the state is noted. The necessity of searching for new safe antifreezes while maintaining the target qualities of coolants is revealed. **Practical significance:** The necessity of revising the attitude to antifreeze in terms of assessing their danger to the environment is shown. The ways of improving the handling of waste coolant solutions in terms of intensifying their collection from enterprises and the public are outlined. It has also been noted that it is necessary to search for new solutions of cooling liquids with a lower content of harmful substances in them to protect humans and the environment.

Keywords: Coolants, environment, tosol coolant, antifreeze, ethylene glycol, hazard class, disposal.

References

1. GOST 28084—89. Zhidkosti ohlazhdayushchie nizkozamerzayushchie [Low-freezing cooling liquids]. *Elektronnyj fond pravovyh i normativno-tehnicheskikh dokumentov* [Electronic fund of legal and normative-technical documents]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200020221?ysclid=ldxhmrzqbb82420256> (accessed: January 20, 2023). (In Russian)
2. GOST 19710—2019. Etilenglikol'. Tekhnicheskie usloviya [Ethylene glycol. Specifications]. *Elektronnyj fond pravovyh i normativno-tehnicheskikh dokumentov* [Electronic fund of legal and normative-technical documents]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200167643> (accessed: January 20, 2023). (In Russian)
3. Etilenglikol' [Ethylene glycol]. *Vikipediya — svobodnaya enciklopediya* [Wikipedia — the free encyclopedia]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Этиленгликоль> (accessed: January 20, 2023). (In Russian)
4. Monograph on the Potential Human Reproductive and Developmental Effects of Ethylene Glycol. Center for The Evaluation of Risks to Human Reproduction. U. S. Department of health and service. National toxicology program, January 2004. NIH Publication № 04-4481. 131 p.
5. Propilenglikol' [Propylene glycol]. *Vikipediya — svobodnaya enciklopediya* [Wikipedia — the free encyclopedia]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Пропиленгликоль> (accessed: January 20, 2023). (In Russian)

6. GOST 33591—2015. Zhidkosti ohlazhdayushchie na osnove glikolej dlya avtomobilej s legkimi usloviyami ekspluatacii. Tekhnicheskie trebovaniya [Glycol-based coolants for light duty vehicles. Technical requirements]. *Elektronnyj fond pravovyh i normativno-tekhnikeskikh dokumentov* [Electronic fund of legal and normative-technical documents]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200167643> (accessed: January 20, 2023). (In Russian)
7. Kopytenkova O. I., Gavrilova A. A., Tinus A. M. *Analiz sodержaniya zheleza v list'yakh kustarnikov parkovykh zon megapolisa. Problemy obespecheniya bezopasnosti (Bezopasnost'-2021): materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 2 tomakh* [Analysis of the iron content in the leaves of shrubs in the park areas of the metropolis. practical conference: in 2 volumes]. Ufa, 2021, pp. 198–203. (In Russian)
8. Antifriz [Antifreeze]. *Federal'nyj klassifikacionnyj katalog othodov* [Federal waste classification catalog]. Available at: <http://kod-fkko.ru/?s=антифриз> (accessed: January 20, 2023). (In Russian)
9. Statistika: Avtomobilizaciya Rossii [Statistics: Motorization of Russia]. *Rukekspert* [Rookexpert]. Available at: uxpert.ru/Статистика:Автомобилизация_России,_свободный (accessed: January 20, 2023). (In Russian)
10. Ryabets V. V. *Analiz metodov ucheta zagryazniteley atmosfernogo vozdukhа avtotransportnymi sredstvami* [Analysis of accounting methods for atmospheric air pollutants by vehicles]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety]. 2023, Iss. 5, pp. 38–42. (In Russian)
11. Fedoseenko A. A. *Zagryaznenie okruzhayushchey sredy produktami ekspluatatsionnogo iznosa avtomobil'nogo transporta* [Pollution of the environment by products of operational wear of road transport]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti* [Technologies of technospheric safety]. 2015, Iss. 2(60), pp. 313–317.
12. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 29.07.2013 № 644 (red. ot 30.11.2021) “Ob utverzhdenii Pravil holodnogo vodosnabzheniya i vodootvedeniya i o vnesenii izmenenij v nekotorye akty Pravitel'stva Rossijskoj Federacii” [Decree of the Government of the Russian Federation of July 29, 2013 № 644 (as amended on November 30, 2021) “On approval of the Rules for cold water supply and sanitation and on amendments to some acts of the Government of the Russian Federation”]. *Elektronnyj fond pravovyh i normativno-tekhnikeskikh dokumentov* [Electronic fund of legal and regulatory and technical documents]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/499036854> (accessed: January 20, 2023). (In Russian)
13. Zachinyaev Ya. V., Kharitonenko A. L., Sergienko Yu. V. et al. *Proizvodnye 2-gidroksi-3-feniletiniltio (seleno)-1,4-khinonov v kachestve poverkhnostno-aktivnykh veshchestv i moyushchee sredstvo ikh sodержashchee* [Derivatives of 2-hydroxy-3-phenylethynylthio (seleno)-1,4-quinones as surfactants and a detergent containing them]. Patent RF, no. 2547823, 2015. (In Russian)

Received: May 28, 2023

Accepted: August 01, 2023

Author's information:

Alexander L. KHARITONENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; tsar-87@mail.ru

Valentina Ya. SOLOVIEVA — Dr. Sci. in Engineering, Professor; 9046185117@mail.ru

УДК 001.38

Алгоритм оценивания публикационной активности преподавателей вузов, направленный на улучшение научно-педагогической деятельности

П. В. Герасименко

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

Для цитирования: Герасименко П. В. Алгоритм оценивания публикационной активности преподавателей вузов, направленный на улучшение научно-педагогической деятельности // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 731–739. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-731-739

Аннотация

Цель: Создать более эффективный алгоритм оценивания публикационной деятельности преподавателей по сравнению с существующими алгоритмами формирования индекса Хирша и *ghp*-индекса. **Методы:** Алгоритм включает математическое описание названий всех опубликованных работ преподавателя и их цитирований. Результаты научной деятельности преподавателя отражены с использованием матричной формы записи статистических исходных данных, состоящих из цитирований по каждой опубликованной работе автора. Последовательность следования цитирований публикаций в матрице определяется невозрастающим характером цитирований в последующих публикациях по сравнению с предыдущими. Построенная матрица распределения цитирований S по опубликованным работам перестроена в блочную матрицу, которая включает следующие блок-матрицы: H — базовая матрица, определяющая индекс Хирша; G — матрица значимых публикаций, расположенная над матрицей Хирша; P — матрица менее цитируемых работ преподавателя и O — нулевая матрица. Сформированные матрицы позволили ввести с помощью евклидовых норм следующие индексы: h — индекс Хирша, g — индекс значимых публикаций и p — индекс интенсивной работы. В свою очередь, эти индексы позволили определить как евклидовы нормы gh — индекс базовых значимых публикаций, hp — индекс интенсивной работы преподавателя и комплексный *ghp*-индекс, учитывающий все опубликованные работы преподавателя и все их цитирования. Проводится усовершенствование *ghp*-индекса путем введения весовых коэффициентов для составляющих его индексов. **Результаты:** Выполнено построение рейтингов коллектива из 20 преподавателей, сформированного выборкой из РИНЦ с помощью индекса Хирша и индекса *A-ghp*. Показано, что более эффективным по сравнению с индексом Хирша и другими введенными индексами является предложенный алгоритм. **Практическая значимость:** Проведенное исследование позволило обосновать возможность с помощью усовершенствованного комплексного индекса дифференцированно и справедливо распределять поощрения коллектива преподавателей по их рейтингу. Алгоритм направлен на улучшение научно-методической деятельности преподавателей за счет корректного и справедливого ранжирования членов их коллективов.

Ключевые слова: Индекс, цитирование, научные труды, преподаватель, матрица, евклидова норма, квадрат, рейтинг.

Введение

Важнейшая задача, которая постоянно стоит перед высшей школой, традиционно направлена на развитие рационального соотношения между преподавательской и научно-исследовательской деятельностью с учетом достижений в областях педагогического образования и науки [1]. К сожалению, сегодня в большинстве случаев оценивание профессиональной деятельности преподавателя определяется не результатами педагогической и научной работы, а количеством персональных публикаций и их цитирований.

Данная тенденция имеет место во многих российских университетах, в которых введена рейтинговая система оценивания деятельности преподавателя, где при подведении итогов в основном учитываются количественные результаты публикационной активности с помощью далеко не совершенного ранжирования посредством индексов [2, 3]. Низкий уровень заработной платы, особенно молодых преподавателей, в сочетании с несовершенным ранжированием их научно-методической деятельности привел к тому, что в вузах многие молодые преподаватели, особенно защитившие кандидатские диссертации, покидают вуз [4]. В ранее стабильных, в целом спокойных и уверенных в завтрашнем дне профессорско-преподавательских коллективах нарастает чувство неуверенности и нестабильности [5].

В складывающейся ситуации становится все более актуальной потребность создания более эффективной системы количественных показателей для оценки эффективной деятельности ППС, поскольку существующие сегодня системы стимулирования недостаточно ориентированы на качество оценивания работы преподавателя [6].

В складывающейся ситуации становится все более актуальной потребность совершенствования эффективных методик формирования количественных показателей оценки систем стимулов эффективной деятельности ППС, поскольку

существующие сегодня системы стимулирования не дифференцируют научно-методическую деятельность коллектива преподавателей и слабо ориентированы на все их публикации и цитирования [7].

Следует отметить, что сегодня все чаще в качестве оценки сложной ситуации прибегают к интегрирующим числовым критериальным показателям, которые только частично отражают всю публикационную активность преподавателей. Опасность использования такого подхода заключается в том, что этот показатель начинает восприниматься как абсолютно объективная и простая оценка, схожая с измерениями, производимыми в привычной шкале отношений (измерение длины, веса, стоимости).

Деятельность профессорско-преподавательского состава вуза обусловлена его многоаспектностью. Преподаватель должен заниматься и обучением, и воспитанием, и научной деятельностью, а также выполнять функции организатора и, что крайне важно, постоянно повышать в этих обязанностях свой личный потенциал. Отсюда следует сложность адекватной оценки преподавателя вуза числовыми показателями, а тем более их сверткой в скаляр.

В этой связи появляется соблазн их применения на практике, поскольку они простые и очень удобные в качестве механизмов для принятия решений. Такого рода «простота» управления подкупает, однако для молодых преподавателей часто приводит к равенству их величин, несмотря на разный суммарный массив публикаций и цитирований. Такие показатели не позволяют дифференцировать научно-методический вклад каждого преподавателя. Становится неважным, что значение цифрового показателя получено не на всем массиве информации, а только частично характеризует деятельность преподавателя. Главное, что его значение позволяет быстро найти оцениваемую деятельность преподавателя и на

этой основе принимать «как бы научно обоснованные» их поощрения [8].

Вместе с тем для отдельной области, важной в деятельности преподавателя, которая относится к научно-методическим публикациям, делаются попытки проводить оценки с определенной степенью корректности с помощью числовых показателей. Степень корректности обуславливается как охватом всех трудов преподавателя, так и способностью показателя дифференцированно проводить с помощью рейтингов оценку результатов их творческой деятельности в коллективе.

В настоящее время в вузах публикационная активность преподавателей поощряется по результатам рейтинговых оценок, устанавливаемых в основном посредством индекса Хирша. Как известно, согласно определению индекса Хирша или h -индекса, что если «из N статей автора h цитируются как минимум h раз каждая, в то время как оставшиеся $(N - h)$ статей цитируются не более, чем h раз» [2].

Целью настоящей работы предложить усовершенствованный алгоритм определения числового показателя оценивания публикационной активности преподавателя, позволяющей более корректно проводить ранжирование коллективов профессорско-преподавательского состава, предназначенного для более справедливого их поощрения по сравнению с ранжированием на основе индекса Хирша.

Структуризация исходных данных для алгоритмов построения индексов ранжирования публикационной активности преподавателей

В формировании индексов, как Хирша, так и его модификаций, в качестве исходных данных выступают массивы статистических данных, включающие количества публикаций и количества их цитирований. Для описания с единых позиций алгоритмов построения индексов в

работе для исходных данных принята математическая форма в виде матриц. С этой целью структурно массив цитирований публикаций автора формируется в виде матрицы распределения цитирований по публикациям $S = \{s_{ij}\}_{i=1, \dots, n}^{j=1, \dots, m}$, которая включает n — столбцов и m — строк. Каждая i -я ($i = 1, \dots, n$) публикация в матрице представляется столбцом цитирований, а наличие у j -го ($j = 1, \dots, m$) цитирования элементом $s_{ij} = 1$. При отсутствии цитирования элемент матрицы равен нулю. При построении матрицы первый столбец, который формируется публикацией с наибольшим числом цитирований, включает только единицы, число которых, если обозначить

их через $s_1 = m = \sum_{j=1}^m s_{1j}$. За первым столбцом в

матрице следует второй столбец, соответствующий второй публикации, у которой число цитирований, наиболее близкое к номеру цитирования s_1 . Если второй столбец содержит k нулевых элементов, то число элементов, равных единице,

у второго столбца будет равно $s_2 = \sum_{j=1}^{m-k} s_{2j}$. Все

последующие столбцы, вплоть до n -го, должны не превышать число ненулевых элементов предыдущего столбца. При этом число нулевых элементов в последующих столбцах не может быть меньше, чем в предыдущих. Поскольку на суммарное число цитирований матрицы количество нулевых элементов не оказывает влияния, то публикации преподавателя будут иметь общее

число цитирований $W = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n s_{ij}$.

С учетом распределения в матрице цитирований, для ее элементов будет справедливо неравенство $s_i \geq s_{i+1}$, а индекс Хирша тогда можно определить как $h = i$, если $s_i \geq h$, а $s_{i+1} \leq h$.

ТАБЛИЦА 1. Пример матрицы распределения цитирований по публикациям

1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

ТАБЛИЦА 2. Подматрицы, выделенные из матрицы распределения цитирований

H	Матрица цитирования массива Хирша
G	Матрица цитирования массива значимых публикаций
P	Матрица массива менее процитированных публикаций
O	Матрица нулевых цитирований

Пример структуры матрицы цитирований и публикаций размером $n = 13$ и $m = 12$, где столбцы следуют по невозрастающему количеству в них цитирований, представлен в табл. 1.

Если выделить цитирования, которые согласно формуле индекса Хирша ($h = 5$), то можно видеть, что они формируют квадратную подматрицу. В работе [9] она названа матрицей Хирша и обозначена как H . Цитирования, которые расположены над матрицей Хирша, названы матрицей значимых цитирований G , поскольку они относятся к наиболее цитируемым публикациям.

Соответственно, цитирования публикаций P , следующих за публикациями матрицы Хирша, являются цитированиями, отнесенными к матрице менее процитированных публикаций. Остальные элементы матрицы распределения цитирований S являются нулевыми, а поэтому, соответственно, они формируют матрицу нулевых цитирований O (табл. 2).

Построение индексов ранжирования публикационной активности преподавателей

В работе принято более сложное описание индекса Хирша, по сравнению с определением, данным Хиршем. Оно вызвано необходимостью определить как индекс Хирша, так и предлагаемый модифицированный индекс ghp на единой математической основе, а именно на норме матрицы. При этом матрица Хирша является составной частью базовой матрицы распределения цитирований. Так, базой ghp -индекса является евклидова норма суммы трех матриц, то есть всех публикаций автора и всех их цитирований [9].

На основании предложенной структуризации массивов публикаций преподавателя и их цитирований следует, что Хирш предложил индекс, в основе определения которого лежит свертка двумерного массива чисел к одному числу, по которой оценивается научно-методический вклад ученого. С математической точки зрения индекс Хирша — это норма матрицы H . Суть геометрической интерпретации индекса Хирша заключается в вырезании из матрицы цитирования квадратной матрицы H . Корень квадратный из количества в ней цитирований составляет число, величина которого есть длина стороны квадрата [9].

Алгоритм индекса Хирша — это процедура замены массива публикаций преподавателя и их цитируемости одним числом, характеризующим часть массива. Как отмечалось с математической точки зрения индекс Хирша представляет собой евклидовую норму матрицы H , а следовательно,

$$h = \left(\sum_{j=1}^h \sum_{i=1}^h s_{ij}^2 \right)^{1/2} = \left(\sum_{j=1}^h \sum_{i=1}^h 1 \right)^{1/2} = (h^2)^{1/2}. \text{ По этим}$$

числам проводятся ранжирование и поощрения коллективов преподавателей.

Из изложенного содержания индекса Хирша можно выделить основные недостатки при применении его для ранжирования коллектива профессорско-преподавательского состава вуза. К этим недостаткам относятся следующие:

- не учитывается при равенстве индексов у преподавателей, возможное в отдельных случаях, большое количество цитирований, что может привести к несправедливым поощрениям. Например, когда у двух авторов по одной публикации, но в одной из них одно цитирование, а во второй — тысяча цитирований, индекс составляет величину, равную 1;

- не обеспечивается возможность дифференцировать опубликованные научно-методические работы преподавателей, имеющих разные количества публикаций и разные количества цитирований, но равные индексы Хирша;

- все цитирования считаются равнозначными, то есть принадлежащие как к матрице цитирований массива значимых публикаций, так и к матрице массива менее процитированных публикаций.

Для устранения первых двух недостатков в [9] предложен ghp -индекс всех публикаций и всех их цитирований, который по аналогии с определением индекса Хирша численно определяется как корень квадратный из величины суммы трех матриц H , G и P . Если обозначить количество цитирований соответственно матриц H , G и P через h^2 , g^2 , p^2 , то, по аналогии с индексом

Хирша, можно ввести индексы цитирований каждой матрицы. Они обозначены следующими символами: h — индекс цитирований матрицы Хирша H ; g — индекс цитирований матрицы G ; p — индекс цитирований матрицы P . Их можно получить, если провести вычисление евклидовых норм каждой из трех матриц:

$$\left(\sum_{j=1}^h \sum_{i=1}^h s_{ij}^2 \right)^{1/2} = \left(\sum_{j=1}^h \sum_{i=1}^h 1 \right)^{1/2} = (h^2)^{1/2} = h.$$

$$\left(\sum_{j=h+1}^{s_j} \sum_{i=1}^h s_{ij}^2 \right)^{1/2} = \left(\sum_{j=1}^{s_j} \sum_{i=1}^h 1 \right)^{1/2} = (g^2)^{1/2} = g.$$

$$\left(\sum_{j=1}^{s_j} \sum_{i=h+1}^N s_{ij}^2 \right)^{1/2} = \left(\sum_{j=1}^{s_j} \sum_{i=h+1}^N 1 \right)^{1/2} = (p^2)^{1/2} = p.$$

Наконец, если обозначить индекс суммы всех матриц цитирований через ghp , а его вычисление как корень квадратный из количества цитирований в матрицах H , G и P , то получим:

$$\begin{aligned} ghp &= \left(\sum_{j=1}^h \sum_{i=1}^h s_{ij}^2 + \sum_{j=h+1}^{s_j} \sum_{i=1}^h s_{ij}^2 + \sum_{j=1}^{s_j} \sum_{i=h+1}^N s_{ij}^2 + \right)^{1/2} = \\ &= (h^2 + g^2 + p^2)^{1/2} = (S)^{1/2} = \sqrt{S}, \end{aligned}$$

где $S = \sum_{j=1}^{s_1} \sum_{i=1}^N s_{ij} = h^2 + g^2 + p^2$.

Недостатком алгоритма вычисления ghp -индекса является равнозначность всех цитирований, как значимых публикаций с большим числом цитирований (матрица G), так и менее относительно значимых публикаций с числом цитирований (матрица P). Для усовершенствования ghp -индекса в работе предлагается ввести весовые коэффициенты для матриц цитирования, формирующих исходную матрицу, введя таким образом усовершенствованный индекс $A-ghp$.

Тогда:

$$A\text{-}ghp = \left(\alpha \sum_{j=1}^h \sum_{i=1}^h s_{ij}^2 + \beta \sum_{j=+1}^{s_i} \sum_{i=1}^h s_{ij}^2 + \mu \sum_{j=1}^{s_i} \sum_{i=h+1}^N s_{ij}^2 \right)^{1/2} = (\alpha h^2 + \beta g^2 + \mu p^2)^{1/2},$$

где α, β, μ — весовые коэффициенты значимости матриц цитирования.

Для весовых коэффициентов в работе рекомендуются только их ограничительные уровни значений. Поскольку каждый коллектив преподавателей разных вузов имеет свои особенности и свои достижения, а соответственно, и количества публикаций с их количеством цитирований, то следует предло-

жить величины коэффициентов устанавливать в вузах. В качестве ориентира можно предложить следующие границы: $\alpha \geq 1, \beta = 1, \mu \leq 1$.

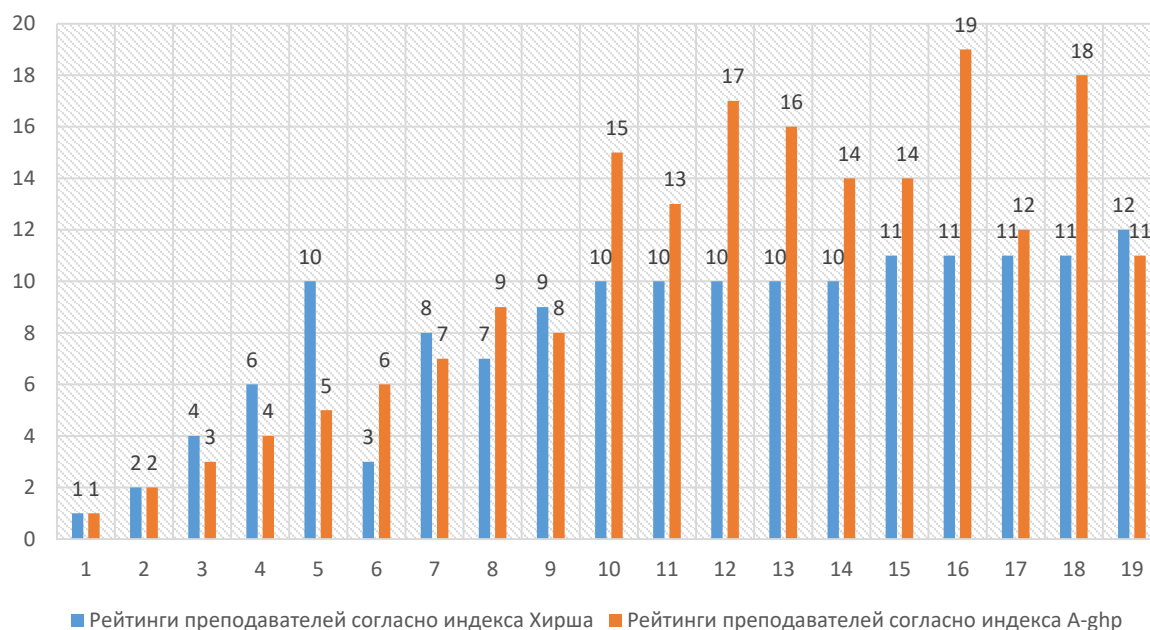
Пример ранжирования индексами h и $A\text{-}ghp$

Исследование проведено на выборке из РИНЦ, включающей коллектив из 20 преподавателей одной организации, которые имели h -индекс от 39 до 10 с разным числом цитирования своих публикаций. В табл. 3 приведены основные показатели творческой деятельности этих преподавателей [10].

Следует отметить, что существующие недостатки h -индекса при ранжировании могут

ТАБЛИЦА 3. Основные показатели исходных данных и расчетов индексов

Порядковый номер преподавателя	Всего количество публикаций	Всего количество цитирований	Количество публикаций по матрицам			Индекс Хирша	Индекс $A\text{-}ghp$	Рейтинг по индексу Хирша	Рейтинг по индексу $A\text{-}ghp$
			матрица цитирования Хирша H	матрица цитирования значимых G публикаций G	матрица менее цитированных публикаций P				
1	651	4033	1521	1532	980	39	65,6	1	1
2	371	2615	729	1378	508	27	55,2	2	2
3	361	2271	576	1134	561	24	50,6	4	3
4	326	1956	441	1302	213	21	50	6	4
5	129	1639	144	1253	242	12	46,3	10	5
6	206	1525	625	675	225	25	41,8	3	6
7	195	1055	361	498	196	19	34,7	8	7
8	180	1054	400	411	243	20	33,7	7	9
9	114	1002	324	482	196	18	33,8	9	8
10	89	453	144	150	159	12	21,2	10	15
11	80	591	144	351	96	12	26,8	10	13
12	91	383	144	142	97	12	20,1	10	17
13	167	406	144	158	104	12	20,8	10	16
14	48	490	144	271	75	12	24,2	10	14
15	77	462	121	295	46	11	24,2	11	14
16	116	418	121	47	250	11	17,8	11	19
17	164	743	121	311	311	11	27,3	11	12
18	65	478	121	74	283	11	19,3	11	18
19	52	973	100	217	656	10	27,4	12	11
20	193	986	484	321	181	22	32,5	5	10

Сравнение рейтингов, сформированных индексами Хирша и *A-ghp*

проявляться прежде всего при оценке научно-методического вклада тех преподавателей, у которых значимых публикаций небольшое число, но при этом они имеют огромное количество цитирований.

Кроме того, может не подлежать дифференцированию научная деятельность преподавателей с равным индексом Хирша, то есть с равным количеством значимых публикаций и разными суммарными количествами цитирований. Это прежде всего относится к группам молодых преподавателей. С целью подтверждения этого предположения в работе выполнено ранжирование с помощью индекса Хирша и *A-ghp*-индекса. Наглядно их смещения для двух ранжирований представлены на рисунке.

На оси абсцисс рисунка приведены 19 порядковых номеров списка коллектива преподавателей из табл. 3, а на оси ординат представлены их рейтинги, построенные по индексу Хирша и *A-ghp*.

Из табл. 3 и рисунка следует, что девять преподавателей в выборке на свои опубликованные работы имеют более тысячи цитирований. При этом у них индексы Хирша имеют разные значения

за счет существенных отличий количества цитирований матрицы *H*. Соответственно, за счет больших значений цитирований этой матрицы рейтинги по обоим индексам практически совпадают.

У остальных 11 преподавателей, формирующих две группы, при отличиях суммарного числа цитирований, индексы Хирша совпадают у разных преподавателей за счет совпадения числа цитирований матриц Хирша *H*. Несмотря на то, что все они имеют отличия в количестве цитирований, которые не входят в матрицу Хирша, равенство индексов не позволяет их дифференцированно оценить и справедливо распределить между ними поощрения. Возможность устранить этот недостаток позволил индекс *A-ghp*.

Таким образом, для преподавателей с матрицами распределения цитирований *S*, содержащих большое число значимых публикаций и большие величины индекса Хирша, при формировании для них рейтинга риск ошибиться невысок, но растет он для тех преподавателей, у которых все цитирования сосредоточены в матрицах *G* и *P*. Устранить эти недостатки позволяет индекс *A-ghp*.

Библиографический список

1. Шаршов И. А. Научная и педагогическая деятельности будущего преподавателя вуза: проблема соотношения / И. А. Шаршов, Л. Н. Макарова // Социально-экономические явления и процессы. — Тамбов, 2013. — № 7. — С. 197–203.
2. Hirsch J. E. An index to quantify an individual's scientific research output / J. E. Hirsch // Proc. Nat. Sci. — 2005. — Vol. 102. — Iss. 46. — Pp. 16569–16572. DOI: 10.1073/pnas.0507655102.
3. Egghe L. Theory and practice of the g-index / L. Egghe // Scientometrics. — 2006. — Vol. 69. — Iss. 1. — Pp. 131–152. — DOI: 10.1007/s11192-006-0144-7.
4. Пташкин С. А. Проблемы развития кадрового потенциала вузов России / С. А. Пташкин, Д. Ю. Нурлин // Интеграция образования. — 2009. — № 2. — С. 9–14.
5. Рудаков В. Н. Различия в положении профессорско-преподавательского состава вузов по возрастным группам / В. Н. Рудаков // Мониторинг экономики образования. — 2020. — Вып. 13. — С. 1–6.
6. Есипова А. А. Образ современного педагога высшей школы / А. А. Есипова // Педагогика высшей школы. — 2015. — № 3.1(3.1). — С. 75–78.
7. Федяева А. Е. Стимулирование профессорско-преподавательского состава вузов / А. Е. Федяева // Научный

электронный архив. — URL: <http://econf.rae.ru/article/5695> (дата обращения: 05.05.2023).

8. Юрасова М. В. Рейтинг как инструмент измерения успеха: «За» и «Против» / М. В. Юрасова // Вестник Моск. ун-та. Сер. 18. Социология и политология. — 2017. — № 2. — С. 137–164.

9. Герасименко П. В. Модификации индекса Хирша для дифференцированной оценки результатов творческой деятельности ученых / П. В. Герасименко // Управление наукой и наукометрия. — 2020. — Т. 8. — № 1. — С. 55–71. — DOI: <https://doi.org/10.33873/2686-6706.2020.15-1.55-71>.

10. Герасименко П. В. Алгоритмы модифицированных индексов Хирша для формирования рейтингов преподавателей вузов по числу публикаций и их цитирования / П. В. Герасименко // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Т. 18. — Вып. 3. — С. 402–409. — DOI: 10.20295/1815-588X-2021-3-402-40.

Дата поступления: 18.05.2023

Решение о публикации: 05.06.2023

Контактная информация:

ГЕРАСИМЕНКО Петр Васильевич — д-р техн. наук, проф.; pv39@mail.ru

The Algorithm for Evaluating the Publication Activity of University Lecturers Aimed at Improving Scientific and Pedagogical Activity

P. V. Gerasimenko

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

For citation: Gerasimenko P. V. The Algorithm for Evaluating the Publication Activity of University Lecturers Aimed at Improving Scientific and Pedagogical Activity // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 731–739. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-731-739

Summary

Purpose: To create a more effective algorithm for evaluating the publication activity of lecturers in comparison with the existing algorithms for the formation of the Hirsch index and ghp-index. **Methods:** The algorithm includes a mathematical description of all published works of the lecturer and their citations. The results of the scientific activity of the lecturer are reflected using the matrix form of recording statistical source data, consisting of citations for each published work of the author. The sequence of citations of publications in the matrix is determined by the non-increasing nature of citations in subsequent publications compared to the previous ones. The constructed matrix of the distribution of citations S by published works is rebuilt into a block matrix, which includes the following block matrices: H is the base matrix defining the Hirsch index; G is the matrix of significant publications located above the Hirsch matrix; P is the matrix of less-cited works

of the lecturer; O is the zero matrix. The formed matrices have allowed the introduction of the following indices using Euclidean norms: h — Hirsch index, g — index of significant publications and p — index of intensive work. In turn, these indices have allowed to determine the following as Euclidean norms: gh — the index of basic significant publications, hp — the index of intensive work of a lecturer and a comprehensive ghp -index that takes into account all the published works of a lecturer and all their citations. The ghp -index has been improved by introducing weighting coefficients for its constituent indices. **Results:** The ratings of a team of 20 lecturers has been formed using a sample from the RSCI with the help of the Hirsch index and the A - ghp index. It is shown that the proposed algorithm is more effective in comparison with the Hirsch index and other introduced indexes. **Practical significance:** The conducted research has allowed to substantiate the possibility of using an improved comprehensive index to distribute the incentives of a team of lecturers in a differentiated and fair manner according to their rating. The algorithm aims to improve the scientific and methodological activities of lecturers by providing fair and accurate ranking of the members of their collectives.

Keywords: Index, quoting, scientific works, lecturer, matrix, Euclidean norm, square, rating.

References

1. Sharshov I. A., Makarova L. N. Nauchnaya i pedagogicheskaya deyatelnost' budushchego prepodavatelya vuza: problema sootnosheniya [Scientific and pedagogical activities of the future university teacher: the problem of correlation]. *Sotsial'no-ekonomicheskie yavleniya i protsessy* [Socio-economic phenomena and processes]. Tambov, 2013, Iss. 7, pp. 197–203. (In Russian)
2. Hirsch J. E. An index to quantify an individual's scientific research output. *Proc. Nat. Sci.*, 2005, vol. 102, Iss. 46, pp. 16569–16572. DOI: 10.1073/pnas.0507655102.
3. Egghe L. Theory and practice of the g -index. *Scientometrics*. 2006, vol. 69, Iss. 1, pp. 131–152. DOI: 10.1007/s11192-006-0144-7.
4. Ptashkin S. A., Nurlin D. Yu. Problemy razvitiya kadrovogo potentsiala vuzov Rossii [Problems of development of personnel potential of Russian universities]. *Integratsiya obrazovaniya* [Educational Integration]. 2009, Iss. 2, pp. 9–14. (In Russian)
5. Rudakov V. N. Razlichiya v polozhenii professorsko-prepodavatel'skogo sostava vuzov po vozrastnym gruppam [Differences in the position of the teaching staff of universities by age groups]. *Monitoring ekonomiki obrazovaniya* [Monitoring the Economics of Education]. 2020, Iss. 13, pp. 1–6. (In Russian)
6. Esipova A. A. Obraz sovremennogo pedagoga vysshey shkoly [The image of a modern teacher of higher education]. *Pedagogika vysshey shkoly* [Pedagogy of higher education]. 2015, Iss. 3.1(3.1), pp. 75–78. (In Russian)
7. Fedyayeva A. E. Stimulirovanie professorsko-prepodavatel'skogo sostava vuzov [Stimulation of the teaching staff of universities]. *Nauchnyy elektronnyy arkhiv* [Scientific electronic archive]. Available at: <http://econf.rae.ru/article/5695> (accessed: May 5, 2023). (In Russian)
8. Yurasova M. V. Reyting kak instrument izmereniya uspekha: "Za" i "Protiv" [Rating as a tool for measuring success: "For" and "Against"]. *Vestnik Mosk. un-ta. Ser 18. Sotsiologiya i politologiya* [Vestnik Mosk. university Ser 18. Sociology and political science]. 2017, Iss. 2, pp. 137–164. (In Russian)
9. Gerasimenko P. V. Modifikatsii indeksa Khirsha dlya differentsirovannoy otsenki rezul'tatov tvorcheskoy deyatelnosti uchenykh [Modifications of the Hirsch index for a differentiated assessment of the results of the creative activity of scientists]. *Upravlenie naukoj i naukometriya* [Management of science and scientometrics]. 2020, vol. 8, Iss. 1, pp. 55–71. DOI: <https://doi.org/10.33873/2686-6706.2020.15-1.55-71>. (In Russian)
10. Gerasimenko P. V. Algoritmy modifitsirovannykh indeksov Khirsha dlya formirovaniya reytingov prepodavateley vuzov po chislu publikatsiy i ikh tsitirovaniyam [Algorithms of modified Hirsch indices for the formation of ratings of university teachers by the number of publications and their citations]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [News of the Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, vol. 18, Iss. 3, pp. 402–409. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-3-402-40. (In Russian)

Received: May 18, 2023

Accepted: June 05, 2023

Author's information:

Petr V. GERASIMENKO — Dr. Sci. in Engineering, Professor; pv39@mail.ru

УДК 628.14

Расчет времени промерзания надземного водовода в условиях отрицательных температур

В. Ф. Лапшин

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

Для цитирования: Лапшин В. Ф. Расчет времени промерзания надземного водовода в условиях отрицательных температур // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 740–750. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-740-750

Аннотация

Цель: При остановке движения воды в трубопроводе в условиях отрицательных температур возможно его замерзание и разрушение, что приводит к выведению из строя систем водоснабжения на длительный срок. Для безаварийной эксплуатации водовода важно знать время, в течение которого происходит его полное или частичное замерзание. Цель настоящей работы состоит в том, чтобы изучить физические процессы, происходящие при замерзании, сформулировать основную математическую модель и получить ее численное решение, найти аналитическое решение в квазистационарном приближении, получить формулы, удобные для расчетов времени замерзания, и определить диапазон значений параметров, при которых они справедливы. **Методы:** Математическая модель процесса замерзания опирается на использование закона сохранения энергии. При построении разностной схемы для численного решения нелинейных дифференциальных уравнений модели используется интегро-интерполяционный метод. Для приближенного аналитического решения используется метод разделения уравнений, описывающих процессы, происходящие с разными скоростями. **Результаты:** Сформулирована и обоснована математическая модель замерзания трубопровода при остановке движения воды в условиях постоянной отрицательной температуры окружающей атмосферы. В рамках квазистационарного приближения получены простые формулы для времени замерзания водовода. Установлены критерии применимости этих формул. Выполнено сравнение численного решения уравнений исходной математической модели с результатами, полученными в рамках квазистационарного приближения. **Практическая значимость:** Полученные в работе соотношения позволяют оценить время, в течение которого должны быть выполнены ремонтные работы и восстановлено движение воды в трубопроводе прежде, чем произойдет его разрушение вследствие замерзания.

Ключевые слова: Надземный водовод, внутреннее оледенение, время замерзания, математическое моделирование, квазистационарное приближение.

Введение

Процессы плавления и затвердевания материалов широко распространены и встречаются в самых разных технических областях. В частности, проблемы, связанные с этими процессами, имеют большое значение при эксплуатации систем водоснабжения на объектах транспортной инфраструктуры в условиях отрицательных температур. Замерзание трубопроводов и их последующее

разрушение приводит к большим материальным потерям и нарушению работы систем водоснабжения на длительный срок. В связи с этим изучению процесса внутреннего оледенения трубопроводов посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ (см., например, [1–9] и ссылки в них). Как показали многочисленные исследования, при понижении наружной температуры среды до отрицательных значений последовательно про-

исходит охлаждение воды в трубопроводе до температуры замерзания T_{ph} , образование льда, постепенно заполняющего трубопровод, блокирование воды в трубопроводе, быстрый рост давления и разрыв труб. При этом если начальная температура воды ниже $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, то в случае остановки движения воды в трубопроводе время ее охлаждения до температуры замерзания существенно меньше времени промерзания половины или большей части поперечного сечения трубопровода. По этой причине расчет времени промерзания имеет большое практическое значение: именно оно определяет промежуток времени, в течение которого должны быть выполнены ремонтные работы и восстановлено движение воды в трубопроводе прежде, чем произойдет его разрушение.

В настоящее время для расчетов времени промерзания используются громоздкие аналитические решения уравнения теплопроводности в виде рядов, численные решения в рамках различных моделей либо соотношения, полученные интерполяцией экспериментальных данных. В предлагаемой работе формулируется математическая модель процесса промерзания водовода и анализируются протекающие при этом физические процессы. Рассматривается возможность использования квазистационарного приближения для получения явных соотношений для расчетов времени промерзания. Результаты численного решения уравнений исходной модели сравниваются со значениями, полученными по формулам квазистационарного приближения. Определяется область значений параметров задачи, при которых это приближение применимо.

1. Уравнения модели процесса промерзания водовода

В работе рассматривается процесс замерзания неподвижной воды в аксиально-симметричном трубопроводе надземной прокладки с теплоизоляцией. Предполагается, что в исходном состоянии лед в водоводе отсутствует и температура всех

его элементов (воды, стенок трубы и теплоизолятора) равна температуре T_{ph} фазового перехода вода — лед. В начальный момент времени $t = 0$ температура внешней среды мгновенно понижается до значения $T_{ex} < T_{ph}$ и далее в процессе замерзания водовода остается постоянной. Понижение наружной температуры воздуха приводит к образованию кольцевого слоя льда возрастающей толщины на внутренней поверхности трубопровода. При записи уравнений теплофизические параметры всех частей водовода считаются постоянными. В этих условиях уравнение переноса энергии сводится к уравнению теплопроводности, которое при $t > 0$ может быть записано отдельно для каждого слоя водовода:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_1}{\partial r},$$

$$\eta(t) < r < R_1, \text{ для льда,} \quad (1)$$

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_2}{\partial r},$$

$$R_1 < r < R_2, \text{ для стенки трубы,} \quad (2)$$

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_3}{\partial r},$$

$$R_2 < r < R_3, \text{ для теплоизолятора.} \quad (3)$$

где r — радиальная переменная, t — время, R_1 и R_2 — внутренний и наружный радиусы стенки трубопровода, R_3 — внешний радиус теплоизоляции (см. рис. 1), $T_i(r, t)$, ρ_i , c_i , λ_i — температура, плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность льда ($i = 1$), материала стенки трубы ($i = 2$) и теплоизолятора ($i = 3$), $\eta(t)$ — радиальная координата границы фазового перехода в момент времени t .

Начальное условие для всех $T_i(r, t)$ одинаково и имеет вид:

$$T_i(r, 0) = T_{ph}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (4)$$

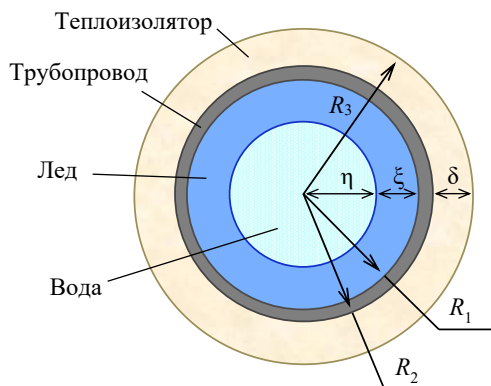


Рис. 1. Поперечное сечение водовода: η — радиус цилиндрического объема воды, ξ — толщина слоя льда, δ — толщина слоя теплоизоляции, R_1 и R_2 — внутренний и наружный радиусы трубы, R_3 — внешний радиус водовода с теплоизоляцией

При записи граничных условий учтем ряд особенностей рассматриваемой задачи. Прежде всего отметим, что внутренняя граница льда всегда находится при температуре фазового перехода:

$$T_1(\eta, t) = T_{ph}. \quad (5)$$

Граничные условия на поверхностях трубопровода при $r = R_1$ и $r = R_2$ выражают свойство непрерывности температуры и потоков тепла на границе двух сред:

$$T_1(R_1, t) = T_2(R_1, t), T_2(R_2, t) = T_3(R_2, t). \quad (6)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_1},$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=R_2}. \quad (7)$$

Отдельно остановимся на формулировке граничного условия для внешней поверхности водовода. Традиционно [6–8] в качестве такого условия используется закон Ньютона для процесса теплообмена между твердым телом и окружающей его жидкостью или газом:

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=R_3} = \alpha (T_3(R_3) - T_{ex}), \quad (8)$$

где α — коэффициент теплоотдачи.

Для определения α используют соотношения теории подобия: $\alpha = \lambda_a Nu / 2R_3$, где λ_a — коэффициент теплопроводности воздуха, Nu — число Нуссельта, определяемое экспериментально [10]. Отметим, однако, что значение Nu , в реальных условиях функционирования водовода, существенно образом зависит от ряда непредсказуемых параметров. К их числу можно отнести направление и скорость ветра, давление атмосферы, влажность воздуха, температуру. Кроме того, даже при одинаковых исходных условиях различия в значениях Nu , а значит, и α , полученных разными авторами [7, 10, 11], достигают 20 %. Вместе с тем наличие теплоизоляции приводит к тому, что температуры внешней поверхности водовода и окружающей атмосферы мало отличаются друг от друга. Действительно, как следует из (8), относительная разность температур $\varepsilon_T = (T_3(R_3) - T_{ex}) / (T_{ph} - T_{ex})$ по порядку величины равна:

$$\varepsilon_T = \frac{2R_3 \lambda_3}{\delta \lambda_a Nu}. \quad (9)$$

где λ_a — теплопроводность воздуха, δ — толщина слоя теплоизоляции. Используя значения $R_3 = 0,3$ м, $\delta = 0,1$ м, $\lambda_a = 0,023$ Вт/(м · К) (для сухого воздуха) [10], $\lambda_3 = 0,04$ Вт/(м · К) [12] и $Nu = 200$ [7] для поперечной водоводу скорости воздуха $V = 1$ м/с, получаем $\varepsilon_T = 0,05$. При бóльших значениях скорости и влажности воздуха значение ε_T будет еще меньше. Таким образом, с более высокой точностью, чем в (8), можно положить

$$T_3(R_3, t) = T_{ex}. \quad (10)$$

Скорость перемещения фазовой границы определяется, в соответствии с законом сохранения энергии, величиной потока тепла, отводимого от этой границы в сторону атмосферы:

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial r} \right|_{r=\eta(t)} = \rho_1 q_1 \frac{d\eta}{dt}. \quad (11)$$

где q_1 — удельная теплота плавления льда.

2. Сравнение скоростей физических процессов при промерзании водовода

При промерзании водовода одновременно происходят два различных физических процесса: перемещение фазовой границы вода — лед от внутренней поверхности стенки внутрь трубопровода и выравнивание температуры в различных слоях водовода вследствие теплопроводности. Для сравнения скоростей протекания этих процессов оценим времена, характеризующие их продолжительность.

Как известно, в неравномерно нагретом теле конечных размеров решение уравнения теплопроводности для процесса выравнивания температуры может быть найдено методом разделения переменных. При этом решение имеет вид ряда [13]:

$$T(r, t) = \sum_k c_k f_k(r) \exp(-\gamma_k t). \quad (12)$$

где γ_k ($k = 1, 2, 3, \dots$) — набор чисел, при которых существует отличное от нуля решение задачи, c_k — числовые коэффициенты, $f_k(r)$ — некоторые функции радиальной переменной.

Скорость выравнивания температуры в теле определяется главным образом членом ряда, содержащим наименьшее значение γ_k . Обозначим его через γ_{\min} . Тогда характерное время выравнивания температуры в теле будет определяться величиной $t^* = 1/\gamma_{\min}$. Решение задачи выравнивания температуры в виде ряда (12) получено для

тел различной формы. Воспользуемся соотношениями, приведенными в [14] для γ_{\min} в случаях сплошного и полого цилиндров. Тогда, время выравнивания температуры в слое льда толщиной ξ будет $t_1^* = \xi^2 \rho_1 c_1 / \pi^2 \lambda_1$, а в слое теплоизолятора $t_3^* = \delta^2 \rho_3 c_3 / \pi^2 \lambda_3$. Отметим, что время выравнивания температуры в стенке трубы t_2^* , из-за ее меньшей, чем у теплоизолятора, толщины и большей теплопроводности, значительно меньше, чем t_3^* .

Для оценки времени t_{ph}^* образования слоя льда толщиной ξ проинтегрируем обе части уравнения (1) по промежутку (η, R_1) , предварительно умножив их на переменную r . В результате, с учетом (11), получим соотношение:

$$-R_1 \lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial r} \right|_{R_1} = -\rho_1 c_1 \int_{\eta}^{R_1} r \frac{\partial T_1}{\partial t} dr - \rho_1 q_1 \eta \frac{d\eta}{dt}. \quad (13)$$

Уравнение (13) можно записать в виде:

$$Q_{ex} = Q_c + Q_f,$$

где Q_{ex} — поток энергии, выходящий из кольцевого слоя льда в процессе замерзания трубопровода, Q_c — энергия, выделяющаяся в единицу времени в толще льда, в процессе его охлаждения, Q_f — энергия, выделяющаяся в единицу времени на внутренней поверхности кольцевого льда при замерзании воды.

Отметим, что объем охлаждаемого льда возрастает в процессе промерзания трубопровода пропорционально $R_1^2 - \eta^2$. Величина же площади поверхности, на которой выделяется энергия кристаллизации воды, наоборот, уменьшается пропорционально η . Поэтому при замерзании воды в трубопроводе величина Q_c возрастает от нуля до своего максимального значения в конце этого процесса, а величина Q_f уменьшается от максимального значения в начале процесса до нулевого значения в конце. Соответственно, на начальном

этапе замерзания трубопровода в поток энергии Q_{ex} основной вклад вносит энергия Q_f выделяющаяся при замерзании воды, а на конечном этапе в Q_{ex} основной вклад вносит энергия Q_c , выделяющаяся при охлаждении льда. Для детализации ролей Q_c и Q_f введем средние значения $(\partial T_1 / \partial t)_{cp} = \Delta T_1 / t_{ph}^*$ и $(d\eta / dt)_{cp} = \xi / t_{ph}^*$. Перепад температур ΔT_1 в слое льда толщиной ξ с помощью условия (7) выражается через $\Delta T = T_{ph} - T_{ex}$:

$$\Delta T_1 = \frac{\xi \lambda_3}{\delta \lambda_1} \Delta T. \quad (14)$$

Здесь учтено, что, благодаря малой толщине стенки $\Delta R = R_2 - R_1$, $\Delta T_1 + \Delta T_3 \approx \Delta T$. Теперь получаем:

$$\frac{Q_c}{Q_f} = \frac{1}{2} \frac{R_1 \lambda_3 c_1 \Delta T}{\delta \lambda_1 q_1} \frac{1 - (\eta / R_1)^2}{\eta / R_1}.$$

Используем здесь значения $R_1 / \delta = 5$, $\lambda_3 = 0,04$ Вт/(м · К), $\lambda_1 = 2,2$ Вт/(м · К), $c_1 = 2100$ Дж/(кг · К), $\Delta T = 30$ К и $q_1 = 0,333 \cdot 10^6$ Дж/(кг · К). Получаем, что $Q_c > Q_f$ только при $\eta / R_1 < 0,01$. Причем уже при $\eta / R_1 > 0,1$ отношение $Q_c / Q_f < 0,1$. Это позволяет при оценке времени перемещения фазовой границы t_{ph}^* пренебречь первым членом в правой части (13), т. е. величиной Q_c . Подставляя в (13) значение $(\partial T_1 / \partial r)|_{R_1} = \Delta T_1 / \xi$ и учитывая соотношение (14), получаем:

$$\rho_1 q_1 \eta \frac{d\eta}{dt} = - \frac{R_1 \lambda_3 \Delta T}{\delta}.$$

Решение этого уравнения при начальном условии $\eta(0) = R_1$ определяет характерное время намерзания слоя льда толщиной $\xi = R_1 - \eta$:

$$t_{ph}^*(\eta) = \frac{R_1 \delta \rho_1 q_1}{2 \lambda_3 \Delta T} \left(1 - \frac{\eta^2}{R_1^2} \right). \quad (15)$$

Теперь для отношений характерных времен получаем:

$$\frac{t_1^*}{t_{ph}^*} = \frac{1}{\pi^2} \frac{\xi \lambda_3 c_1 \Delta T}{\delta \lambda_1 q_1} \frac{1}{1 - \xi / 2R_1}, \quad (16)$$

$$\frac{t_3^*}{t_{ph}^*} = \frac{1}{\pi^2} \frac{\delta \rho_3 c_3 \Delta T}{\xi \rho_1 q_1} \frac{1}{1 - \xi / 2R_1}. \quad (17)$$

Используя значения $\lambda_1 = 2,2$ Вт/(м · К), $\lambda_3 = 0,04$ Вт/(м · К), $\rho_1 = 920$ кг/м³, $\rho_3 = 100$ кг/м³, $c_1 = 2100$ Дж/(кг · К), $c_3 = 840$ Дж/(кг · К), $q_1 = 330$ кДж/кг и $\Delta T = 30$ °С, из (16), (17) получаем, что на всем протяжении процесса промерзания водовода $t_1^* / t_{ph}^* < 10^{-2}$, а $t_3^* / t_{ph}^* = 10^{-3} \delta / \xi$. Последнее отношение мало всюду, кроме самого начала процесса намерзания льда, когда δ / ξ велико. Отметим, что наличие такого краткого этапа не оказывает заметного влияния на расчет времени промерзания трубопровода и в приближенной модели будет считаться, что t_3^* / t_{ph}^* мало всегда.

Малость отношений t_1^* / t_{ph}^* и t_3^* / t_{ph}^* означает, что процесс выравнивания температуры во всех слоях конструкции водовода, в течение большей части времени промерзания, проходит существенно быстрее, чем процесс нарастания слоя льда на внутренней поверхности трубопровода. Соответственно, в каждый момент времени, благодаря теплопроводности, успевает установиться радиальное распределение температуры такое, как если бы фазовая граница была неподвижной.

Это позволяет для получения явных формул для времени промерзания водовода использовать приближенную модель. В этой модели при расчете радиального распределения температуры используются стационарные уравнения теплопроводности (1) — (3) с фиксированной границей при $r = \eta(t)$, а перемещение этой границы по-прежнему находится из (11). Такое приближение принято называть квазистационарным.

3. Расчет времени промерзания в квазистационарном приближении

Квазистационарное приближение включает в себя стационарные уравнения теплопроводности для каждого слоя водовода:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0, \quad \eta(t) < r < R_1, \text{ для льда,} \quad (18)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_2}{\partial r} = 0, \quad R_1 < r < R_2, \text{ для стенки трубы,} \quad (19)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_3}{\partial r} = 0, \quad R_2 < r < R_3, \text{ для теплоизолятора.} \quad (20)$$

Граничные условия для (18) — (20) остаются прежними: (5) — (7) и (10). Уравнения (18) — (20) имеют явное решение:

$$T_i(r) = c_{i1} \ln(r) + c_{i2}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (21)$$

Здесь c_{i1} и c_{i2} — константы, которые определяются из граничных условий (5) — (7) и (10). После подстановки (21) в граничные условия получаем систему из шести линейных относительно коэффициентов c_{i1} и c_{i2} уравнений:

$$\begin{aligned} c_{11} \ln \eta + c_{12} &= T_{ph} \\ c_{11} \ln R_1 + c_{12} &= c_{21} \ln R_1 + c_{22} \\ c_{21} \ln R_2 + c_{22} &= c_{31} \ln R_2 + c_{32} \\ \lambda_1 c_{11} &= \lambda_2 c_{21} \\ \lambda_2 c_{21} &= \lambda_3 c_{31} \\ c_{31} \ln R_3 + c_{32} &= T_{ex} \end{aligned}$$

Решение линейной системы имеет громоздкий вид. Приведем здесь выражение для коэффициента c_{11} , который необходим для определения положения фазовой границы $\eta(t)$:

$$c_{11} = - \frac{T_{ph} - T_{ex}}{\frac{\lambda_1}{\lambda_3} \ln \frac{R_3}{R_2} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln \frac{R_2}{R_1} - \ln \eta}. \quad (22)$$

После подстановки (21) в (11) получаем дифференциальное уравнение для $\eta(t)$:

$$\frac{\eta d\eta}{c_{11}(\eta)} = \frac{\lambda_1}{\rho_1 q_1} dt.$$

Решение этого уравнения, с учетом (22) и начального условия $\eta(0) = R_1$, имеет вид:

$$t^{qu}(\eta) = \frac{\rho_1 q_1}{2\lambda_1(T_{ph} - T_{ex})} \times \left[\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_3} \ln \frac{R_3}{R_2} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{2} \right) \times \left[\times (R_1^2 - \eta^2) + \eta^2 \ln \frac{\eta}{R_1} \right] \right]. \quad (23)$$

где $t^{qu}(\eta)$ — время, необходимое для перемещения фазовой границы в точку с радиальной координатой η , т. е. время нарастания слоя льда толщиной $\xi = R_1 - \eta$. При решении практических задач важное значение имеют время замерзания половины поперечного сечения $t_{1/2}^{qu} = t^{qu}(R_1 / \sqrt{2})$ и время полного промерзания трубопровода $t_f^{qu} = t^{qu}(0)$. Выражения для этих величин имеют вид:

$$t_{1/2}^{qu} = \frac{\rho_1 q_1 R_1^2}{4\lambda_1(T_{ph} - T_{ex})} \times \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_3} \ln \frac{R_3}{R_2} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{2}(1 - \ln 2) \right], \quad (24)$$

$$t_f^{qu} = \frac{\rho_1 q_1 R_1^2}{2\lambda_1(T_{ph} - T_{ex})} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_3} \ln \frac{R_3}{R_2} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{2} \right). \quad (25)$$

Как видно из (24) и (25), время полного промерзания практически вдвое больше времени замерзания половины поперечного сечения: $t_f^{qu} \approx 2t_{1/2}^{qu}$.

Отметим здесь, что в реальных условиях температура наружной поверхности водовода всегда несколько выше, чем температура окружающей среды (в работе предполагается, что $T_{ex} = \text{const}$ и $T_{ex} < 0^\circ\text{C}$). Это приводит к тому, что значения времени промерзания, полученные при использовании условия (10), всегда будут несколько меньше, чем в действительности. Относительная погрешность времени промерзания ε_f определяется при этом, очевидно, соотношением (9): $\varepsilon_f = \varepsilon_T$.

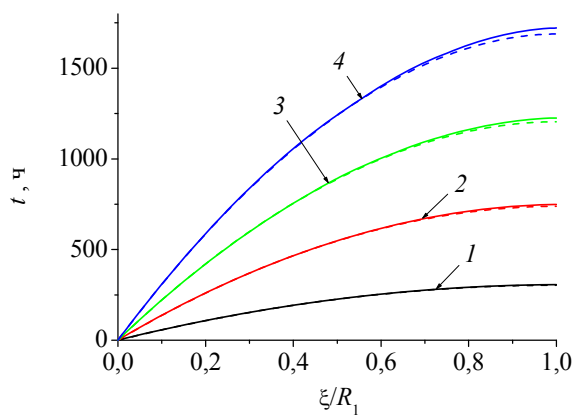
4. Результаты вычислений и обсуждение

Зависимость времени промерзания водовода от основных параметров задачи хорошо видна из соотношений (23) — (25). Прежде всего отметим, что время промерзания прямо пропорционально плотности ρ_1 и удельной теплоте плавления льда q_1 и обратно пропорционально разности температур плавления и наружного воздуха $\Delta T = T_{ph} - T_{ex}$. Зависимость от остальных параметров более сложная. Приблизительно, с точностью до малых членов порядка λ_3/λ_1 и λ_3/λ_2 , время промерзания зависит только от теплопроводности теплоизолятора λ_3 ($t \sim 1/\lambda_3$) и практически не зависит от теплопроводности льда λ_1 и материала стенки трубопровода λ_2 . С той же точностью время промерзания не зависит и от толщины стенок трубопровода. Зависимость от внутреннего радиуса трубопровода R_1 и толщины слоя теплоизоляции δ имеет вид $t \sim (R_1)^2 \ln(1 + \delta/R_1)$. Это означает, что при малых значениях $\delta/R_1 < 1$ время промерзания практически прямо пропорционально произведению $t \sim \delta R_1$. При больших значениях $\delta/R_1 > 1$ время t зависит от R_1 значительно сильнее: $t \sim (R_1)^2 \ln(\delta/R_1)$. При этом зависимость от δ — логарифмическая, т. е. очень слабая.

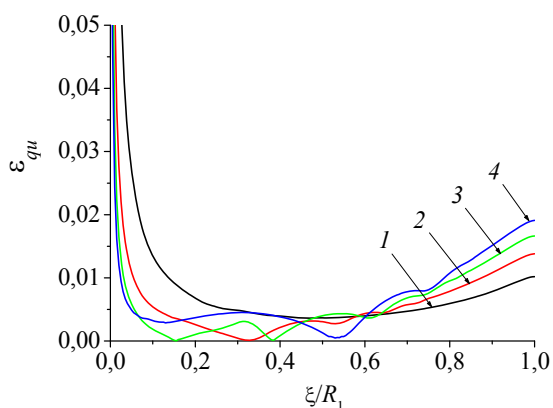
Для прямой проверки точности квазистационарного приближения (23) в работе была численно решена исходная система уравнений (1) — (3) с условиями (4) — (7), (10) и (11). С этой целью интегро-интерполяционным методом [15] была

построена разностная схема первого порядка точности по времени и второго порядка точности по радиальной переменной. Результаты расчетов приведены на рис. 2, 3. Во всех вычислениях использовалось значение толщины стенок трубопровода $\Delta R = 10$ мм. На рис. 2, а приведены графики зависимости времени нарастания слоя льда от его толщины $t(\xi/R_1)$, полученные численным решением (1) — (3) и в квазистационарном приближении (23). На рис. 2, б показаны значения относительной погрешности квазистационарного приближения $\varepsilon_{qu}(\xi) = (t(\xi) - t^{qu}(\xi))/t(\xi)$ в процессе промерзания. Хорошо видно, что погрешность квазистационарного приближения ε_{qu} на протяжении большей части процесса промерзания не превышает 1 %. В самом начале этого процесса погрешность резко возрастает. Это объясняется тем, что при малых значениях ξ отношение t_3^*/t_{ph}^* в (19) возрастает и критерий применимости квазистационарного приближения нарушается. Некоторое увеличение погрешности ε_{qu} в конце процесса промерзания объясняется возрастанием на конечном этапе роли энергии, выделяющейся при охлаждении водовода и не учитываемой в квазистационарном приближении.

На рис. 3, а приведены результаты расчетов времени промерзания половины поперечного сечения трубопровода $t_{1/2}$ в зависимости от его внутреннего радиуса R_1 при различных значениях толщины слоя теплоизоляции δ , а на рис. 3, б — относительная погрешность $\varepsilon_{1/2}$ этого времени, рассчитанного в квазистационарном приближении (24): $\varepsilon_{1/2} = |t_{1/2} - t_{1/2}^{qu}|/t_{1/2}$. Хорошо видно, что величина $\varepsilon_{1/2} \sim 1\%$ при условии, что $\delta/R_1 < 1$. В случае, когда $\delta/R_1 > 1$, из (24) следует, что характерное время $t_{ph}^* \sim (R_1)^2 \ln(1 + \delta/R_1)$, и вместо (19) получаем $t_3^*/t_{ph}^* \approx 0,004(\delta/R_1)^2$. При больших значениях δ/R_1 скорость промерзания становится сравнимой или даже больше, чем скорость процесса выравнивания температуры в теплоизоляторе. При этом критерий применимо-

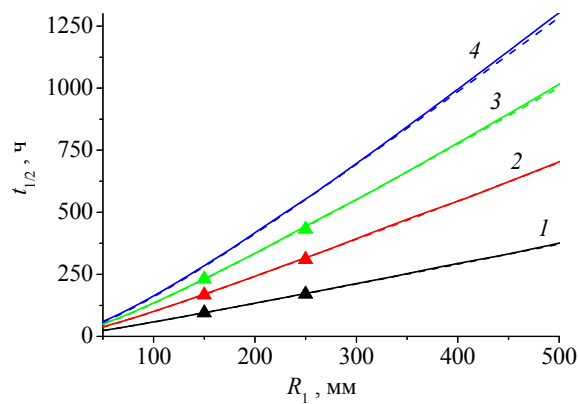


a

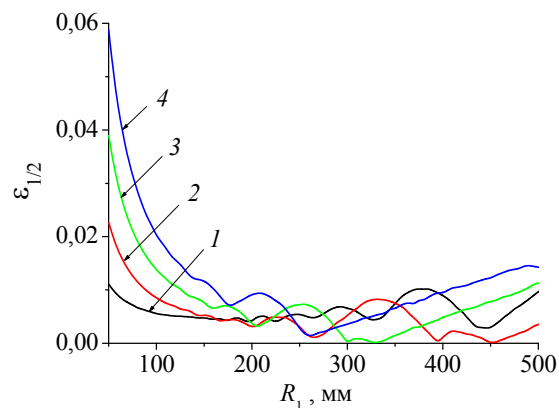


б

Рис. 2. Динамика роста кольцевого слоя льда при температуре наружного воздуха $T_{ex} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$, толщине слоя теплоизоляции $\delta = 100\text{ мм}$ и различных значениях R_1 : 1 — 100 мм, 2 — 200 мм, 3 — 300 мм, 4 — 400 мм; а — зависимость $t(\xi/R_1)$ времени намерзания слоя льда от его относительной толщины: сплошные линии — численный расчет, пунктир — квазистационарное приближение (23); б — относительная погрешность ϵ_{qu} квазистационарного приближения (23) в процессе промерзания



a



б

Рис. 3. Зависимость времени промерзания половины поперечного сечения трубопровода $t_{1/2}$ (а) и относительной погрешности квазистационарного приближения $\epsilon_{1/2} = |t_{1/2} - t_{qu}^{1/2}|/t_{1/2}$ (б) от величины внутреннего радиуса трубопровода R_1 при температуре наружного воздуха $T_{ex} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и различных значениях толщины слоя теплоизоляции δ : 1 — 50 мм, 2 — 100 мм, 3 — 150 мм, 4 — 200 мм. Сплошные линии — численный расчет, пунктир — квазистационарное приближение (24), $\blacktriangle, \blacktriangle, \blacktriangle$ — данные [6]

сти квазистационарного приближения нарушается и погрешность $\epsilon_{1/2}$ резко возрастает.

Отметим здесь, что результаты расчетов отличаются от результатов, полученных в [6] при использовании граничного условия (8) и значениях $R_1 = 150\text{ мм}$ и $R_1 = 250\text{ мм}$, не более чем на 2 %.

Заключение

В настоящей работе выполнен анализ процесса промерзания надземного водовода после прекращения движения в нем воды. Сформулирована математическая модель процесса промерзания для случая постоянной отрицательной температуры наружного воздуха. Для широкого диапа-

зона параметров водовода численно исследована динамика промерзания. Для времени промерзания водовода в рамках квазистационарного приближения получены простые формулы и установлены критерии их применимости. Выполнено сравнение численного решения уравнений исходной математической модели с результатами, полученными в рамках квазистационарного приближения.

Результаты, полученные в работе, позволяют оценить время, в течение которого должны быть выполнены ремонтные работы и восстановлено движение воды в трубопроводе прежде, чем произойдет его разрушение вследствие перемерзания.

Библиографический список

1. Богословский П. А. Ледовый режим трубопроводов гидроэлектрических станций / П. А. Богословский. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1950. — 154 с.
2. Жидких В. М. Ледовый режим трубопроводов / В. М. Жидких, Ю. А. Попов. — Л.: Энергия, 1979. — 132 с.
3. Cheng K. C. Freezing and melting heat transfer in engineering: Selected topics on ice-water systems and welding and casting processes / K. C. Cheng, N. Seki. — New York: Hemisphere, 1991. — 815 p.
4. Gordon J. R. An Investigation into Freezing and Bursting Water Pipes in Residential Construction / J. R. Gordon // Research Report, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, USA. — 1996. — Iss. 96-1P. — Pp. 1–51. — URL: <https://www.ideals.illinois.edu/items/54859>.
5. Akyurt M. Freezing phenomena in ice-water systems / M. Akyurt, G. Zaki, B. Habeebullah // Energy Conversion and Management. — 2002. — Vol. 43. — Pp. 1773–1789.
6. Терехов Л. Д. Технологические основы энергосбережения при подаче воды по водоводам на Севере: дисс. ... д-ра техн. наук / Л. Д. Терехов. — Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 1999. — 275 с.
7. McDonald A. Mathematical simulation of the freezing time of water in small diameter pipes / A. McDonald, B. Bscheiden, E. Sullivan et al. // Applied Thermal Engineering. — 2014. — Vol. 73(1). — Pp. 142–153.
8. Hongfei Xu. Modelling ice and wax formation in a pipeline in the Arctic environment / Xu Hongfei, H. Dali, S. Yue et al. // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 2020. — Vol. 66. — Pp. 104197. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104197>.
9. Терехов Л. Д. Внутреннее обледенение водоводов в зимний период / Л. Д. Терехов, Н. В. Твардовская, Е. А. Твардовская // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов, Санкт-Петербург, 2–3 декабря 2021 года. — СПб: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. — Т. 2. — С. 161–164.
10. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. — М.: Энергия, 1977. — 344 с.
11. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. — М.: Атомиздат, 1979. — 416 с.
12. ГОСТ 21880—2011. Маты из минеральной ваты прошивные теплоизоляционные / Редактор В. Н. Копысов. — М.: Стандартинформ, 2012. — 10 с.
13. Ландау Л. Д. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — М.: Наука, 1986. — 736 с.
14. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. — М.: Высшая школа, 1967. — 600 с.
15. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. — М.: Наука, 1989. — 616 с.

Дата поступления: 01.08.2023

Решение о публикации: 31.08.2023

Контактная информация:

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

Freezing Time Calculation of the Above-Ground Water Pipeline Under Conditions of Negative Temperatures

V. F. Lapshin

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

For citation: Lapshin V. F. Freezing Time Calculation of the Above-Ground Water Pipeline Under Conditions of Negative Temperatures // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 740–750. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-740-750

Summary

Purpose: When the water movement in the pipeline is stopped in conditions of negative temperatures, its freezing and destruction are possible, which leads to the failure of water supply systems for a long time. For accident-free operation of the water pipeline, it is important to know the time during which its complete or partial freezing occurs. The purpose of this work is to study the physical processes that occur during freezing, to formulate the basic mathematical model and its numerical solution, to build an analytical solution in a quasi-stationary approximation, to obtain formulas that are convenient for freezing time calculation and to determine the range of parameter values at which they are valid. **Methods:** The mathematical model of the freezing process relies on the use of energy conservation law. When constructing a difference scheme, the integro-interpolation method is used to numerically solve the nonlinear differential equations of the model. To obtain an approximate analytical solution, the method of separating equations describing processes that occur at different speeds, is used. **Results:** The mathematical model of pipeline freezing during water movement shutdown under conditions of constant negative temperature of the surrounding atmosphere has been formulated and substantiated. Within the framework of the quasi-stationary approximation, simple formulas for the freezing time of the water pipeline have been obtained. The criteria for the applicability of these formulas have been established. The numerical solution of equations of initial mathematical model is compared with the results obtained within quasi-stationary approximation. **Practical significance:** The ratios obtained in the work make it possible to estimate the time during which repair work should be carried out and the movement of water in the pipeline should be restored before its destruction due to freezing occurs.

Keywords: Above-ground water pipeline, internal icing, freezing time, mathematical modeling, quasi-stationary approximation.

References

1. Bogoslovskiy P. A. *Ledovyy rezhim truboprovodov gidroelektricheskikh stantsiy* [Ice regime of pipelines of hydroelectric stations]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1950, 154 p. (In Russian)
2. Zhidkikh V. M., Popov Yu. A. *Ledovyy rezhim truboprovodov* [Ice regime of pipelines]. Leningrad: Energiya Publ., 1979, 132 p. (In Russian)
3. Cheng K. C., Seki N. Freezing and melting heat transfer in engineering: Selected topics on ice-water systems and welding and casting processes. New York: Hemisphere, 1991, 815 p.
4. Gordon J. R. An Investigation into Freezing and Bursting Water Pipes in Residential Construction. Research Report, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, USA, 1996, Iss. 96-1P, pp. 1–51. URL: <https://www.ideals.illinois.edu/items/54859>.
5. Akyurt M., Zaki G., Habeebullah B. Freezing phenomena in ice–water systems. *Energy Conversion and Management*, 2002, vol. 43, pp. 1773–1789.

6. Terekhov L. D. *Tekhnologicheskie osnovy energosberazheniya pri podache vody po vodovodam na Severe: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Technological foundations of energy saving when supplying water through water lines in the North: diss. ... Dr. tech. Sciences]. Khabarovsk: Dal'nevostochnyy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 1999, 275 p. (In Russian)
7. McDonald A., Bscheiden B., Sullivan E. et al. Mathematical simulation of the freezing time of water in small diameter pipes. *Applied Thermal Engineering*, 2014, vol. 73(1), pp. 142–153.
8. Hongfei Xu., Dali H., Yue S. et al. Modelling ice and wax formation in a pipeline in the Arctic environment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, vol. 66, pp. 104197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104197>.
9. Terekhov L. D., Tvardovskaya N. V., Tvardovskaya E. A. *Vnutrennee obledenenie vodovodov v zimniy period. III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov, Sankt-Peterburg, 2–3 dekabrya 2021 goda* [Internal icing of conduits in winter. III Betancourt International Engineering Forum: Proceedings, St. Petersburg, December 2–3 2021]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2021, vol. 2, pp. 161–164. (In Russian)
10. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teplopere-dachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow: Energiya Publ., 1977, 344 p. (In Russian)
11. Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the theory of heat transfer]. Moscow: Atomizdat Publ., 1979, 416 p. (In Russian)
12. *GOST 21880—2011. Maty iz mineral'noy vaty proshivnye teploizolyatsionnye. Redaktor V. N. Kopysov* [GOST 21880—2011. Heat-insulating pierced mineral wool mats. Editor V. N. Kopysov]. Moscow: Standartinform Publ., 2012, 10 p. (In Russian)
13. Landau L. D., Lifshits E. M. *Teoreticheskaya fizika: Uchebnoe posobie. V 10 t. T. VI. Gidrodinamika* [Theoretical Physics: Textbook. In 10 vol. Vol. VI. Hydrodynamics]. Moscow: Nauka Publ., 1986, 736 p. (In Russian)
14. Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1967, 600 p. (In Russian)
15. Samarskiy A. A. *Teoriya raznostnykh skhem* [Theory of difference schemes]. Moscow: Nauka Publ., 1989, 616 p. (In Russian)

Received: August 01, 2023

Accepted: August 31, 2023

Author's information:

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

УДК 504.06:622.33

Гидрологические условия формирования фитоценозов на рекультивированных отвалах угольных шахт

А. В. Харламова, А. Л. Харитоненко, В. Я. Соловьева, О. К. Суворова

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

Для цитирования: Харламова А. В., Харитоненко А. Л., Соловьева В. Я., Суворова О. К. Гидрологические условия формирования фитоценозов на рекультивированных отвалах угольных шахт // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 751–757. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-751-757

Аннотация

Цель: Исследование гидрологических условий формирования фитоценозов на рекультивированных отвалах угольных шахт. Исследовано состояние сформировавшегося фитоценоза на поверхности рекультивированного отвала угольной шахты. Выполнены в полевых условиях опыты по определению водопроницаемости отвальной породы рекультивированного террикона. Проанализировано влияние гидрологических условий на формирование фитоценозов квазиприродных ландшафтов. **Методы:** Анализ состояния фитоценоза рекультивированного террикона с определением водопроницаемости отвальной породы. **Результаты:** Установлено, что продуктивность фитоценозов на рекультивированных отвалах угольных шахт напрямую зависит от гидрологических свойств сформированных почвогрунтов и эффективнее на участках, на которых процесс почвообразования практически завершен. **Практическая значимость:** Показано, что наиболее благоприятно сложившиеся гидрологические условия на поверхности рекультивированных отвалов угольных шахт способствуют формированию фитоценозов на уровне естественных ландшафтов.

Ключевые слова: Шахта, породный отвал, террикон, квазиприродный ландшафт, фитоценоз, водопроницаемость, склон, отвальная порода, почвогрунт.

Введение

Среди всех веществ, имеющих на Земле, вода, благодаря своеобразию своих физических и химических свойств, занимает исключительное положение в природе и играет особую роль в жизни человека. Поверхность нашей планеты покрыта водой практически на три четверти, и вода по праву считается источником жизни на Земле. Все вещества планеты, будь то живые тела, горные породы, минералы, включают ее в свой состав. В то же время именно вода является одним из природных лимитирующих факторов

на территории Донбасса, крупнейшего угледобывающего региона, где располагается Донецкий угольный бассейн. В результате проводимой интенсивной угледобычи данный регион перенасыщен отвалами пустой породы — терриконами. Такие территории являются зонами повышенной экологической опасности [1, 2]. В целях предотвращения вредного воздействия терриконов на окружающую среду следует осуществлять рекультивацию отвальной породы. В частности, при выполнении биологического этапа рекультивации необходимо учитывать гидрологические

факторы, оказывающие значительное влияние на эффективность формирования фитоценозов на отвалах [3].

Основной **целью** работы является исследование сложившихся гидрологических условий формирования фитоценозов квазиприродных ландшафтов рекультивированных отвалов угольных шахт.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Исследовать состояние сформировавшегося фитоценоза на поверхности рекультивированного отвала угольной шахты.
2. Выполнить в полевых условиях опыты по определению водопроницаемости отвальной породы рекультивированного террикона.
3. Проанализировать влияние гидрологических условий на формирование фитоценозов квазиприродных ландшафтов.

Материалы и методы исследования

Осуществляемые в данной работе исследования по определению гидрологических условий формирования фитоценозов на поверхности терриконов проводились на типичном отвале угольной шахты Донбасса. Данный отвал располагается в поселке Сутоган Лутугинского района Луганской Народной Республики. Типичность отвала определялась наличием перечня характерных показателей: высотой, площадью поверхности, видовыми и таксационными показателями растительности и древостоя и др.

Объекты шахты, включая исследуемый отвал, располагаются в степной зоне, где преимущественно господствует разнотравно-типчачково-ковыльная растительность. Однако с началом эксплуатации шахты естественные ландшафты разрушались и постепенно преобразовывались в техногенные с высокой негативной нагрузкой на окружающую природную среду.

К факторам негативного воздействия на прилегающие территории следует отнести: разработку месторождений каменного угля подземным способом, складирование пустой породы и формирование отвалов. Также в районе исследования вблизи шахты располагаются промышленные предприятия, железнодорожные линии, автотрассы, которые являются источниками воздействия на атмосферу [1, 4].

На исследуемой территории обнаруживается значительная деформация земной поверхности, которая присуща территориям III–IV групп (то есть не имеет экологически опасных изменений в геологической среде) и стала результатом эксплуатационной деятельности шахты [5–8].

Такие антропогенные формы рельефа, как отвалы, пустыри, отстойники, свалки, являются фактором прямого отрицательного воздействия на природные ландшафты района, что привело к гибели фитоценозов, формированию новых растительных группировок, нарушению развития растений, снижению их общей продуктивности.

На исследуемой территории района расположения шахты преобладают следующие древесные породы: клен остролистный (*Acer platanoides* L.), ольха черная (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), ива остролистная (*Salix acutifolia* Will), акация белая (*Robinia pseudoacacia*). Зерновые культуры характерны для пахотных земель, на территории малоэтажной застройки произрастают садовые культуры. Травянистая растительность данной местности представлена в основном тысячелистником обыкновенным (*Achillea millefolium*), васильком растопыренным (*Centaurea squarrosa*), шалфеем обыкновенным (*Salvia plebeia*), полынью австрийской (*Artemisia austriaca* Jacq.), резедой желтой (*Reseda lutea* L.), подорожником ланцетовидным (*Plantago lanceolata* L.).

После изъятия пустой породы при добыче угля подземным способом на территории иссле-



Групповой отвал шахты в поселке Сутоган Луганской Народной Республики:
 1–4 — отвал № 2 (1 — плоская вершина, 2 — северный склон, 3 — западный склон,
 4 — южный склон); 5 — отвал № 1; 6 — автомобильная дорога Луганск — Алчевск

дуемой шахты осуществлялось ее складирование в групповой действующий породный отвал плоской формы, который находится на расстоянии 3 км от центральной промплощадки шахты в юго-восточном направлении.

С целью исключить самовозгорание породы в отвале применялась современная технология ее отсыпки с использованием в качестве инертного материала глины [1, 3, 4].

Рекультивация отвалов исследуемой шахты (рисунок) проводилась в два этапа, первый — горнотехнический, осуществлялся в 1982–1983 гг. по способу Донецкого ботанического сада [3, 9]. В ходе данного этапа высота отвала понижалась за счет срезания вершины, формировалось плоское плато и наносился на поверхность всего отвала потенциально плодородный грунт. Биологический этап состоял в посадке на склонах акации белой (*Robinia pseudoacacia*) и на плоской вершине груши обыкновенной (*Pyrus communis*

L.), абрикоса обыкновенного (*Armeniaca vulgaris* Lam.) и акации белой. За счет процессов формирования естественного биоценоза склоны и вершина отвала покрылись густым травянистым покровом, который был занесен с прилегающей к отвалу степной территории, а также развился из семян, находящихся в потенциально плодородном грунте, используемом на данном этапе рекультивации. На момент проведения исследований удалось идентифицировать более 20 видов растений, которые успешно произрастают на всей поверхности отвала, среди которых: лапчатка восточная, донник лекарственный, горошек мышиный, пырей ползучий, подорожник ланцетолистный, тысячелистник степной, льнянка понтийская, сокирки полевые и др.

Известно, что продуктивность фитоценозов во многом зависит от абиотических факторов их формирования, особенно от степени увлажнения почв. Поверхность терриконов, располо-

Водопроницаемость отвальной породы и почвогрунта (мм/мин.)

№ повторности	Экспозиция проведенного исследования			
	западный склон	плоская вершина	северный склон	южный склон
1	8,29	1,25	7,09	22,75
2	8,13	0,86	11,67	29,57
3	8,55	0,96	7,77	17,98
Среднее значение	8,32	1,02	8,85	23,43

женных в степной зоне в основном состоит из аридных участков, неблагоприятных для роста и развития устойчивого растительного покрова, а также высокопродуктивного древостоя. Поэтому интерес представляло провести исследование водопроницаемости почвогрунтов рекультивированного отвала шахты поселка Сутоган Луганской Народной Республики для выявления эффективности проводимых рекультивационных мероприятий.

Для определения водопроницаемости отвальной породы и почвогрунтов использовали металлическое кольцо высотой 10 см и диаметром 5 см, которое до половины вдавливалось в почвогрунт. При этом верхняя половина кольца, находящаяся на поверхности, заполнялась водой. Секундометром измерялось время впитывания воды в отвальную породу. Процесс повторяли до тех пор, пока время впитывания уже не изменялось. Величиной водопроницаемости считали отношение высоты налитой воды (50 мм) ко времени ее впитывания.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные значения водопроницаемости почвогрунта исследованного отвала представлены в таблице.

Также было проанализировано влияние сложившихся гидрологических условий на формирование фитоценозов на поверхности отвала.

Неоднородность результатов вызвана особенностями рельефа терриконика в совокупности с влиянием погодных условий, что привело к образованию различных почвенных

составов, характерных для каждой экспозиции. Так, южный склон имеет крутой угол откоса (порядка 35–45°). Формируемый здесь плодородный слой, попадавший с вершины, а также с посадочных ям высаживаемых саженцев, по большей части смывался. Почвогрунт южного склона в основном состоит из пустой породы, видимо, имеющей высокие гигроскопические свойства, что и приводит к провальным значениям водопроницаемости. К лимитирующим факторам произрастания фитоценоза на южном склоне также относится и большая освещенность солнцем, приводящая к его большому нагреву и испарению имеющейся в почвогрунте влаги. В связи с этим на склоне южной экспозиции формируются наиболее аридные места произрастания и растительность здесь представлена всего 4 видами. Условия увлажнения здесь приближаются к сухостепным.

Значительная плотность лесонасаждений характерна для более пологого северного и западного склонов. Западный склон также имеет достаточно плотный травяной покров, видовое разнообразие насчитывает около 8 видов растений. На момент исследований здесь успели сформироваться благоприятные условия для произрастания фитоценоза. Условия увлажнения на этих склонах приближаются к лесостепным.

Значения водопроницаемости почвогрунта на вершине отвала также распределены неравномерно. Северная и центральная части вершины имеют высокую плотность как лесонасаждений, так и травяного покрова. Растительность пред-

ставлена 10 видами. Здесь почвообразовательный процесс по большей части можно назвать завершённым. Характерные значения водопроницаемости — 1,2–1,5 мм/мин. Южная же часть вершины содержит неглубокий слой плодородного грунта и уплотнённую отвальную породу. Поэтому данный участок плато покрыт травостоем до 40 % и практически не содержит лесонасаждений. Значения водопроницаемости — на уровне 0,85–1,2 мм/мин.

Выводы

Таким образом, продуктивность фитоценозов на рекультивированных отвалах угольных шахт напрямую зависит от гидрологических свойств сформированных почвогрунтов и эффективнее на участках, на которых процесс почвообразования практически завершён. Наиболее благоприятно сложившиеся гидрологические условия способствуют формированию фитоценозов на уровне естественных ландшафтов.

Библиографический список

1. Зборщик М. П. Предотвращение экологически вредных проявлений в породах угольных месторождений / М. П. Зборщик, В. В. Осокин. — Донецк: ДонГТУ, 1996. — 178 с.
2. Техногенные последствия закрытия угольных шахт Украины / Под ред. Ю. Н. Гавриленко, В. Н. Ермакова. — Донецк: Норд-Пресс, 2004. — 631 с.
3. Методические рекомендации по биологической рекультивации площадей плоских породных отвалов угольных шахт и обогатительных фабрик Украинской ССР. — Донецк: ЦБНТИ, МУП УССР, 1990. — 54 с.
4. Зубов А. Р. Геоинформационные системы терриконовых ландшафтов Луганской области / А. Р. Зубов, Л. Г. Зубова, С. Г. Воробьев // Академический вестник. — Кривой Рог, 2007. — № 19. — С. 16–17.

5. Ахтямов Р. Г. Оценка и пути уменьшения экологической опасности объектов автотранспортной инфраструктуры урбанизированной территории: автореф. дисс. на ... канд. техн. наук / Р. Г. Ахтямов. — Казань: Казанский государственный технологический университет, 2009. — 19 с.

6. Ахтямов Р. Г. Подходы к оценке критического срока эксплуатации технологического оборудования на опасных производственных объектах / Р. Г. Ахтямов, А. Н. Елизарьев, Н. С. Сенюшкин и др. // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 5. — С. 122.

7. Елизарьев А. Н. Современные технологии защиты объектов транспортной инфраструктуры на основе моделирования опасных ситуаций / А. Н. Елизарьев, Р. Г. Ахтямов, С. Г. Аксенов и др. // Безопасность жизнедеятельности. — 2018. — № 10(214). — С. 23–28.

8. Ахтямов Р. Г. Разработка методики выявления потенциально опасных объектов / Р. Г. Ахтямов, Н. С. Сенюшкин, А. В. Суханов // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2011. — Т. 7. — № 5. — С. 192–197.

9. Методические рекомендации по защитно-мелиоративному озеленению породных отвалов. — Донецк: ДБНТИ, МУП УССР, 1980. — 24 с.

Дата поступления: 28.05.2023

Решение о публикации: 01.07.2023

Контактная информация:

ХАРЛАМОВА Алина Вадимовна — канд. техн. наук, доц.; alavina@yandex.ru

ХАРИТОНЕНКО Александр Леонидович — канд. техн. наук, доц.; tsar-87@mail.ru

СОЛОВЬЕВА Валентина Яковлевна — д-р техн. наук, проф.

СУВОРОВА Ольга Константиновна — канд. физ.-мат. наук, доц.; suolko@gmail.com

Hydrological Conditions for the Formation of Phytocenoses on Reclaimed Colliery Spoil Heaps

A. V. Kharlamova, A. L. Kharitonenko, V. Ya. Solovieva, O. K. Suvorova

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

For citation: Kharlamova A. V., Kharitonenko A. L., Solovieva V. Ya., Suvorova O. K. Hydrological Conditions for the Formation of Phytocenoses on Reclaimed Colliery Spoil Heaps // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 751–757. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-751-757

Summary

Purpose: Study of the hydrological conditions for the formation of phytocenoses on reclaimed colliery spoil heaps. The state of the formed phytocenosis on the surface of the reclaimed colliery spoil heap has been studied. Experiments have been carried out in field conditions to determine the permeability of the spoil material of the reclaimed spoil heap. The influence of hydrological conditions on the formation of phytocenoses in quasi-natural landscapes is analyzed. **Methods:** Analysis of the state of the phytocenosis of the reclaimed spoil heap with the determination of the water permeability of the spoil material. **Results:** It has been established that the productivity of phytocenoses on reclaimed spoil heaps of coal mines directly depends on the hydrological properties of the formed soils, and is more effective in areas where the process of soil formation is almost completed. **Practical significance:** It is shown that the most favorable hydrological conditions on the surface of the reclaimed colliery spoil heaps contribute to the formation of phytocenoses at the level of natural landscapes.

Keywords: Mine, slag heap, spoil heap, quasi-natural landscape, phytocenosis, water permeability, slope, spoil material, soil.

References

1. Zborshhik M. P., Osokin V. V. Predotvrashhenie ekologicheskoi vrednykh pojavlenij v porodakh ugol'nykh mestorozhdenij [*Prevention of environmentally harmful manifestations in the rocks of coal deposits*]. Doneck: DonGTU Publ., 1996, 178 p. (In Russian)
2. *Tekhnogennye posledstviya zakrytiya ugol'nykh shaht Ukrainy*. Pod red. Yu. N. Gavrilenko, V. N. Ermakova [Technogenic consequences of the closure of coal mines in Ukraine]. Doneck: Nord-Press Publ., 2004, 631 p. (In Russian)
3. *Metodicheskie rekomendacii po biologicheskoi rekul'tivacii ploschadej ploskih porodnykh otvalov ugol'nykh shaht i obogatitel'nykh fabrik Ukrainskoj SSR* [Guidelines for the biological reclamation of areas of flat rock dumps in coal mines and processing plants in the Ukrainian SSR]. Doneck: CBNTI, MUP USSR Publ., 1990, 54 p. (In Russian)
4. Zubov A. R., Zubova L. G., Vorob'ev S. G. Geoinformacionnye sistemy terrikonovykh landshaftov Luganskoj oblasti [Geoinformation systems of waste heap landscapes of the Luhansk region]. *Akademicheskij vestnik* [Academic Bulletin]. Krivoy Rog, 2007, Iss. 19, pp. 16–17. (In Russian)
5. Ahtyamov R. G. *Otsenka i puti umen'sheniya ekologicheskoi opasnosti ob'ektov avtotransportnoy infrastruktury urbanizirovannoy territorii: avtoref. diss. na ... kand. tekhn. nauk; Kazanskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskij universitet* [Evaluation and ways to reduce the environmental hazard of the objects of the motor transport infrastructure of an urbanized territory: author. diss. on ... cand. tech. Sciences]. Kazan': Kazan State Technological University Publ., 2009, 19 p. (In Russian)
6. Ahtyamov R. G., Elizar'ev A. N., Senyushkin N. S. et al. Podhody k ocenke kriticheskogo sroka ekspluatatsii tekhnologicheskogo oborudovaniya na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektah [Approaches to assessing the critical life of technological equipment at hazardous production facilities]. *Sovremennye problemy nauki i*

obrazovaniya [Modern problems of science and education]. 2012, Iss. 5, p. 122. (In Russian)

7. Elizar'ev A. N., Ahtyamov R. G., Aksenov S. G. et al. *Sovremennye tekhnologii zashchity ob'ektov transportnoj infrastruktury na osnove modelirovaniya opasnykh situacij* [Modern technologies for the protection of transport infrastructure facilities based on the simulation of dangerous situations]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety]. 2018, Iss. 10(214), pp. 23–28. (In Russian)

8. Ahtyamov R. G., Senyushkin N. S., Suhanov A. V. *Razrabotka metodiki vyyavleniya potencial'no opasnykh ob'ektov* [Development of a methodology for identifying potentially hazardous objects]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University]. 2011, vol. 7, Iss. 5, pp. 192–197. (In Russian)

9. *Metodicheskie rekomendacii po zashchitno-meliorativnomu ozeleneniyu porodnykh otvalov* [Guidelines for protective and reclamation landscaping of rock dumps]. Doneck: DBNTI, MUP USSR Publ., 1980, 24 p. (In Russian)

Received: May 28, 2023

Accepted: July 01, 2023

Author's information:

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

Alexander L. KHARITONENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; tsar-87@mail.ru

Valentina Ya. SOLOVIEVA — Dr. Sci. in Engineering, Professor

Olga K. SUVOROVA — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor; suolko@gmail.com



УДК 621.396.65

Применение технологии интернета вещей для передачи данных от автоматического измерителя сопротивления заземления

О. Г. Евдокимова, С. М. Куценко, Б. А. Мешков

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

Для цитирования: *Евдокимова О. Г., Куценко С. М., Мешков Б. А.* Применение технологии интернета вещей для передачи данных от автоматического измерителя сопротивления заземления // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 758–767. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-758-767

Аннотация

Цель: Организовать оперативный автоматический контроль реального состояния одного из важных технических элементов дирекции связи и дирекции инфраструктуры компании ОАО «РЖД» — заземлителя устройств связи и сигнализации, централизации, блокировки (СЦБ). **Методы:** Сравнительный анализ технических характеристик, существующих на соответствующем рынке телекоммуникационного оборудования устройств, реализующих технологию интернета вещей, и типовых решений коммутации различных устройств с единой системой мониторинга и администрирования (ЕСМА). **Результаты:** Получено оптимальное решение для сбора и автоматической передачи информации такого параметра, как электрическое сопротивление заземлителя. Предложено техническое решение, позволяющее согласовать сбор информации посредством необходимых датчиков, применяемых при реализации технологии интернета вещей, сетевого оборудования и передачу информацию в ЕСМА посредством модульно-диагностического комплекса и передающих устройств (коммутационного оборудования и мультиплексоров) ООО «КБ Пульсар-Телеком». **Практическая значимость:** Предложено комплексное решение по сбору, передаче и контролю состояния объекта, позволяющее оперативно реагировать на изменение столь важного параметра, как сопротивление заземлителя, с целью планирования деятельности ремонтно-оперативных, восстановительных бригад и других служб предприятий дирекций связи и инфраструктуры. Проведен сравнительный анализ трех технологий интернета вещей — LoRaWAN, NB-IoT, СТРИЖ, позволяющий оценить достоинства и недостатки каждой при достижении поставленной цели.

Ключевые слова: Интернет вещей, единая система мониторинга и администрирования, автоматическое измерение сопротивления заземления, LoRaWAN, NB-IoT, СТРИЖ.

Введение

Различные нормативные документы требуют поддержания определенного значения сопротивления заземления (для электробезопасности и по другим причинам) в течение всего периода эксплуатации заземляющего устройства. Изме-

рения сопротивления заземления производятся ежегодно, однако эти сведения зачастую недостаточно актуально отражают реальное состояние системы заземления объекта, которое может измениться под воздействием различных факторов.

В рамках мероприятий, во исполнение распоряжения Правительства Российской Федерации [1], проводимых в настоящее время в ОАО «РЖД», решаются задачи по техническому развитию и цифровизации. Некоторыми из направлений этой деятельности являются:

- а) разработка и внедрение перспективных технических средств и технологий;
- б) внедрение инновационных систем автоматизации и механизации станционных процессов;
- в) модернизация вычислительной и телекоммуникационной инфраструктуры, обеспечивающей гарантированный уровень доступности информационных сервисов;
- г) цифровизация работы в компании «РЖД».

Одной из задач, подлежащей решению, в рамках вышеупомянутых направлений в хозяйстве дирекции связи, дирекции инфраструктуры в области сигнализации, централизации и блокировки, может являться и автоматизация измерения сопротивления заземляющих устройств, играющих важную роль в электрической связи, автоматике и телемеханике. Для этих целей было разработано устройство для измерения сопротивления заземления, принцип работы которого подробно изложен в патенте [2].

У автоматизированной технологии измерения сопротивления существуют неавтоматизированные альтернативы:

- измерение сопротивления заземления методом амперметра-вольтметра;
- измерение методом токоизмерительных клещей.

Особенности каждого из методов измерения сопротивления заземлителей устройств автоматике и связи были подробно рассмотрены ранее [3]. Данные методы требуют непосредственного участия людей, отличаются трудоемкостью и значительными издержками при выполнении работ на дистанциях значительной протяженности.

Автоматический измеритель сопротивления заземления [2], по сравнению с другими измери-

телями сопротивления заземления [4, 5], имеет следующие преимущества:

- повышенная отказоустойчивость, обусловленная наличием электрической развязки;
- повышение экономичности непосредственно процесса измерения, поскольку устройство является автоматизированным, участие человека не требуется;
- повышение надежности работы систем измерения в результате изменения периодичности сбора данных и переходу к режиму постоянного наблюдения;
- повышение пригодности информации о значениях сопротивления заземления к цифровой обработке, хранению и передаче.

Известно, что в ОАО «РЖД» есть единая система мониторинга и администрирования (ЕСМА), которая позволяет собрать данные обо всех измерениях, выполняемых работах, в дирекции связи.

Для передачи информации от измерителя заземления в ЕСМА необходим тракт передачи. Поскольку количество измерителей, расположенных на небольшой площади, может быть значительным, а на большой территории — единичным, использование радиотракта в обеспечении функционирования системы передачи данных от автоматических измерителей сопротивления в ЕСМА является перспективным.

Технология интернета вещей и технические решения, применимые для коммутации сети в ЕСМА, позволяют минимизировать затраты на техническую реализацию процесса передачи данных от автоматических измерителей сопротивления заземления в ЕСМА

Сравнение технологий для передачи данных

В качестве тракта передачи можно использовать системы, позволяющие реализовать технологию интернета вещей, такие как LoRaWAN,

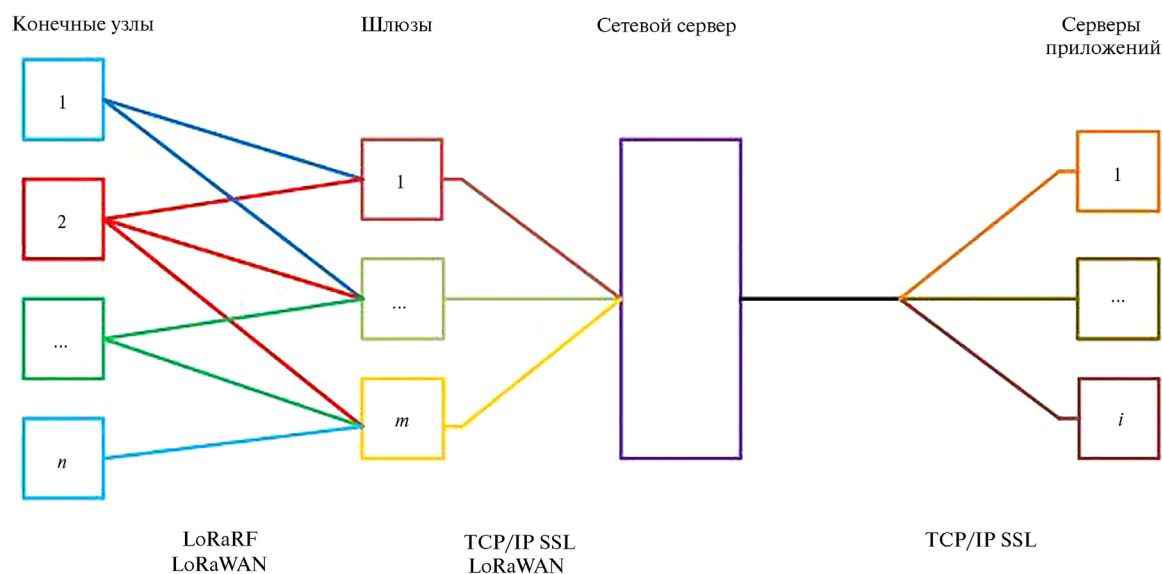


Рис. 1. Сетевая архитектура LoRaWAN

«Стриж» или NB-IoT. Рассмотрим данные технологии подробнее.

LoRa — беспроводная модуляция с расширенным спектром, которая по энергоэффективности сопоставима с частотной манипуляцией (FSK), но со значительно большей дальностью связи. Стандарт LoRa работает в сети LoRaWAN [6].

Частоты, используемые сетью, зависят от региона, где создается сеть, возможны такие варианты частотных планов, как EU868, EU433, US915, AS430. Ширина радиоканала также зависит от региона и от направления потока (вверх/вниз) [6].

Согласно данным из открытых источников [7], одним из преимуществ данной технологии является возможность ее применения на значительных расстояниях: в городских условиях около 1 км; на открытой местности до 10 км.

Напомним, что LoRaWAN — протокол связи и системной архитектуры сети интернета вещей, предварительно стандартизированный в России [8].

Протокол и сетевая архитектура наиболее сильно влияют на время работы устройств от одного элемента питания, качество связи, скорость передачи данных, безопасность и разнообразие приложений, которые могут взаимодействовать с сетью.

Данная сетевая архитектура (см. рис. 1) оптимально использует ресурсы питания, так как в сети узлы не связаны с конкретным шлюзом, а передают данные, как правило, на несколько шлюзов одновременно. Каждый шлюз, получивший пакет с конечного узла, передает его на сетевой сервер, который определяет, через какой шлюз будет происходить связь с узлом, фильтрует избыточные принятые пакеты и выполняет проверку безопасности пакетов и другие операции. Далее сетевой сервер передает данные серверам приложений для дальнейшего использования вне сети LoRaWAN по протоколу Ethernet.

Высокая пропускная способность сети LoRaWAN достигается путем использования алгоритмов, изменяющих скорость передачи данных, в зависимости от условий передачи, таких как соотношение сигнал — шум и мощность сигнала в точке приема. Скорость передачи данных определяется коэффициентом расширения (SF), изменяющимся от 7 до 12, причем $SF = 12$ — самый помехозащищенный режим с самой низкой скоростью, равной 0,25 кбит/с, а самый быстрый режим имеет скорость 5,5 кбит/с. Сообщение состоит из преамбулы

и информации. Скорость передачи данных Rb , в кбит/с, определяется [9] по формуле:

$$Rb = SF \frac{1}{\frac{2^{SF}}{BW}},$$

где BW — полоса пропускания канала, кГц.

Скорость генерации пакетов задается уравнением:

$$Rc = 2^{SF} Rb.$$

Смысл этого уравнения в том, что каждый бит кодируется в несколько пакетов. Время передачи одного символа Ts , в секундах, определяется по формуле ниже:

$$Ts = \frac{2^{SF}}{BW}.$$

Скорость передачи одного символа, в кбит/с, равна:

$$Rs = \frac{1}{Ts} = \frac{BW}{2^{SF}}.$$

Время передачи сообщения T — время, необходимое на передачу преамбулы и информации, определяется по формуле:

$$T = T_{\text{пре}} + T_{\text{инф}},$$

где $T_{\text{пре}}$ — время, необходимое для передачи преамбулы;

$T_{\text{инф}}$ — время, необходимое на передачу информации.

Время, необходимое на передачу преамбулы, равно:

$$T_{\text{пре}} = n_{\text{пре}} + 4,25 \cdot Ts,$$

где $n_{\text{пре}}$ — количество символов преамбулы, обычно при использовании LoRa 8 символов.

Время, необходимое на передачу информации, равно:

$$T_{\text{инф}} = n_{\text{инф}} Ts,$$

где $n_{\text{инф}}$ — количество символов в информационной части сообщения.

Количество символов в информационной части сообщения может быть определено по формуле:

$$n_{\text{инф}} = 8 + \max \times \left(\text{ceil} \left(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20H}{4(SF - 2DE)} \right) \times (CR + 4) \right),$$

где PL — полезная нагрузка, байт;

CRC — циклическая проверка избыточности. $CRC = 1$ — восходящий поток, $CRC = 0$ — нисходящий поток;

H — коэффициент, учитывающий содержание заголовка. $H = 0$ — заголовок содержится, $H = 1$ — заголовка нет;

DE — переменная, введенная для оптимизации передачи данных при низкой скорости;

CR — кодовая скорость — метод управления избыточностью, который имеет четыре возможных значения: 1, 2, 3 и 4. Чем больше значение, тем больше избыточность, а следовательно, и устойчивость к помехам.

Максимальная чувствительность шлюза $-141,9$ дБм [7].

В сети LoRaWAN все конечные узлы принято делить на группы: A , B и C .

Группа A — двунаправленные устройства, у которых после передачи по восходящему каналу осуществляются два коротких сеанса приема. Прием в другое время невозможен, передача производится по необходимости конечного узла.

Группа B — двунаправленные устройства, сеансы связи у которых осуществляются подобно устройствам группы A , но с дополнительными окнами приема нисходящего потока.

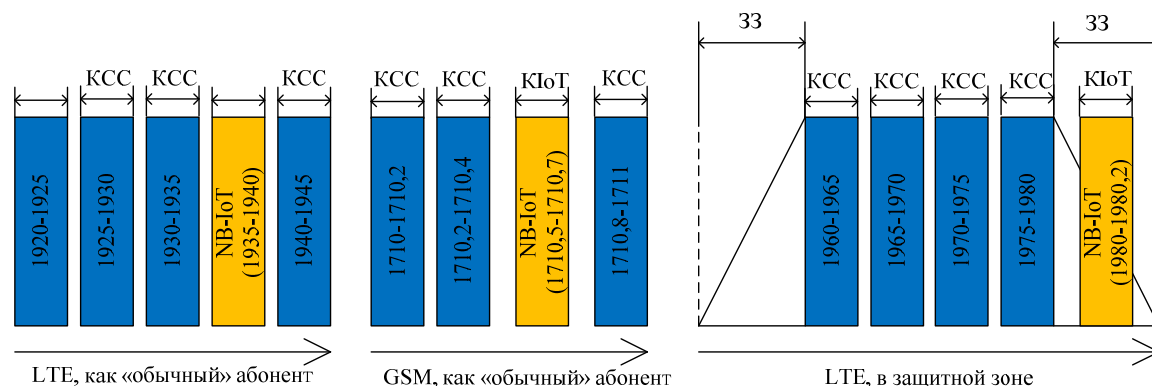


Рис. 2. Варианты подключения NB-IoT, ось абсцисс f , МГц:
 КСС — канал сети связи, 33 — защитная зона, КIoT — канал передачи IoT

Группа *C* — двунаправленные устройства с сеансами приема нисходящих каналов, ограниченными только сеансами передачи восходящих потоков.

В настоящее время компания Semtech рекомендует использовать для построения новых сетей шлюз LoRa Corecell (сеть малого радиуса, работающая в дуплексном режиме), выполненный на плате SX1302CSSXXGW1, которая имеет следующие параметры: максимальная выходная мощность в диапазоне 868 МГц = 27 дБм ($\approx 0,5$ Вт), максимальная чувствительность в диапазоне 868 МГц при $SF = 12$ равна -140 дБм ($\approx 10^{-17}$ Вт), максимальная чувствительность в диапазоне 868 МГц при $SF = 7$ равна -125 дБм, ($\approx 3,16 \cdot 10^{-16}$ Вт) [10]. Такую плату можно использовать по ее прямому назначению в малых областях с большой концентрацией датчиков, например на крупных станциях.

Стриж — отечественная технология интернета вещей, использующая дифференциальную бинарную фазовую манипуляцию DBPSK (Differential BPSK) [11].

Характеризуя «Стриж», можно отметить, что данная технология использует частоты, нелицензируемые в РФ, а именно диапазон 868,8 МГц для восходящего потока и диапазон 446 МГц для нисходящего. При используемой ширине канала, равной 100 Гц, возможно использование одновременно до 5000 каналов без коллизий.

Скорость передачи данных по документации составляет 50–25 600 бит/с [12], заявленная дальность передачи составляет до 50 км в зоне прямой видимости, при мощности передатчика до 25 мВт, а максимальная чувствительность базовой станции составляет -158 дБм [13, 14]. В данной технологии на выходе сети, для передачи конечному пользователю сети, используется протокол Ethernet.

NB-IoT (Narrow Band IoT) — стандарт интернета вещей, принятый консорциумом 3GPP в 2016 году в Release 13 (LTE Advanced Pro) [15]. Данная технология стандартизирована в России [16], использует частоты стандартов сотовой связи LTE (700, 800, 900, 1450, 1600, 1800, 1900, 2100, 2600, 3500 МГц) и GSM (450, 480, 800, 900, 1800, 1900 МГц), с шириной канала 200 кГц для диапазонов LTE или с шириной 180 кГц для частот GSM.

NB-IoT может быть развернут в уже существующих сетях сотовой связи [17] как минимум тремя способами:

- подключение в сеть LTE как «обычный» абонент;
- подключение в сеть GSM как «обычный» абонент;
- подключение в сеть LTE в защитной зоне (33).

На рис. 2 наглядно представлены описанные выше способы реализации подключения данного стандарта к сети сотовой связи разных стандартов (GSM и LTE).

Сравнительные характеристики беспроводных систем

Сопоставляемые показатели	LoRaWAN	Стриж	NB-IoT
Ширина канала, кГц	125/250	0,1	180/200
Скорость передачи данных, кбит/с	0,25–5,5	0,05–1	170 кбит/с (нисходящий поток); 250 кбит/с (восходящий поток)
Максимальная чувствительность базовой станции, дБм	–141,9	–158	–127
Дальность связи в городе до, км	1	10	3
Дальность связи на открытой местности до, км	10	50	15
Протокол шифрования	AES-128	AES-128, XTEA-256, ГОСТ Р34.12—2015	DTLS, TLS
Использование лицензируемых в РФ частот, да/нет	нет (868 МГц) да (прочие)	нет	да

NB-IoT работает в полудуплексном режиме. Максимальная чувствительность базовой станции равна –127 дБм [17]. Дальность связи в городской среде до 3 км, на сельской местности до 15 км [16]. Для защиты данных на транспортном уровне используются протоколы шифрования TLS (Transport Layer Security) и DTLS (Datagram Transport Layer Security). В данной технологии на выходе сети для передачи конечному пользователю используется протокол Ethernet [15].

Сравнительные характеристики систем представлены в таблице.

Технология LoRaWAN по сравнению с технологией «Стриж» имеет следующие преимущества:

1. Вариативность используемых частот. В некоторых районах помехи от чужих сеансов передачи могут быть настолько большими, что организация связи может быть нереализуема.

2. Скорость передачи данных, принятые базовой станцией данные актуальны.

3. Технология LoRaWAN стандартизирована в РФ.

Однако LoRaWAN уступает «Стрижу» по следующим позициям:

1. Вариативности протоколов шифрования, дающей гибкость по видам и требованиям к оборудованию.

2. Чувствительности базовой станции — принятый сигнал при передаче может испытывать большие затухания, при той же мощности передатчика.

3. Большей дальности связи — необходимо меньшее количество базовых станций для покрытия той же площади.

4. Ширине канала — позволяет использовать большее количество устройств на малой площади, но в случае с измерителями сопротивления заземления это количество избыточно.

Несмотря на то, что NB-IoT превосходит LoRaWAN по таким параметрам, как скорость передачи данных (но для случая передачи данных от датчика измерения скорость избыточна) и дальность связи, технология LoRaWAN имеет очевидные весомые преимущества по следующим параметрам:

- 1) ширина канала;
- 2) чувствительность базовой станции;
- 3) возможность использования нелицензируемого диапазона частот — не требуется лицензирование передатчиков мощностью до 25 мВт.

Вышеперечисленный анализ позволяет выбрать LoRaWAN для организации радиотракта от измерителя.

Для реализации подключения к ЕСМА лучше воспользоваться типовым решением, уже используе-

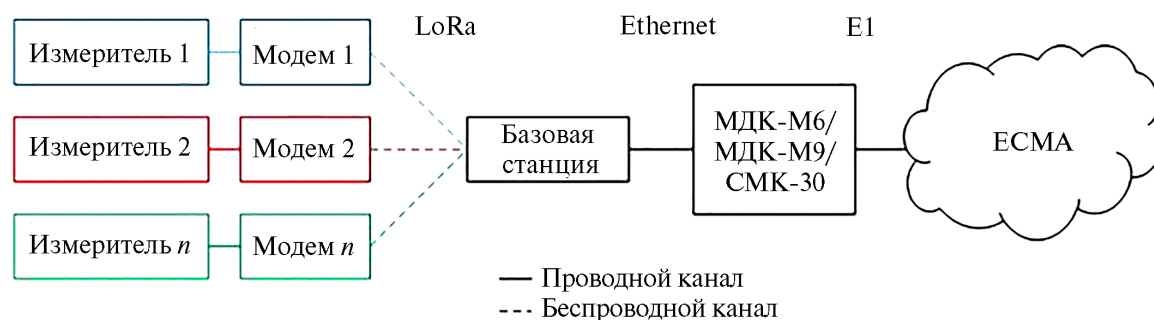


Рис. 3. Схема предполагаемой сети (на схеме E1 — цифровой поток плезисинхронной цифровой иерархии)

мым в дирекции связи ОАО «РЖД» [18–20]. Такими устройствами являются модульно-диагностические комплексы МДК и мультисервисный мультиплексор СМК-30. Производство данных устройств осуществляет ООО «КБ Пульсар-Телеком».

Среди семейства модулей МДК необходимые функции согласования ЕСМА и сторонних устройств присутствуют у моделей МДК-М4, МДК-М6 и МДК-М9.

Модули МДК-М6, МДК-М9 и мультиплексор СМК-30 имеют распространенные интерфейсы, используемые для организации сетей Ethernet, в частности RS-485.

Применение модуля МДК-М4 невозможно, поскольку он является аналого-цифровым преобразователем.

Технология интернета вещей (LoRaWAN) позволяет передать информацию с использованием протокола Ethernet, поэтому применять можно любое из устройств — МДК-М6, МДК-М9, СМК-30 — с учетом свободных портов для подключения на реальном оборудовании. В случае создания новой сети также нужно руководствоваться загруженностью предполагаемых к применению устройств.

На рис. 3 представлена схема предлагаемой системы, состоящей из автоматического измерителя сопротивления заземлителя, сети интернета вещей и продукции ООО «КБ Пульсар-Телеком».

Передача информации от модулей МДК до ЕСМА может осуществляться по протоколу

Ethernet — для этого в компании ООО «КБ Пульсар-Телеком» есть технические решения, основанные на применении различных вариантов коммутационного оборудования и мультиплексоров.

Конечный вид представления информации пользователю ЕСМА зависит от программного обеспечения и может быть выполнен в виде визуализации графиков, таблиц или других исполнений.

Автоматизация проведения измерения сопротивления заземления имеет важное практическое значение. Непрерывный мониторинг состояния заземляющего устройства существенно повысит достоверность оценки объекта и оптимизирует работу обслуживающего персонала предприятия.

В заключение отметим, что применение современных технологий и устройств для измерения сопротивления заземлителя и передачи данных в цифровую среду предприятия обеспечит проведение непрерывного мониторинга состояния заземляющих устройств, существенно повысит актуальность оценки состояния устройства и увеличит эффективность работы обслуживающего персонала при измерениях.

Библиографический список

1. Распоряжение Правительства РФ от 19 марта 2019 года № 466-р «Долгосрочная программа развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года». — URL: https://old-doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&refererLayerId=5101&id=7017.

2. Патент № 2736073 Российская Федерация. Устройство для измерения сопротивления заземления / А. М. Костроминов, А. А. Костроминов, Р. О. Ложкин и др.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». — заявл. 11.03.2020; опубл. 11.11.2020.
3. Евдокимова О. Г. Анализ методов измерения сопротивления заземлителей устройств автоматики и связи / О. Г. Евдокимова, С. Л. Шишигин, С. М. Куценко и др. // Автоматика, связь, информатика. — 2023. — № 4. — С. 27–30. — DOI: 10,34649/AT.4.4.002.
4. Патент № 140217 Российская Федерация. Устройство для измерения сопротивления заземления / А. Ю. Пасеков, М. В. Педанов, В. Д. Толмачев; заявитель и правообладатель Научно-производственная фирма Московского института энергобезопасности и энергосбережения «Приборы Мосгосэнергонадзора»; заявл. 24.12.2013; опубл. 10.05.2014.
5. Патент № 1128195 Союз Советских Социалистических Республик. Устройство для автоматического измерения сопротивления заземления / О. А. Петров, Ю. В. Ситчихин, А. И. Сидоров; заявитель и правообладатель Челябинский политехнический институт им. Ленинского комсомола; заявл. 12.07.1983; опубл. 07.12.1984.
6. LoRaWAN™ What is it? A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™. — 2015. — 20 p.
7. ETSI TR 103 526 V1.1.1 (2018-04) TECHNICAL REPORT System Reference document (SRdoc); Technical characteristics for Low Power Wide Area Networks Chirp Spread Spectrum (LPWAN-CSS) operating in the UHF spectrum below 1 GHz.
8. 2ПНСТ 516—2021. Информационные технологии. Интернет вещей. Спецификация LORAWAN RU.
9. Сингх Д. Оценка LoRa Wan Evaluation для IoT-коммуникаций / Д. Сингх, О. Г. Алиу, М. Кречмер // Международная конференция 2018 года по достижениям в области вычислительной техники, связи и информатики (ICACCI), Бангалор, Индия, 2018. — С. 163–171. — DOI: 10.1109/ICACCI.2018.8554713.
10. Semtech. — URL: <https://www.semtech.com> (дата обращения: 20.03.2023).
11. LPWAN-технология «СТРИЖ» и беспроводной протокол XNB Описание продуктов и технологии «СТРИЖ» // «Центр специальных коммуникаций», «Современные Радио Технологии». — 19 с.
12. Павлова З. Х. Современные технологии приемо-передачи измерительной информации для организации серваторных сетей мониторинга объектов нефтегазовой отрасли / З. Х. Павлова, А. Н. Краснов, Р. Р. Балтин // Международный научно-исследовательский журнал. — 2017. — № 5. — С. 79–81. — DOI: 10.23670/IRJ.2017.59.108.
13. Роенков Д. Н. Технология «Стриж» и перспективы ее применения / Д. Н. Роенков, Н. В. Яронова // Автоматика, связь, информатика. — 2017. — № 9. — С. 9–12.
14. Стриж. — URL: <https://strij.tech/> (дата обращения: 11.03.2023).
15. LTE-Advanced Pro Introduction eMBB Technology Components in 3GPP Release 13/14. White Paper — Munich, Germany: Rohde & Schwarz, 2017. — 50 p.
16. ГОСТ Р 59026—2020. Протокол беспроводной передачи данных на основе стандарта LTE В РЕЖИМЕ NB-IoT. Основные параметры. — М.: Стандартинформ, 2020. — 65 с.
17. Nokia LTE Evolution for IoT Connectivity. — Espoo, Finland: Nokia, 2017 — 18 p.
18. Дистанционный контроль // Гудок/Куйбышевский железнодорожник. — 2012. — № 16. — С. 7.
19. Куц А. В связи властвует цифра / А. Куц // Гудок/призыв. — 2016. — № 31. — С. 7.
20. КБ ПУЛЬСАР-ТЕЛЕКОМ. — URL: <https://www.pulsar-telecom.ru/> (дата обращения: 13.03.2023).

Дата поступления: 15.06.2023

Решение о публикации: 07.08.2023

Контактная информация:

ЕВДОКИМОВА Ольга Геннадьевна — канд. техн.

наук, доц. кафедры «Электрическая связь»;

evdokimova@pgups.ru

КУЦЕНКО Сергей Михайлович — канд. техн. наук,

доц., декан факультета безотрывных форм обучения;

kutsenko@pgups.ru

МЕШКОВ Баир Александрович — студент группы

AP-909, кафедра «Электрическая связь»;

bair.meshkov@yandex.ru

Application of the Internet of Things Technology for Data Transmission from an Automatic Grounding Resistance Meter

O. G. Evdokimova, S. M. Kutsenko, B. A. Meshkov

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

For citation: Evdokimova O. G., Kutsenko S. M., Meshkov B. A. Application of the Internet of Things Technology for Data Transmission from an Automatic Grounding Resistance Meter // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 758–767. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-758-767

Summary

Purpose: To organize operational automatic monitoring of the real state of one of the important technical elements of the Directorate of Communications and the Directorate of Infrastructure of JSC “Russian Railways” — of the grounding systems for communication, signaling, centralization and blockage (SCB). **Methods:** Comparative analysis of the technical characteristics of devices existing in the relevant telecommunications equipment market that implement the Internet of things technology and standard switching solutions for various devices with a unified monitoring and administration system (UMAS). **Results:** An optimal solution has been obtained for collecting and automatically transmitting information of such a parameter as the electrical resistance of the grounding device. A technical solution is proposed that allows to coordinate the collection of information by means of necessary sensors used in the implementation of the Internet of Things technology, network equipment and the transmission of information to the UMAS by means of a modular diagnostic complex and transmitting devices (switching equipment and multiplexers) provided by LLC “Pulsar-Telecom Design Bureau”. **Practical significance:** A comprehensive solution for collecting, transmitting and monitoring the condition of the object is proposed, which allows to respond promptly to changes in such an important parameter as the resistance of the grounding device in order to plan the activities of repair, operational and restoration teams and other services of enterprises of the directorates of communications and infrastructure. A comparative analysis of three technologies of the Internet of Things — LoRaWAN, NB-IoT, STRIZH, allowing to assess the advantages and disadvantages of each in achieving the goal.

Keywords: The Internet of things, unified monitoring and administration system, automatic measurement of grounding resistance, LoRaWAN, NB-IoT, STRIZH.

References:

1. *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 19 marta 2019 goda № 466-r “Dolgosrochnaya programma razvitiya OAO «Rossiyskie zheleznye dorogi» do 2025 goda”* [Decree of the Government of the Russian Federation dated March 19, 2019 № 466-r “Long-term development program of JSC Russian Railways until 2025”]. Available at: https://old-doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&referrerLayerId=5101&id=7017. (In Russian)
2. Kostrominov A. M., Kostrominov A. A., Lozhkin R. O. et al. *Ustroystvo dlya izmereniya soprotivleniya zazemleniya* [Device for measuring ground resistance]. Patent RF, no. 2736073. (In Russian)
3. Evdokimova O. G., Shishigin S. L., Kutsenko S. M. et al. Analiz metodov izmereniya soprotivleniya zazemlitley ustroystv avtomatiki i svyazi [Analysis of methods for measuring the resistance of ground electrodes in automation and communication devices]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2023, Iss. 4, pp. 27–30. DOI: 10,34649/AT.4.4.002. (In Russian)
4. Pasekov A. Yu., Pedanov M. V., Tolmachev V. D. *Ustroystvo dlya izmereniya soprotivleniya zazemleniya* [Device for measuring ground resistance]. Patent RF, no. 140217. (In Russian)
5. Petrov O. A., Sitchikhin Yu. V., Sidorov A. I. *Ustroystvo dlya avtomaticheskogo izmereniya soprotivleniya zazemleniya*

[Device for automatic measurement of ground resistance]. Patent RF, no. 1128195. (In Russian)

6. LoRaWAN™ What is it? A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™, 2015, 20 p.

7. ETSI TR 103 526 V1.1.1 (2018-04) TECHNICAL REPORT System Reference document (SRdoc); Technical characteristics for Low Power Wide Area Networks Chirp Spread Spectrum (LPWAN-CSS) operating in the UHF spectrum below 1 GHz.

8. 2PNST 516—2021. *Informatsionnye tekhnologii. Internet veshchey. Spetsifikatsiya LORAWAN RU* [2PNST 516-2021. Information Technology. Internet of things. Specification LORAWAN EN]. (In Russian)

9. Singkh D., Aliu O. G., Krechmer M. Otsenka LoRa Wan Evaluation dlya IoT-kommunikatsiy [LoRa Wan Evaluation for IoT Communications]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya 2018 goda po dostizheniyam v oblasti vychislitel'noy tekhniki, svyazi i informatiki (ICACCI), Bangalor, Indiya, 2018* [2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Bangalore, India]. Pp. 163–171. DOI: 10.1109/ICACCI.2018.8554713. (In Russian)

10. Semtech. Available at: <https://www.semtech.com> (accessed: March 20, 2023).

11. LPWAN-tekhnologiya “STRIZh” i besprovodnoy protokol XNB Opisaniye produktov i tekhnologii “STRIZh” [LPWAN technology “STRIZH” and wireless protocol XNB Description of products and technology “STRIZH”]. *“Tsentral'skiy tsentr spetsial'nykh kommunikatsiy”, “Sovremennyye Radio Tekhnologii”* [“Center for Special Communications”, “Modern Radio Technologies”]. 19 p. (In Russian)

12. Pavlova Z. Kh., Krasnov A. N., Baltin R. R. Sovremennyye tekhnologii priemoperedachi izmeritel'noy informatsii dlya organizatsii sersornykh setey monitoringa ob'ektov neftegazovoy otrasli [Modern technologies for the transmission and reception of measurement information for the organization of sensor networks for monitoring oil and gas industry facilities]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Scientific Research Journal]. 2017, Iss. 5, pp. 79–81. DOI: 10.23670/IRJ.2017.59.108. (In Russian)

13. Roenkov D. N., Yaronova N. V. Tekhnologiya “Strizh” i perspektivy ee primeneniya [Technology “Strizh” and prospects for its application]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2017, Iss. 9, pp. 9–12. (In Russian)

14. Strizh [Swift]. Available at: <https://strij.tech/> (accessed: March 11, 2023). (In Russian)

15. LTE-Advanced Pro Introduction eMBB Technology Components in 3GPP Release 13/14. White Paper — Munich, Germany: Rohde & Schwarz, 2017. 50 p.

16. GOST R 59026—2020. *Protokol besprovodnoy peredachi dannykh na osnove standartov LTE V REZHIME NB-IoT. Osnovnyye parametry* [GOST R 59026—2020. Wireless data transmission protocol based on the LTE standard IN NB-IoT MODE. Main parameters]. Moscow: Standartinform Publ., 2020, 65 p. (In Russian)

17. Nokia LTE Evolution for IoT Connectivity. Espoo, Finland: Nokia, 2017 — 18 p.

18. Distantnyy kontrol' [Remote control]. *Gudok/Kuibyshevskiy zheleznodorozhnik* [Gudok/Kuibyshev railwayman]. 2012, Iss. 16, p. 7.

19. Kuts A. V svyazi vlastvuet tsifra [Number rules in communication]. *Gudok/prizyv* [Beep/call]. 2016, Iss. 31, p. 7. (In Russian)

20. KB PUL'SAR-TELEKOM [KB PULSAR-TELECOM]. Available at: <https://www.pulsar-telecom.ru/> (accessed: March 13, 2023). (In Russian)

Received: June 15, 2023

Accepted: August 07, 2023

Author's information:

Olga G. EVDOKIMOVA — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electrical Communication; evdokimova@pgups.ru

Sergey M. KUTSENKO — PhD in Engineering, Associate Professor, Dean of the Faculty of Continuous Forms of Education; kutsenko@pgups.ru

Bair A. MESHKOV — Student, Department of Electrical Communication; bair.meshkov@yandex.ru

УДК 621.39

Методика формирования комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени для крупной распределенной системы технологического назначения

Е. В. Опарин

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

Для цитирования: Опарин Е. В. Методика формирования комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени для крупной распределенной системы технологического назначения // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 768–784. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-768-784

Аннотация

Цель: Выработать научно-технические решения построения комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени, включающей подсистемы тактовой сетевой синхронизации (ТСС) и единого времени (СЕВ) как единой системы хронирования, решающей задачи синхронизации по частоте, времени и фазе в крупных распределенных системах технологического назначения. **Методы:** Методы исследования основаны на фундаментальных положениях теории систем и теории принятия решений. **Результаты:** Предложена методика формирования комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени, отличающаяся комплексным подходом к построению систем единого времени и частоты в сетях связи технологического сегмента, независимостью от типов применяемого генераторного оборудования и средств доставки сигналов ТСС и СЕВ, а также требований потенциальных потребителей услуг частотно-временного обеспечения. Предложенная методика формирования комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени позволит обоснованно подходить к построению систем доставки сигналов единого времени и частоты в сложных гетерогенных сетях связи. **Практическая значимость:** Решения на основе представленной методики позволят обеспечить независимую от сторонних операторов связи инфраструктуру для обеспечения единства тактовой сетевой синхронизации и единого времени, необходимых для корректной работы телекоммуникационного оборудования технологической сети связи; удовлетворить потребности по предоставлению полного спектра услуг в сигналах синхронизации и единого времени для действующих и перспективных потребителей; предоставить возможность поэтапного перехода организации сетей связи от технологий коммутации каналов к пакетно-ориентированным технологиям за счет гибкого подхода к используемым маршрутам и системам передач для распространения сигналов синхронизации и единого времени.

Ключевые слова: Телекоммуникационная система, тактовая сетевая синхронизация, система единого времени, частотно-временное обеспечение, шкала времени, комплексная система синхронизации.

Введение

На всех этапах развития телекоммуникационных систем (ТКС) важным условием обеспечения стабильности ее функционирования явля-

ется поддержание синхронизации оборудования связи. Использование современных телекоммуникационных технологий требует применения помимо систем тактовой сетевой синхрониза-

ции также устройств, позволяющих обеспечить передачу сигналов единого времени. Изменения инфраструктуры телекоммуникационных систем, которые вызваны переходом на новые сетевые технологии, поэтапным смещением от технологии коммутации каналов (PDH, SDH) к технологии коммутации пакетов (Ethernet/MPLS/IP), развитием сотовых систем связи следующих поколений (например, LTE-TDD пятого и шестого поколений), а также постоянно возрастающими требованиями к точности и стабильности сигналов синхронизации и единого времени, влекут за собой изменения к решению задач частотно-временного обеспечения (ЧВО). Особые требования к качеству передачи сигналов синхронизации и единого времени возникают в системах технологического назначения, к которым предъявляются повышенные требования обеспечения надежности, живучести и устойчивости функционирования [1–3]. Следует отметить, что зачастую системы технологического назначения значительно территориально распределены, что затрудняет качественную передачу сигналов синхронизации и единого времени. Отдельные же решения по доставке сигналов синхронизации и единого времени зачастую построены с использованием различных технологий и различного оборудования, что значительно затрудняет решение задач по их стыковке и обеспечению требований потребителей. Таким образом, в настоящее время актуальной является задача создания комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени для крупной распределенной системы технологического назначения, которая будет включать подсистемы тактовой сетевой синхронизации (ТСС) и системы единого времени (СЕВ). Основной задачей комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени будет являться формирование, хранение, передача и доставка до потребителей сигналов синхронизации и единого времени требуемой

точности и стабильности, что будет способствовать обеспечению устойчивости процесса функционирования всей ТКС.

Формирование комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени позволит [1–3]:

- обеспечить независимую от сторонних операторов связи инфраструктуру для обеспечения единства тактовой сетевой синхронизации и единого времени, необходимых для корректной работы телекоммуникационного оборудования технологической сети связи;

- удовлетворить потребности по предоставлению полного спектра услуг в сигналах синхронизации и единого времени для действующих и перспективных потребителей;

- предоставить возможность поэтапного перехода организации сетей связи от технологий коммутации каналов к пакетно-ориентированным технологиям за счет гибкого подхода к используемым маршрутам и системам передач для распространения сигналов синхронизации и единого времени.

С учетом проведенного системного анализа существующих в настоящее время средств формирования, хранения, передачи и доставки сигналов синхронизации и единого времени сетевая модель комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени имеет следующий вид (рис. 1).

Согласно представленному рисунку, в качестве эталонных источников сигналов синхронизации и единого времени для комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени используется инфраструктура ГСВЧ. Далее в соответствии с уровнями иерархии комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени производится подключение объединенных источников ТСС и СЕВ. В качестве оборудования ТСС выступает оборудование ПЭГ, ВЗГ, МЗГ и ГСЭ, а в качестве оборудования СЕВ в зависимо-

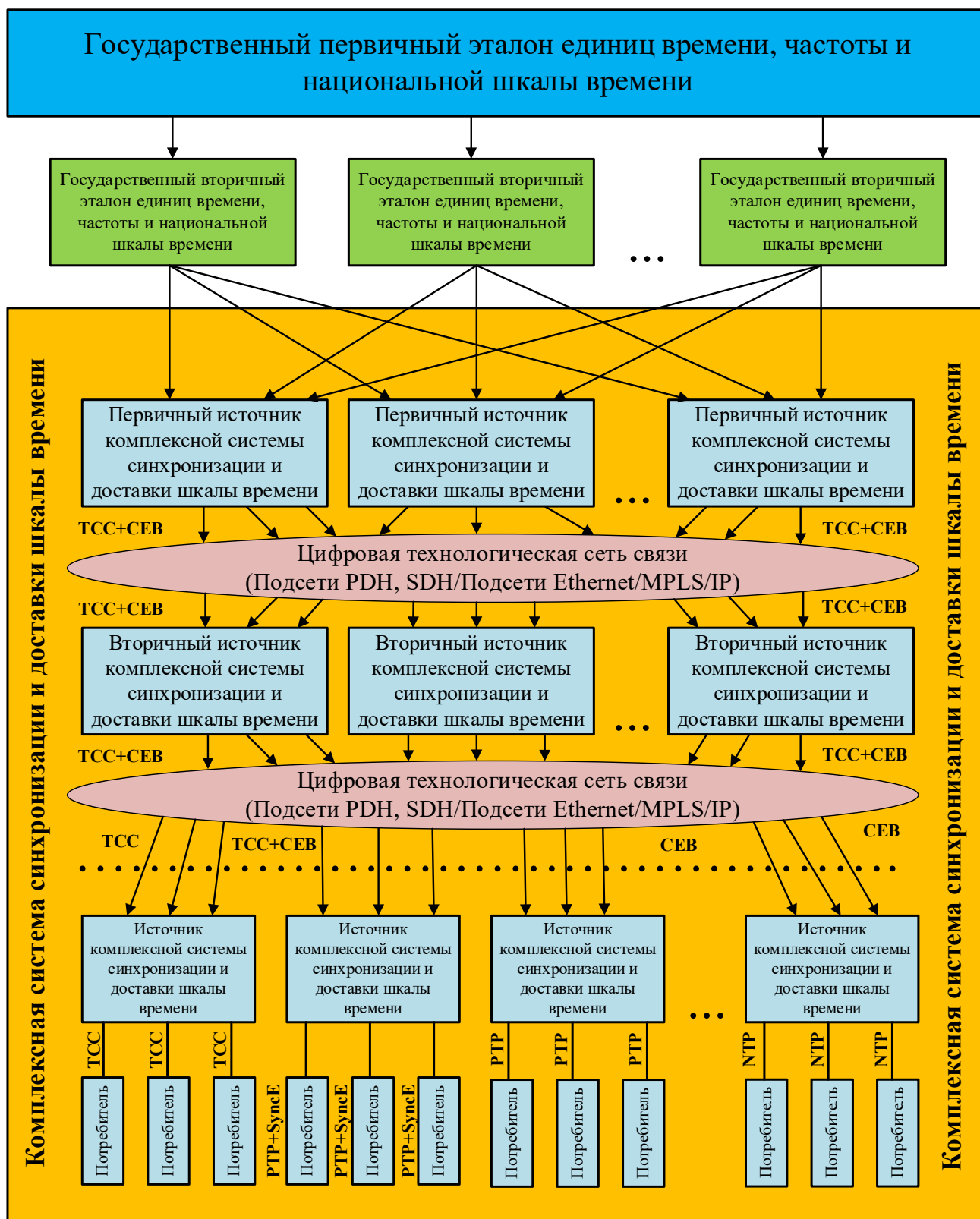


Рис. 1. Сетевая модель комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени для крупной распределенной системы технологического назначения

сти от типа используемого протокола передачи меток времени выступают сервера времени соответствующего уровня и узлы, поддерживающие функционирование протоколов.

Средствами доставки сигналов комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени являются [1–3]:

- на уровне первичных и вторичных источников — волоконно-оптические магистральные системы передачи на базе оборудования SDH, DWDM и IP/MPLS;

- дополнительным средством передачи сигналов точного времени является глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) ГЛОНАСС, использование сигналов которой повышает надежность и точность комплексной системы ТСС и СЕВ, а также предоставляет дополнительные сервисы потребителям.

К основным действующим и перспективным потребителям услуг комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени следует отнести [1–3]:

- оборудование технологической сети связи;
- автоматизированные системы управления и обеспечения безопасности;
- автоматизированные рабочие места (АРМ) информационных и информационно-управляющих систем;
- системы электронного документооборота;
- системы часофикации;
- сети сотовой связи стандарта LTE-TDD уровней 5G и 6G;
- оборудование, устанавливаемое в рамках внедрения технологии IoT / IIoT (сенсорные устройства, исполнительные устройства, датчики);
- средства измерений и испытательное оборудование, предназначенное для измерения сетевых параметров (задержки, потери пакетов и пр.);
- системы дистанционной эксплуатации объектов.

Следует отметить, что подсистема СЕВ выступает в качестве потребителя по отношению к подсистеме ТСС, которая обеспечивает первую высокостабильными сигналами синхронизации частоты с целью повышения точности и стабильности параметров сигналов синхронизации времени (фазы) при пропадании эталонных сигналов, и оборудование СЕВ должно подключаться к подсистеме ТСС на всех уровнях.

Учитывая тот факт, что подсистема СЕВ выступает потребителем по отношению к подсистеме ТСС, в первую очередь в технологической сети связи подлжит формированию система ТСС, впоследствии система СЕВ, а конечным этапом корректировка подсистем ТСС и СЕВ исходя из их взаимного функционирования. Таким образом, общий процесс формирования комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени для крупной распределенной системы технологического назначения включает следующие этапы:

1. Классификация потребителей сигналов синхронизации и единого времени, которая необходима для определения необходимых требований по точности и стабильности с целью последующего расчета и моделирования сетевой структуры комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени.

2. Формирование сетевой структуры подсистемы тактовой сетевой синхронизации.

3. Формирование сетевой структуры подсистемы единого времени.

4. Наложение сетевой структуры СЕВ на сетевую структуру ТСС.

5. Дополнение подсистемы ТСС необходимыми элементами и маршрутами доставки сигналов синхронизации исходя из результатов наложения сетевых структур.

6. Объединение сформированных подсистем ТСС и СЕВ в комплексную систему синхронизации и доставки шкалы времени.

Формирование сетевой структуры подсистемы тактовой сетевой синхронизации

Ключевой подсистемой комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени является подсистема тактовой сетевой синхронизации. Подсистема ТСС в составе телекоммуникационной системы служит для обеспечения равенства тактовых частот всех нуждающихся в синхронизации цифровых устройств. Рассмотрим основные положения построения сетевой структуры подсистемы ТСС.

Иерархическое построение системы ТСС исключает возможность образования «петель» по синхронизации и требует выполнения следующих правил [1–3]:

- сеть синхронизации первого уровня иерархии должна получать основной и резервный сигналы синхронизации;
- сети синхронизации второго, третьего и последующих уровней иерархии должны использовать для синхронизации сигналы, поступающие от сети более высокого уровня;
- от сетей более низкого уровня не должны передаваться сигналы для синхронизации сетей синхронизации более высокого уровня иерархии;
- для снижения затрат на оборудование рекомендуется к каждому участку сети более низкого уровня подавать два сигнала синхронизации через две разные точки подключения к сетям более высокого уровня иерархии.

Основной источник сигналов синхронизации определяет регион синхронизации. Под регионом синхронизации подразумевается «зона ответственности» ПЭГ на сегменте сети связи, для которой он является основным источником синхросигнала.

В каждом регионе синхронизации должны располагаться [1–3]:

- основной источник сигналов синхронизации;

- один или несколько резервных источников сигналов синхронизации;
- объекты синхронизации;
- средства доставки сигналов синхронизации от источников ко всем объектам.

Передача сигналов синхронизации должно осуществляться посредством централизованной системы управления. В качестве основного источника сигналов синхронизации должен использоваться ПЭГ. Резервными источниками участка сети могут быть ПЭГ другого региона синхронизации и ВЗГ, работающие в режиме удержания. В качестве средств доставки сигналов синхронизации от источников ко всем объектам должны быть системы передачи: ПЦИ, СЦИ, DWDM, синхронный Ethernet, сеть передачи данных, сеть пакетной коммутации [1–3].

При построении подсистемы ТСС ключевую роль играет размещение ПЭГ. К параметрам качества синхронизации, на которые оказывает наибольшее влияние размещение ПЭГ, относятся:

- допустимая величина абсолютных блужданий фазы в цепях синхронизации;
- структурные параметры цепи синхронизации.

Другие параметры не используются в качестве критериев регламентации установки ПЭГ, так как они оказывают незначительное влияние на размещение ПЭГ. К таким параметрам, в частности, относится изменение интенсивности проскальзываний в результате изменения количества ПЭГ и числа псевдосинхронных участков в цепях соединений [1–3].

При размещении оборудования ПЭГ необходимо учитывать, что для устойчивой синхронизации в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т G.823 [4] величина абсолютных блужданий фазы в течение периода времени 1 сутки на входе синхронизации любого оборудования цифровой сети и на любом стыке первичных цифровых потоков не должна превышать 18 мкс. В целом блуждания в

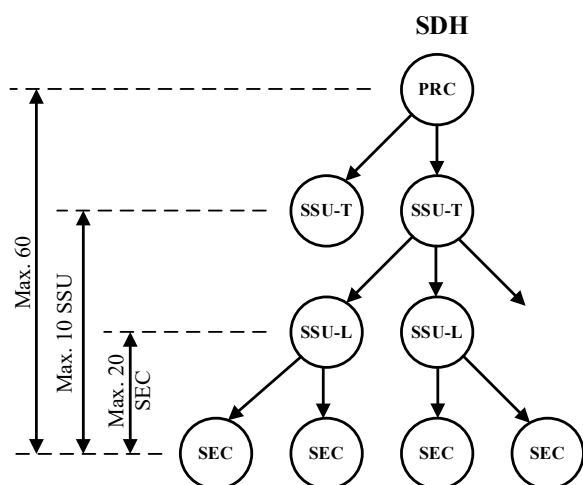


Рис. 2. Иерархическая структура подсистемы ТСС при применении на сетях связи с коммутацией каналов

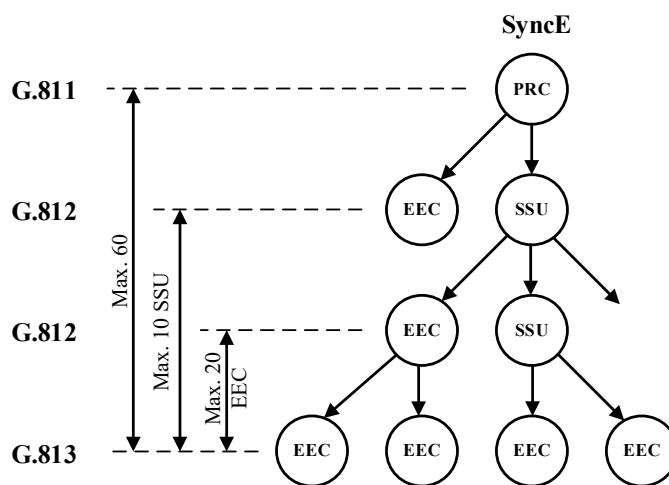


Рис. 3. Иерархическая структура подсистемы ТСС при применении на сетях связи с коммутацией пакетов

цепи синхронизации зависят от величины блужданий, возникающих в результате воздействия окружающей среды на линии передачи, и от величины шумов и скачков фазы на выходах синхронизируемых генераторов. На величину блужданий в цепи передачи сообщений также влияют блуждания, возникающие в результате обработки указателей.

Структурными параметрами цепей синхронизации названы параметры, характеризующие количество СЭ и ВЗГ в цепях прохождения синхросигнала по сети ТСС. Суммарное предельно допустимое количество сетевых элементов СЦИ и ВЗГ ограничено в рекомендациях МСЭ-Т и европейских стандартах, например в рекомендации МСЭ-Т G.803 [5], EN 300 462-2-1 [6]. В соответствии с существующими в настоящее время рекомендациями и стандартами в любой цепи синхронизации общее количество СЭ не должно превышать 60, количество ВЗГ не должно превышать 10, а количество СЭ между последовательно синхронизируемыми ВЗГ не должно превышать 20. Если данные неравенства не выполняются, то требуется изменение расположения ПЭГ, изменение линий передачи или установка дополнительного независимого источника сигналов синхронизации (рис. 2, 3) [7–10].

Также требуется обеспечить взаимосвязь расположенных рядом регионов синхронизации таким образом, чтобы в случае аварии собственного регионального ПЭГ или аварии в сети связи была возможность получать сигналы синхронизации от ПЭГ другого региона. При этом должны выполняться требования по максимальному количеству сетевых элементов и ВЗГ в цепи синхронизации от ПЭГ одного региона до последнего элемента другого региона.

Рассмотрим варианты построения подсистемы ТСС с использованием различных систем передачи.

Построение подсистемы ТСС на базе систем передачи СЦИ

Рекомендуемая система ТСС, построенная на базе систем передачи СЦИ (МСЭ-Т G.803 [5]), должна соответствовать рис. 4. От сигналов ПЭГ последовательно синхронизируются генераторы сетевых элементов СЦИ и вторичные задающие генераторы (ВЗГ) [1, 5].

В любой цепи синхронизации (от ОИ или РИ по основному или резервному направлению) до наиболее удаленного объекта синхронизации должны выполняться следующие требования:

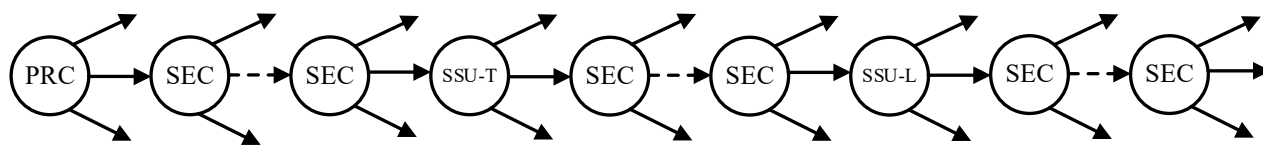


Рис. 4. Структура цепи синхронизации на базе систем передачи СЦИ

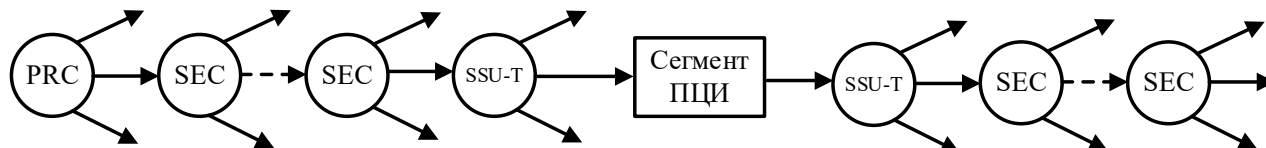


Рис. 5. Структура цепи синхронизации на базе систем передачи СЦИ и ПЦИ

- количество сетевых элементов СЦИ не должно превышать 60;
- количество, последовательно включенных ВЗГ не должно превышать 10;
- количество сетевых элементов СЦИ между ПЭГ и первым ВЗГ и между двумя ВЗГ не должно превышать 20;
- количество сетевых элементов СЦИ, подключенных к последнему ВЗГ, не должно превышать 20.

Построение подсистемы ТСС на базе систем передачи СЦИ и ПЦИ

Рекомендуемая система ТСС, построенная на базе систем передачи СЦИ и ПЦИ (МСЭ-Т G.803 [5]), должна соответствовать рис. 5 [1, 5].

Использование систем ПЦИ для передачи сигналов синхронизации между двумя участками сети, построенных на системах СЦИ, возможно при выполнении следующих требований.

В начале и в конце участка ПЦИ в направлении передачи сигналов синхронизации должны быть установлены ВЗГ. В качестве сигнала синхронизации могут использоваться:

- специальный сигнал 2048 кбит/с с заданной постоянной структурой, не содержащий информации, сформированный в ВЗГ;
- сигнал 2048 кбит/с, предназначенный для передачи абонентской нагрузки, для которого в ВЗГ выполнена функция ресинхронизации.

Недопустимо использование информационных сигналов 2048 кбит/с с выхода системы передачи ПЦИ для последующей передачи по системе СЦИ в качестве синхросигналов без его предварительной ресинхронизации в ВЗГ.

Любая цепь синхронизации должна соответствовать следующим требованиям:

- число элементов СЦИ в цепи не должно превышать 60;
- число ВЗГ в последовательной цепи не должно превышать 10;
- число сетевых элементов СЦИ между ПЭГ и первым ВЗГ и между двумя ВЗГ не должно превышать 20;
- число сетевых элементов СЦИ, подключенных к последнему ВЗГ, не должно превышать 20.

Построение подсистемы ТСС на базе систем передачи синхронного Ethernet

Рекомендуемая система ТСС, построенная на базе систем передачи синхронного Ethernet (Eth) (МСЭ-Т G.803 [5], G.8261 [10]), должна соответствовать рис. 6 [1, 5, 10].

С выходов ПЭГ и ВЗГ на входы ТЗ соответствующих сетевых элементов Eth подаются сигналы 2048 кГц. Для передачи сигналов синхронизации между элементами Eth используются потоки Ethernet. Для синхронизации ВЗГ используются сигналы 2048 кГц с выходов Т4

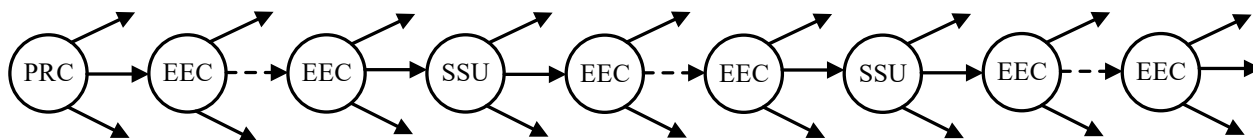


Рис. 6. Структура цепи синхронизации на базе систем передачи синхронного Ethernet

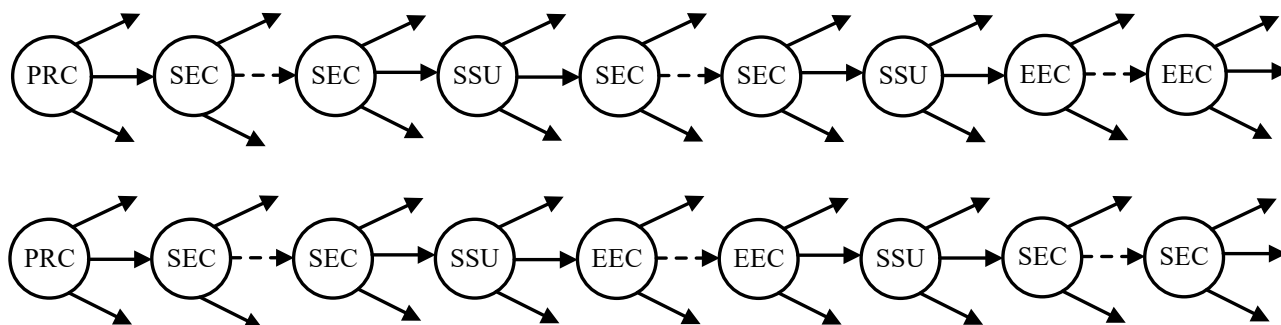


Рис. 7. Структура цепи синхронизации, включающая системы передачи СЦИ и SyncE

соответствующих элементов Eth. В любой цепи синхронизации по рис. 6 должны выполняться следующие требования:

- количество сетевых элементов Eth не должно превышать 60;
- количество последовательно включенных ВЗГ не должно превышать 10;
- количество сетевых элементов Eth между ПЭГ и первым ВЗГ и между двумя ВЗГ не должно превышать 20;
- количество сетевых элементов Eth, подключенных к последнему ВЗГ, не должно превышать 20.

Построение подсистемы ТСС на базе систем передачи СЦИ и синхронного Ethernet

Для телекоммуникационных систем, включающих системы передачи СЦИ и синхронный Ethernet (МСЭ-Т G.803 [5], G.8261 [10]), рекомендуемые структуры приведены на рис. 7 [1, 5, 10].

При использовании сетевой структуры, включающей системы передачи СЦИ и SyncE, должны выполняться следующие требования:

- общее число сетевых элементов не должно превышать 60;

– число ВЗГ в последовательной цепи синхронизации не должно превышать 10;

– количество сетевых элементов любого типа между ПЭГ и первым ВЗГ и между двумя ВЗГ не должно превышать 20;

– количество сетевых элементов любого типа, подключенных к последнему ВЗГ, не должно превышать 20.

Построение подсистемы ТСС на базе систем передачи CWDM/DWDM, обеспечивающих выполнение функций оптической транспортной сети OTN

Рекомендуемые структуры схем синхронизации для сетей, основанных на системах передачи CWDM/DWDM, выполняющих функции оптических транспортных сетей OTN (МСЭ-Т G.803 [5], G.8261 [10], G.8251 [11]), приведены на рис. 8.

С выхода ПЭГ сигнал 2048 кГц поступает на мультиплексор STM-N потоков, который находится в составе оборудования DWDM. После прохождения участка сети (острова) DWDM из STM-N потока выделяется сигнал синхронизации 2048 кГц, который поступает на вход ВЗГ. ВЗГ

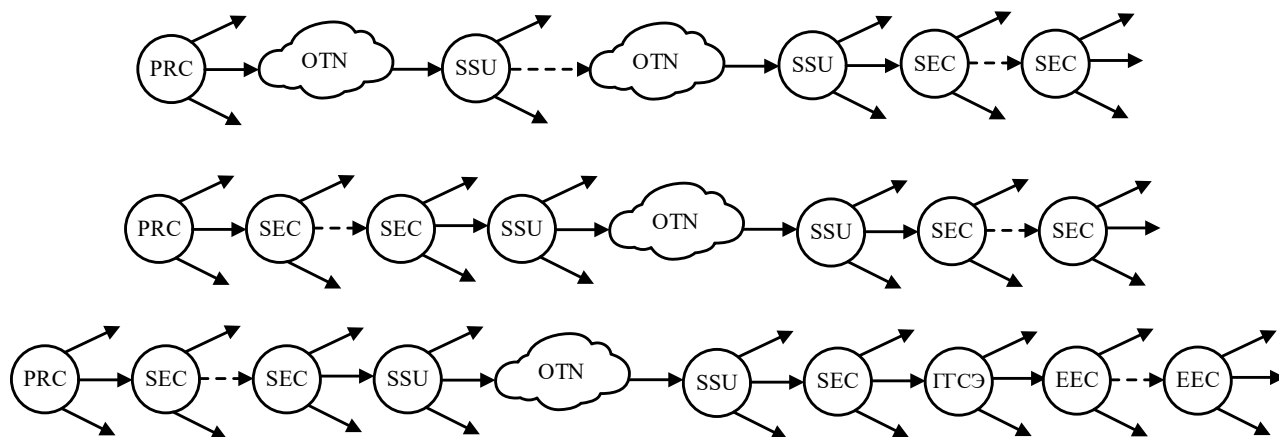


Рис. 8. Структура цепи синхронизации на базе систем передачи CWDM/DWDM, обеспечивающих выполнение функций оптической транспортной сети OTN

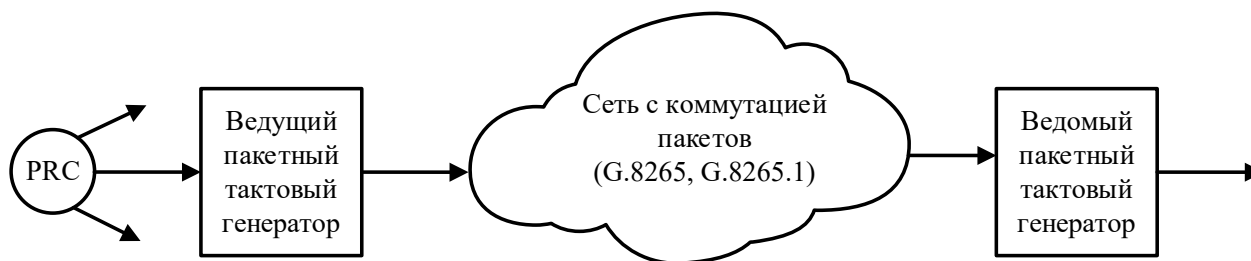


Рис. 9. Передача сигнала синхронизации через сети с коммутацией пакетов

аналогичным образом синхронизирует следующий участок (остров) DWDM.

В структурах синхронизации согласно по рис. 8 необходимо выполнение следующих требований:

- число участков DWDM не должно превышать 10;
- число последовательно включенных ВЗГ не должно превышать 10;
- число элементов СЦИ, подключенных к последнему в цепи синхронизации ВЗГ, не должно превышать 20;
- между первичным эталонным генератором и первым ВЗГ число элементов СЦИ не должно превышать 20;
- суммарное число элементов СЦИ в цепи синхронизации не должно превышать 60,
- между сетевым элементом СЦИ и элементом синхронного Ethernet должен включаться

сетевой элемент гибридного типа, который преобразует сигналы STM-N в сигналы формата Ethernet;

- суммарное число сетевых элементов всех типов, подключенных к последнему ВЗГ, не должно превышать 20;

В структурах OTN согласно рекомендации МСЭ-Т G.8251 предусмотрено, что в «остров» OTN должно входить не более 10 СЭ_{OTN}, а сумма СЭ_{OTN} всех «островов» не должна превышать 100 [1, 5, 10, 11].

Построение подсистемы ТСС для сетей с пакетной коммутацией

Для сетей с пакетной коммутацией (МСЭ-Т G.803 [5], G.8265 [12]) рекомендуемая структура цепей синхронизации должна соответствовать рис. 9. Использование сети пакетной коммутации

для передачи сигналов синхронизации по частоте требует установки:

- ведущего генератора на входе сети, выполняющего преобразование сигналов 2048 кГц в сигналы Ethernet;
- ведомого генератора на выходе сети, выполняющего преобразование сигналов пакетной сети в сигналы 2048 кГц.

Оба генератора должны поддерживать протоколы передачи сигналов по сети с пакетной коммутацией.

Таким образом, на основе рассмотренных подходов предполагается построение подсистемы ТСС в соответствии с необходимыми требованиями потребителей и архитектурой телекоммуникационной системы [1, 5, 12].

Формирование сетевой структуры подсистемы единого времени

Сигналы СЕВ должны соответствовать с заданной точностью национальной шкале координированного времени UTC (Coordinated Universal Time) Российской Федерации. Распределение сигналов единого времени предусмотрено с использованием протоколов NTP и RTP по сети передачи данных с коммутацией пакетов. Данный факт связан с тем, что синхронные методы передачи сигналов СЕВ являются односторонними и подходят для синхронизации частоты. Пакетные же методы могут функционировать как в одностороннем, так и двухстороннем режиме [1, 3, 13].

В настоящее время для передачи сигналов единого времени активно применяется метод двусторонней передачей времени TWTT (Two way time transfer), который реализован в протоколах NTP/SNTP и RTP.

Отметим, что основной проблемой передачи сигналов СЕВ в сетях с коммутацией пакетов является девиация временной задержки сообщений.

Согласно [13], существует несколько причин девиации временной задержки в сетях связи с коммутацией пакетов:

- случайное изменение задержки, обусловленное задержкой сообщений в очередях;
- низкочастотное изменение задержки согласно времени суток день/ночь;
- систематическое изменение задержки, связанное с промежуточным ее накоплением при передаче сообщений;
- изменения маршрутов доставки сообщений;
- перегрузки в сетях связи.

Общую задержку передачи меток времени в сетях связи с коммутацией пакетов, состоящих из N элементов, можно представить в следующем виде [13]:

$$T_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^N (T_{\text{расп}} + T_{\text{обр}} + T_{\text{ожид}} + T_{\text{пер}}) \cdot i,$$

где N — число сетевых элементов;

$T_{\text{расп}}$ — время передачи сообщения по направляющим системам;

$T_{\text{обр}}$ — время, затрачиваемое на чтение заголовков сообщений и вычисление маршрута;

$T_{\text{ожид}}$ — время ожидания в очереди на передачу сообщения;

$T_{\text{пер}}$ — время, необходимое для освобождения сообщения из очереди.

Отметим, что девиация временной задержки сообщений в промежуточных узлах сетей связи с коммутацией пакетов определяется в основном девиацией времени ожидания сообщения из очереди на передачу.

Оборудование СЕВ должно подключаться к системе ТСС на всех уровнях. Учитывая применение в основном двух видов протоколов NTP и RTP для передачи сигналов единого времени, рассмотрим отдельно варианты формирования СЕВ с использованием протокола NTP и RTP.

Формирование сетевой структуры подсистемы единого времени с использованием протокола NTP

В настоящее время отсутствуют четкие правила, регламенты и нормативные документы назначения слоев и количества серверов времени в случае применения протокола NTP, поэтому предлагается при формировании СЕВ на основе NTP использовать опыт производителей оборудования и операторов связи.

Узел NTP предпочитает иметь доступ к нескольким источникам СЕВ с более низким значением номера слоя (не менее трех), затем он может применить процедуры фильтрации, селекции, кластеризации для выбора сервера с наилучшими параметрами. Таким образом, при построении и настройке СЕВ на основе протокола NTP необходимо стремиться предоставить каждому клиенту три или более источника с более низким значением номера слоя.

Узлы СЕВ на основе протокола NTP могут функционировать в следующих режимах [1–3, 14, 15]:

- 1) режим функционирования «Клиент/сервер»;
- 2) симметричный активный/пассивный режим;
- 3) режим функционирования Broadcast;
- 4) режим функционирования Multicast;
- 5) режим функционирования Manycast.

В общем виде выделяется несколько архитектур построения подсистемы СЕВ на основе протокола NTP [1–3, 14, 15]:

- плоская структура одноранговых узлов;
- иерархическая структура;
- звездная структура.

В плоской структуре одноранговые узлы следуют друг за другом с выделением отдельных узлов, настроенных на соединение с внешними более высокоранговыми системами. Цепи узлов становятся длиннее с добавлением каждого нового NTP узла.

В иерархической структуре иерархия узлов NTP совпадает с иерархией узлов СПД. Узлы

ядра, агрегации и доступа имеют отношение клиента и сервера между собой. Иерархическая структура в целом считается более предпочтительной, поскольку она обеспечивает более высокую стабильность и масштабируемость.

В структуре звезды все маршрутизаторы имеют отношения клиента и сервера с несколькими серверами NTP. Выделенные серверы NTP являются центром и обычно являются системами, синхронизированными с внешними источниками времени на основе приемника ГНСС.

Таким образом, можно выделить 4 этапа при построении СЕВ с использованием протокола NTP: определение основного источника сигналов единого времени, формирование сетевой архитектуры, определение режимов работы узлов сети, настройка функций управления и мониторинга подключенных устройств и серверов NTP. В зависимости от конкретных исходных данных, текущей оснащенности участка сети и целей модернизации возможны различные варианты формирования подсистемы СЕВ на основе NTP.

Формирование сетевой структуры подсистемы единого времени с использованием протокола РТР

Архитектура СЕВ на базе протокола РТР должна представлять собой иерархическую структуру и включать в себя в общем случае следующие элементы [16, 17]:

- первичный эталонный генератор шкалы времени (PRTC — Primary Reference Time Clock);
- «Гроссмейстерские часы» (T-GM — Telecom Grandmaster), выполняющие функцию ведущего источника сигналов единого времени на участке сети;
- «Ординарные часы» (T-TSC — Telecom Time Slave Clock), которые представляют собой ведомые часы;
- «Граничные часы» (T-BC — Telecom Boundary Clock), устройства, выполняющие

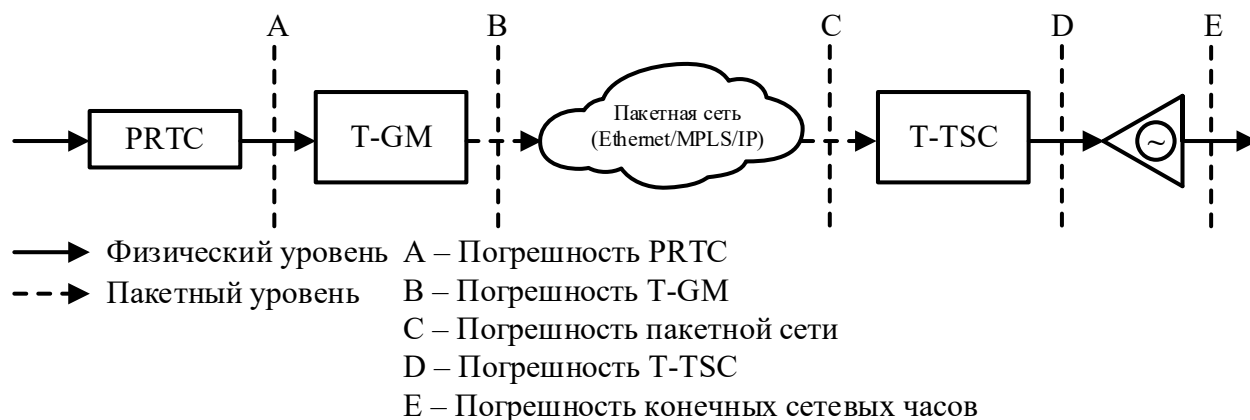


Рис. 10. Сетевая модель системы единого времени на основе протокола PTP

функцию ведомых/ведущих. Данные устройства выступают в качестве сетевой поддержки. Их функцией является определение текущего значения времени и последующая его передача;

– «Прозрачные часы» — (Т-ТС — Telecom Transparent Clock), устройства, измеряющие задержку прохождения сообщения в элементе сети связи и осуществляющие соответствующую корректировку значения времени.

Сетевая модель системы единого времени на основе протокола PTP имеет вид, показанный на рис. 10 [13, 18].

Основная идея построения СЕВ на основе протокола PTP состоит в следующем. Согласно рис. 10, происходит передача сигнала времени от T-GM конечному пользователю. Каждый узел на маршруте передачи (Т-ВС, Т-ТС, Т-TSC), а также линии передачи вносят свою ошибку времени в общий бюджет доставки. Классификация генераторного оборудования Т-ВС, Т-ТС и Т-TSC приведена в таблице [19].

Классификация генератора Т-ВС, Т-ТС или Т-TSC

Класс генератора сетевого элемента	Допустимый диапазон постоянной ошибки времени (constant time error), нс
Класс А	±50
Класс В	±20
Класс С	±10
Класс D	—

В зависимости от требований конечного потребителя необходимо таким образом подобрать маршрут доставки сигнала единого времени, чтобы вносимая ошибка времени с учетом числа узлов и характеристик их генераторного оборудования укладывалась в требуемые значения. При проектировании конкретной сети для каждого маршрута передачи сигналов СЕВ должны быть определены эксплуатационные показатели параметров точности шкалы времени в точках А, В, С, D, Е.

Резервирование СЕВ, построенной на основе протокола PTP, можно осуществить, используя изменение маршрутизации сообщений PTP, при которой вносимая ошибка укладывается в суммарный бюджет доставки сигнала СЕВ до потребителя.

Для каждого используемого маршрута передачи сигнала СЕВ (основного и резервного) должны устанавливаться нормы, определяемые требованиями потребителей к классу точности синхронизации шкалы времени.

Таким образом, перед построением системы СЕВ с использованием протокола PTP необходимо провести расчет с последующим распределением бюджета ошибки исходя из количества сетевых элементов, классов генератора сетевых элементов и маршрутов доставки сигналов единого времени.

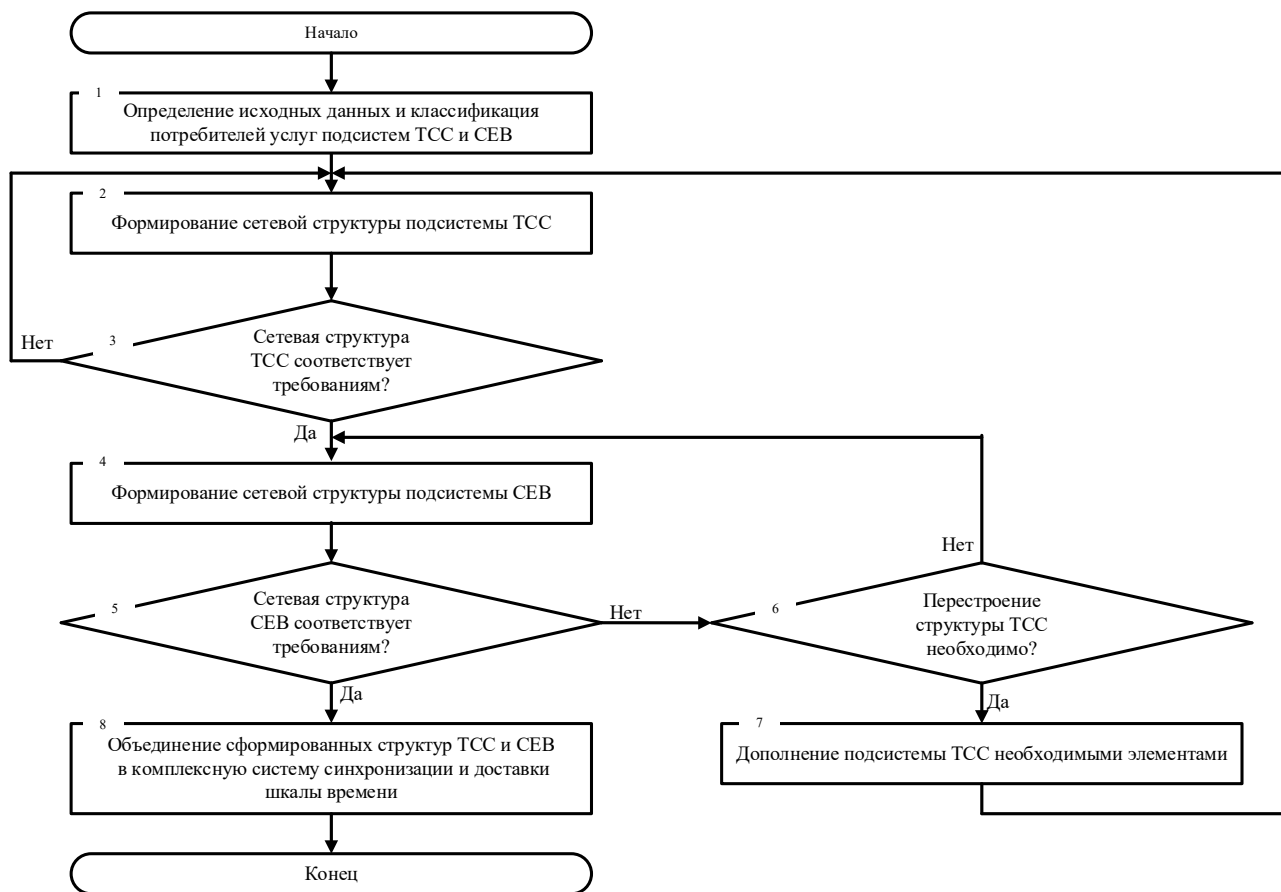


Рис. 11. Блок-схема методики формирования комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени

Формирование сетевой структуры комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени

На основании результатов системного анализа различных технологий и способов доставки сигналов синхронизации и единого времени разработана методика формирования комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени, блок-схема которой приведена на рис. 11.

В первом блоке производится анализ исходных данных для построения комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени. В первую очередь производится анализ действующей оснащённости участка проектирования или модернизации. На данном этапе необходимо оценить способность действующих устройств для передачи сигналов синхронизации и единого вре-

мени различной точности и стабильности. Также на данном этапе необходимо оценить требования потребителей с точки зрения доставки сигналов ТСС и СЕВ, произвести классификацию и ранжирование требований, что особенно важно для последующего составления маршрутов доставки сигналов ТСС и СЕВ.

В блоках 2 и 3 на основе подходов, рассмотренных выше, необходимо произвести формирование сетевой структуры подсистемы ТСС. На данном этапе важно предусмотреть расстановку генераторного оборудования и маршрутов доставки сигналов ТСС в соответствии с нормативными документами и требованиями потребителей.

В блоках 4 и 5 необходимо сформировать сетевую структуру подсистемы СЕВ в зависимости от протоколов передачи сигналов СЕВ и требо-

ваний потребителей. Учитывая тот факт, что подсистема СЕВ является потребителем подсистемы ТСС, необходимо учесть возможность перестроения подсистемы ТСС (блок б) при условии, если требования отдельных потребителей не выполняются. В случае необходимости перестроения подсистемы ТСС необходимо добавить в структуру ТСС отдельное генераторное оборудование, соответствующее по точности и стабильности сигналов синхронизации.

При сформированных сетевых структурах подсистем ТСС и СЕВ, когда требования потребителей выполнены, в блоке 8 производится объединение сетевых структур с формированием комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени. На данном этапе производится также формирование ее централизованной системы управления и системы технической эксплуатации. Производится включение сформированной комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени в состав телекоммуникационной системы как единого блока.

Заключение

В результате проведенного системного анализа существующих в настоящее время средств формирования, хранения, передачи и доставки сигналов синхронизации и единого времени, анализа нормативных документов, регламентирующих решения по построению систем частотно-временного обеспечения, сформирована методика формирования комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени для крупной распределенной системы технологического назначения.

Предложенная методика отличается комплексным подходом к построению систем частотно-временного обеспечения в технологических сетях связи, независимостью от типов применяемого генераторного оборудования и средств доставки сигналов ТСС и СЕВ, а также требований потенциальных потребителей. Предложенная мето-

дика формирования комплексной системы синхронизации и доставки шкалы времени позволит обоснованно подходить к построению средств доставки сигналов ТСС и СЕВ в сложных гетерогенных сетях связи, построенных с применением различных сетевых технологий, учитывая при этом требования существующих и перспективных потребителей, что будет способствовать обеспечению устойчивости процесса функционирования всей ТКС, а также снижению затрат на обеспечение процесса ее функционирования.

Библиографический список

1. Рыжков А. В. Частотно-временное обеспечение в сетях электросвязи: учебное пособие для вузов / А. В. Рыжков. — М.: Горячая линия — Телеком, 2021. — 270 с.
2. Бирюков Н. Л. Обзор направлений исследований МСЭ в области частотно-временного обеспечения современных сетей связи / Н. Л. Бирюков, Н. Р. Триска, Н. Н. Худынцев // Т-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. — 2014. — Т. 8. — № 2. — С. 12–17.
3. Давыдкин П. Н. Тактовая сетевая синхронизация / П. Н. Давыдкин, М. Н. Колтунов, А. В. Рыжков. — М.: Эко-Трендз, 2004. — 205 с.
4. Рекомендация МСЭ-Т G.823. Контроль дрожания и блуждания в цифровых сетях, основанных на иерархии 2048 Кбит/с (10.03.2000).
5. Рекомендация МСЭ-Т G.803. Архитектура транспортных сетей, основанная на синхронной цифровой иерархии (СЦИ) (10.03.2000).
6. ETSI EN 300 462-2-1 V1.2.1 (2002-01). Общие требования для сетей синхронизации; Часть 2-1: Архитектура сети синхронизации, основанная на сетях СЦИ.
7. Рекомендация МСЭ-Т G.811. Временные характеристики на выходах первичных эталонных задающих генераторов (19.09.1997).
8. Рекомендация МСЭ-Т G.812. Временные характеристики на выходах задающих генераторов, пригодных для использования в качестве узловых генераторов сетей синхронизации (13.06.2004).

9. Рекомендация МСЭ-Т G.813. Характеристики хронирования ведомых тактовых генераторов аппаратуры СЦИ (SEC) (16.03.2003).
10. Рекомендация МСЭ-Т G.8261/Y.1361. Синхронизация и аспекты синхронизации в пакетных сетях (29.08.2019).
11. Рекомендация МСЭ-Т G.8251. Управление фазовым дрожанием и дрейфом фазы в оптической транспортной сети (ОТС) (29.11.2018).
12. Рекомендация МСЭ-Т G.8265/Y.1365. Архитектура и требования для доставки значений частот в пакетном режиме (07.10.2010).
13. Мазуренко Д. К. Аспекты построения системы частотно-временной сетевой синхронизации сигналов / Д. К. Мазуренко // Т-Comm — Телекоммуникации и Транспорт. — 2017. — Т. 11. — № 8. — С. 4–8.
14. IETF RFC 1305 Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis.
15. IETF RFC 5905 Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification.
16. IEEE 1588-2019 (07.11.2019). Standard for A Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.
17. Телегин С. Протокол РТР для синхронизации сетей NGN. Вопросы применения / С. Телегин // Первая миля. — 2009. — № 5-6. — С. 21–23.
18. Рекомендация МСЭ-Т G.8271/Y.1366. Аспекты временной и фазовой синхронизации в сетях с коммутацией пакетов (15.03.2020).
19. Рекомендация МСЭ-Т G.8273.2/Y.1368.2. Параметры сигналов синхронизации для граничных часов и ведомых часов, предназначенных для использования в сети связи с полной поддержкой синхронизации по времени (29.10.2020).

Дата поступления: 19.06.2023

Решение о публикации: 26.07.2023

Контактная информация:

ОПАРИН Евгений Валерьевич — канд. техн. наук, доц.; ОпаринН@mail.ru

The Methodology for the Formation of a Comprehensive System of Synchronization and Delivery of the Time Scale for a Large-Scale Distributed Technological Purpose System

E. V. Oparin

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

For citation: Oparin E. V. The Methodology for the Formation of a Comprehensive System of Synchronization and Delivery of the Time Scale for a Large Distributed Technological Purpose System // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 768–784. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-768-784

Summary

Purpose: To develop scientific and technical solutions for constructing a comprehensive synchronization system and delivery of the time scale, which includes subsystems of network clock synchronization (NCS) and unified time (UT), as a unified timekeeping system addressing the challenges of frequency, time, and phase synchronization in large-scale distributed technological purpose systems. **Methods:** Research methods are based on the fundamental provisions of the theory of systems and the theory of decision-making. **Results:** A methodology for the formation of a comprehensive synchronization system and the delivery of a time scale is proposed, which is characterized by an integrated approach to building unified time and frequency systems in the communication networks of the technological segment, the independence of the types of generator

equipment used and the means of delivery of NCS and UT signals, as well as meeting the requirements of potential consumers of frequency and time services. The proposed methodology for the formation of a comprehensive synchronization system and delivery of a time scale will allow to reasonably approach building systems for delivering unified time and frequency signals in complex heterogeneous communication networks. **Practical significance:** Solutions based on the presented methodology will allow the provision of an infrastructure independent of external communication operators to ensure the unity of network clock synchronization and unified time. This is necessary for the correct operation of telecommunication equipment of the technological communication network. The methodology will also meet the needs for providing a full range of synchronization and unified time signal services to existing and prospective consumers. Additionally, it will enable a gradual transition of the organization of communication networks from channel-switching to packet-oriented technologies due to a flexible approach to the routes and transmission systems used for the distribution of synchronization signals and unified time.

Keywords: Telecommunication system, network clock synchronization, a unified time system, frequency and time provision, time scale, complex synchronization system.

References

1. Ryzhkov A. V. *Chastotno-vremennoe obespechenie v setyakh elektrosvyazi: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Frequency and time support in telecommunication networks: a textbook for universities]. Moscow: Goryachaya liniya — Telekom Publ., 2021, 270 p. (In Russian)
2. Biryukov N. L., Triska N. R., Khudyntsev N. N. *Obzor napravleniy issledovaniy MSE v oblasti chastotno-vremennogo obespecheniya sovremennykh setey svyazi* [Review of ITU research directions in the field of time-frequency support of modern communication networks]. *T-Comm — Telekommunikatsii i Transport* [T-Comm — Telecommunications and Transport]. 2014, vol. 8, Iss. 2, pp. 12–17. (In Russian)
3. Davydkin P. N., Koltunov M. N., Ryzhkov A. V. *Taktovaya setevaya sinkhronizatsiya* [Clock network synchronization]. Moscow: Eko-Trendz Publ., 2004, 205 p. (In Russian)
4. *Rekomendatsiya MSE-T G.823. Kontrol' drozhaniya i bluzhdaniya v tsifrovyykh setyakh, osnovannykh na ierarkhii 2048 Kbit/s (10.03.2000)* [ITU-T Recommendation G.823. Jitter and Wander Control in Digital Networks Based on the 2048 Kbps Hierarchy (03/10/2000)]. (In Russian)
5. *Rekomendatsiya MSE-T G.803. Arkhitektura transportnykh setey, osnovannaya na sinkhronnoy tsifrovoy ierarkhii (STsI) (10.03.2000)* [ITU-T Recommendation G.803. Transport Network Architecture Based on Synchronous Digital Hierarchy (SDH) (10.03.2000)]. (In Russian)
6. *ETSI EN 300 462-2-1 V1.2.1 (2002-01). Obshchie trebovaniya dlya setey sinkhronizatsii; Chast' 2-1: Arkhitektura seti sinkhronizatsii, osnovannaya na setyakh STsI* [ETSI EN 300 462-2-1 V1.2.1 (2002-01). General requirements for synchronization networks; Part 2-1: Synchronization network architecture based on SDH networks]. (In Russian)
7. *Rekomendatsiya MSE-T G.811. Vremennye kharakteristiki na vykhodakh pervichnykh etalonnykh zadayushchikh generatorov (19.09.1997)* [ITU-T Recommendation G.811. Time characteristics at the outputs of the primary reference generators (19.09.1997)]. (In Russian)
8. *Rekomendatsiya MSE-T G.812. Vremennye kharakteristiki na vykhodakh zadayushchikh generatorov, prigodnykh dlya ispol'zovaniya v kachestve uzlovykh generatorov setey sinkhronizatsii (13.06.2004)* [ITU-T Recommendation G.812. Time characteristics at the outputs of master generators suitable for use as nodal generators of synchronization networks (06.13.2004)]. (In Russian)
9. *Rekomendatsiya MSE-T G.813. Kharakteristiki khronirovaniya vedomykh taktovykh generatorov apparatury STsI (SEC) (16.03.2003)* [ITU-T Recommendation G.813. Timing Characteristics of SDH Equipment Slave Clocks (SEC) (16.03.2003)]. (In Russian)
10. *Rekomendatsiya MSE-T G.8261/Y.1361. Sinkhronizatsiya i aspekty sinkhronizatsii v paketnykh setyakh (29.08.2019)* [ITU-T Rec. G.8261/Y.1361. Synchronization

and aspects of synchronization in packet networks (29.08.2019)]. (In Russian)

11. *Rekomendatsiya MSE-T G.8251. Upravlenie fazovym drozhaniem i dreyfom fazy v opticheskoy transportnoy seti (OTS) (29.11.2018)* [ITU-T Recommendation G.8251. Management of phase jitter and phase drift in the optical transport network (OTN) (11.29.2018)]. (In Russian)

12. *Rekomendatsiya MSE-T G.8265/Y.1365. Arkhitektura i trebovaniya dlya dostavki znacheniy chastot v paketnom rezhime (07.10.2010)* [ITU-T Rec. G.8265/Y.1365. Architecture and requirements for delivering frequency values in batch mode (07.10.2010)]. (In Russian)

13. Mazurenko D. K. Aspekty postroeniya sistemy chastotno-vremennoy setevoy sinkhronizatsii signalov [Aspects of building a system of frequency-time network synchronization of signals]. *T-Comm — Telekommunikatsii i Transport* [T-Comm — Telecommunications and Transport]. 2017, vol. 11, Iss. 8, pp. 4–8. (In Russian)

14. IETF RFC 1305 Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis.

15. IETF RFC 5905 Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification.

16. IEEE 1588-2019 (07.11.2019). Standard for A Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.

17. Telegin S. Protokol PTP dlya sinkhronizatsii setey NGN. Voprosy primeneniya [PTP protocol for synchronization of NGN networks. Questions of application]. *Pervaya milya* [First Mile]. 2009, Iss. 5, pp. 21–23. (In Russian)

18. *Rekomendatsiya MSE-T G.8271/Y.1366. Aspekty vremennoy i fazovoy sinkhronizatsii v setyakh s kommutatsiey paketov (15.03.2020)* [ITU-T Rec. G.8271/Y.1366. Aspects of time and phase synchronization in packet-switched networks (03.15.2020)]. (In Russian)

19. *Rekomendatsiya MSE-T G.8273.2/Y.1368.2. Parametry signalov sinkhronizatsii dlya granichnykh chasov i vedomykh chasov, prednaznachennykh dlya ispol'zovaniya v seti svyazi s polnoy podderzhkoy sinkhronizatsii po vremeni (29.10.2020)* [ITU-T Rec. G.8273.2/Y.1368.2. Synchronization signal parameters for boundary clocks and slave clocks intended for use in a communication network with full time synchronization support (10.29.2020)]. (In Russian)

Received: June 19, 2023

Accepted: July 26, 2023

Author's information:

Evgeniy V. OPARIN — PhD in Engineering, Associate Professor; onapuH@mail.ru