

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ

Петербургского университета
путей сообщения

Издается с 1884 г.



Том 21
ВЫПУСК 3
2024

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 21, выпуск 3, 2024

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

Учредитель

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

Издатель

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

Адрес учредителя

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

Адрес издателя

111024, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ
Лефортово, ул. Авиамоторная, 50, стр. 2, помещ. 29/2

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 24.09.2024.

Формат 210 × 297. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 25,87.

Тираж 200 экз. Заказ 4664/1. Цена свободная.

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

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2024

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY,
volume 21, issue 3, 2024

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

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport
University

Publisher

Media Service LLC under contract № ЭА00271, 19.12.2023

Founder's address

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

Publisher's address

111024, Moscow, ext. ter. Lefortovo municipal district,
Aviamotornaya str., 50, p. 2, room. 29/2

Mass media registration certificate number

ПН N ФС2-7499 dd. 06.04.2005

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

The journal is registered

in the Russian Science Citation Index (RSCI)

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

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

The journal has the Peer-review division

The journal is distributed

Index Direct Mail Agency "Kniga-Service": 33315

JOURNAL STAFF

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

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

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

EDITORIAL TEAM

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

- Т. Ю. Сафонова**
Направления обеспечения качества гипсоизвестковых вяжущих при реставрации 543
- А. А. Воробьев, А. Л. Пенкин, В. С. Смирнов**
Методика оценки экологического эффекта от применения биотоплив 553
- П. В. Герасименко**
Диагностика тесноты междисциплинарных связей по семестровым экзаменационным оценкам студентов в период смешанных форм обучения в вузе 561
- А. М. Колбиков, О. К. Суворова, А. А. Федосеенко**
Очистка торфяных грунтовых вод методом ультрафильтрации и ионного обмена 569

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

- Н. В. Малышев**
Организация работы терминала при хранении контейнеров на полуприцепах 575
- А. А. Махонько, Ю. Г. Лазарев, А. А. Антонюк**
Структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в городе Санкт-Петербурге. Часть 2 585
- С. В. Трескин, Е. Ю. Дульский, В. А. Кручек, П. Ю. Иванов**
Анализ применения гидравлических гасителей колебаний в конструкциях рессорного подвешивания подвижного состава железнодорожного транспорта 598
- В. Д. Константинов, А. Л. Новиков, А. А. Сокольников**
Выдавливание замкового блока при строительстве транспортных тоннелей большого диаметра 609
- Н. А. Соловьев, С. В. Чижов, Ю. В. Авдей**
Методическое обоснование расчета холодногнутых стальных тонкостенных профилей в мостовых конструкциях на этапе проекта 622
- Е. В. Рязанова, С. М. Наурузбаев, А. О. Куделина**
Оценка предложений по формированию сети альтернативных маршрутов следования коридора «Север — Юг» 638
- М. А. Андронов, Е. В. Басак, А. К. Шахрай, О. К. Суворова**
Оценка уровней шума в Санкт-Петербургском метрополитене 652
- А. А. Воробьев, А. Л. Пенкин, Д. Р. Ведерникова**
Способ подачи топлива в газовый двигатель внутреннего сгорания 661

Ф. А. Смирнов, А. В. Новичихин Автоматизация приема вагонов к перевозке: система управления и нейросетевая модель	670
Е. В. Русанова Исследование экологической безопасности автоклавного золопенобетона, полученного с использованием золы от сжигания осадка сточных вод	686
А. С. Гапоненко, А. А. Киселев Диагностика системы взаимодействия железнодорожного пути и подвижного состава по параметрам комфорта езды и эквивалентной конусности	694
Д. С. Тарицын, Д. А. Орлов, А. И. Петухов Результаты испытаний макетного образца передачи с бесконтактным зацеплением на основе постоянных магнитов	706
К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин К совершенствованию технологии планирования транспортных процессов взаимодействия железнодорожных линий различных категорий	718
Р. А. Авхимович, С. В. Чижов Методы прогнозирования долгосрочного поведения преднапряженных железобетонных мостов.....	729

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ**

О. А. Малафеев, К. Чжан, И. В. Зайцева, А. В. Гаранин Проблемы поиска и преследования беспилотных летательных аппаратов с использованием теоретико-игрового подхода.....	744
---	-----

CONTENTS



GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

- T. Yu. Safonova**
Directions for ensuring the quality of gypsum-lime binders during Restoration 543
- A. A. Vorobev, A. L. Penkin, V. S. Smirnov**
Methodology for assessing the environmental effect of the use of biofuels 553
- P. V. Gerasimenko**
Diagnostics of the closeness of interdisciplinary connections based on semester examination assessments of students.....561
- A. M. Kolbikov, O. K. Suvorova, A. A. Fedoseenko**
Purification of peat groundwater by ultrafiltration and membrane purification 569



PROBLEMATICS OF TRANSPORT SYSTEM

- N. V. Malyshev**
Organization of terminal operations when storing containers on semi-trailers 575
- A. A. Makhonko, Y. G. Lazarev, A. A. Antonyuk**
Structural approach to assessing the performance of the monitoring system of engineering structures of the cable-stayed bridge over the Petrovsky Canal in the construction of the western speed diameter highway in St. Petersburg. Part 2 585
- S. V. Treskin, E. Yu. Dul'skij, V. A. Kruchek, P. Yu. Ivanov**
Analysis of the use of hydraulic vibration dampers in spring suspension structures of railway rolling stock 598
- V. D. Konstantinov, A. L. Novikov, A. A. Sokornov**
The key-segment extrusion during the construction of large-diameter transport tunnels 609
- N. A. Solovov, S. V. Chizhov, Yu. V. Avdey**
Methodological justification for the calculation of cold-formed steel thin-walled profiles in bridge structures at the project stage 622
- E. V. Ryazanova, S. M. Nauruzbaev, A. O. Kudelina**
Evaluation of proposals for the formation of a network of alternative routes for the "North-South" corridor 638
- M. A. Andronov, E. V. Basak, A. K. Shakhrai, O. K. Suvorova**
Assessment of noise levels in the St. Petersburg metro 652
- A. A. Vorobev, A. L. Penkin, D. R. Vedernikova**
The method of supplying fuel to an internal combustion gas engine.....661
- F. A. Smirnov, A. V. Novichikhin**
Automation of acceptance of wagons for transportation: control system and neural network model..... 670

E. V. Rusanova Research of ecological safety of autoclaved ash-foam concrete produced with ash from sewage sludge incineration	686
A. S. Gaponenko, A. A. Kiselyov Diagnostics of the railway track and rolling stock interaction system according to the parameters of ride comfort and equivalent taper.....	694
D. S. Taritsyn, D. A. Orlov, A. I. Petukhov Test results of a prototype transmission with non-contact gearing based on permanent magnets	706
K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin Towards improving the technology of planning transport processes of interaction between railway lines of various categories.....	718
R. A. Avkhimovich, S. V. Chizhov A review of long-term behavior prediction methods for prestressed concrete bridges.....	729

**HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT**

O. A. Malafeev, K. Zhang, I. V. Zaitseva, A. V. Garanin Problems of search and pursuit of unmanned aerial vehicles using the game-theoretic approach	744
---	-----



УДК 691.55

Направления обеспечения качества гипсоизвестковых вяжущих при реставрации

Т. Ю. Сафонова

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

Для цитирования: Сафонова Т. Ю. Направления обеспечения качества гипсоизвестковых вяжущих при реставрации // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 543–552. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-543-552

Аннотация

Цель: рассмотреть вопросы, связанные со стандартным определением прочностных характеристик воздушного вяжущего и цементного вяжущего. Показать технологическое решение проблемы регулирования прочности камня из воздушного вяжущего с помощью стабилизации ухода в период схватывания и твердения. **Методы:** при проведении исследований использовали ГОСТ 23789-2018 «Вяжущие гипсовые. Методы испытаний». **Результаты:** отличительная особенность реставрационных штукатурных растворов состоит в том, что структурообразование и набор прочности происходят только в воздушно-сухой среде. В итоге наличие утвержденных и применяемых стандартов на изготовление и применение реставрационных штукатурных растворов не гарантирует в полной мере создания надежной и безопасной среды для жизни памятника архитектурного наследия. Установлено, что механические характеристики (пределы прочности на сжатие и изгиб), а также упругие параметры должны быть одинаковыми или меньшими в исторических и реставрационных растворах, чтобы избежать изменений в распределении напряжений. **Практическая значимость:** разработанные с учетом комплексного ухода за твердеющим камнем гипсоизвестковые вяжущие могут иметь широкий спектр применения. Их можно использовать в качестве строительных растворов для консервации архитектурного наследия и при реконструкции современных зданий, самонесущих перегородок, элементов противопожарной защиты или гипсокартонов (в таких местах, где ожидается более высокая механическая нагрузка).

Ключевые слова: контроль качества, гипсовое вяжущее, известь, цементное вяжущее, предел прочности при изгибе, предел прочности при сжатии, твердение

Введение

Ремонтные растворы, применяемые к зданиям архитектурного наследия для сохранения, обслуживания, реставрации и укрепления, должны быть тщательно изучены с точки зрения множества различных проблем совместимости. В случае ремонтного вмешательства особенно важно учитывать такой аспект, как состав раствора, который может сильно влиять на явления усадки на этапах схватывания и за-

твердевания, а также должен иметь прочностные характеристики затвердевшего камня, не превышающие аналогичные характеристики реставрируемой поверхности. Актуальность выбора ремонтно-восстановительного раствора (выбор раствора с механическими и физико-химическими характеристиками, близкими к оригинальным), правильный уход во время схватывания и твердения, уход в сложных

экологических условиях — все это факторы, снижающие риски возникновения дефектов на разных уровнях [1].

Известь и гипс были наиболее распространенными растворами в древности и вплоть до начала XIX века. Характеристики известковых растворов зависят от местных природных ресурсов и региональной практики. Гипсовые растворы широко применялись в регионах, богатых месторождениями гипса. Их быстрое схватывание и адгезионная способность были важны для их использования в сводчатых конструкциях [2].

До сих пор гипс использовался почти исключительно во внутренних частях зданий в качестве штукатурных растворов или защитных плит с улучшенной сохранностью тепла, теплоизоляцией, звукопоглощением и огнестойкостью. Это достаточно дешевый и легкодоступный материал. Несмотря на неоспоримые преимущества, более широкое применение гипса во внешних частях зданий остается ограниченным из-за его высокой растворимости во влажной среде (около 2,5 г/л [3]) и относительно низких механических свойств по сравнению с традиционными строительными материалами.

Гипс относится к наиболее экологически чистым строительным материалам. Благодаря более низкому углеродному следу и потреблению энергии гипс может стать устойчивой альтернативой цементу в качестве связующего материала. Материалы с использованием гипса выделяют в 5–6 раз меньше углекислого газа, чем цемент [4].

Использование известки в качестве строительного и ремонтного материала в последнее время приобретает все большее значение, поскольку сохранение исторических сооружений стало проблемой. Применение известковых растворов не снижает воздухо-

проницаемость существующих конструкций. Известковые растворы обычно вступают в реакцию с присутствующим в атмосфере углекислым газом. Однако время реакции достаточно велико, поэтому возникают вопросы поиска метода ускорения процесса поглощения углекислого газа [5].

Исторический центр Санкт-Петербурга, широко известный во всем мире как Северная Венеция и являющийся объектом Всемирного наследия, возведен с использованием строительных растворов на основе гипса. Для устройства штукатурной отделки исторических зданий, как фасадной, так и интерьерной, широко применялись и гипсоизвестковые составы [6].

Учет качества реставрационных материалов является важным аспектом сохранения архитектурного наследия, деградация которого ускорилась из-за загрязнения окружающей среды, а также природных факторов, таких как температурные циклы, осадки, ветер, иные метеорологические переменные.

Сравнение данных по методам определения прочностных характеристик камня из вяжущего трех типов

Для каждого типа вяжущего существует стандарт, в котором изложены и методы испытаний (МИ). Определение предела прочности при изгибе (ППИ) и предела прочности при сжатии (ППС), начиная с момента приготовления смеси нормальной консистенции и завершая представлением окончательного результата (для гипсового и цементного вяжущих, а также известки строительной), изложено в табл. 1 (цветом выделены различия методов, сроков, температуры приготовления проб, условий хранения образцов до проведения испытаний и прочих факторов).

ТАБЛИЦА 1. Методы определения ППИ и ППС образцов, приготовленных из гипсового вяжущего, строительной извести, цемента

1	2	3
ГОСТ 23789-2018. Вяжущие гипсовые. МИ	ГОСТ 22688-2018. Известь строительная. МИ (только для гидравлической извести)	ГОСТ 310.4-81. Цементы. Методы определения ППИ и ППС*
* ППИ и ППС определяют испытанием образцов (из смеси нормальной консистенции — НК) призматической формы 160 × 40 × 40 мм		
Подготовка проб		
Вяжущее (1–1,6 кг) добавляют в воду, взятую в количестве, необходимом для приготовления смеси НК, перемешивают, заливают в призматическую форму, уплотняют ударами формы о поверхность стола	Известь и песок смешивают в соотношении 1:3. Добавляют воду (0,5 от общего объема). Смесь остужают до 25–30 °С, добавляют остальную воду для получения раствора с распылом конуса 110–115 мм, заливают в призматическую форму	1,5 кг песка, 0,5 кг цемента смешивают. Добавляют 0,2 воды, необходимой для раствора НК. Форму-конус устанавливают на встряхивающий столик. Раствор заливают поэтапно в два слоя. Каждый слой штыкуется. Далее форму-конус снимают, цементный же конус встряхивают 30 раз, а его основание измеряют для фиксации величины распыла НК (106–115 мм). Призматическую форму на включенном встряхивающем столике заполняют порционно в течение 5 минут
Условия ухода за образцами		
Образцы из гипсового вяжущего по завершении схватывания извлекают из формы, выдерживают при температуре 23 °С и относительной влажности 50%	Образцы выдерживают в емкости с гидравлическим затвором над водой 5–6 суток, далее — 21 сутки в воде	Образцы, оставляя их в форме, выдерживают в емкости с гидравлическим затвором 24 часа. Затем достают из емкости, извлекают из форм и помещают в емкость с водой при температуре 20 °С. Вода покрывает образцы. Ее заменяют в бассейне раз в две недели. После 28 суток твердения образцы извлекают из ванной. Испытания проводят максимум за час
Возраст образцов после контакта с водой при проведении испытания		
2 часа	28 суток	28 суток
Скорость нарастания нагрузки при определении ППИ		
(50 ± 10) Н/с	(0,05 ± 0,01) кН/с	
Определение ППИ		
Среднее арифметическое значение результатов испытания трех образцов	Среднее арифметическое значение двух наибольших результатов испытания трех образцов	
Скорость нарастания нагрузки при определении ППС		
(50 ± 10) Н/с	(2,0 ± 0,5) МПа/с	
Определение ППС		
Среднее арифметическое результатов шести испытаний без наибольшего и наименьшего результатов	Среднее арифметическое значение четырех наибольших результатов испытания шести образцов	

Материалы и методы

В качестве сырья, используемого в эксперименте, присутствуют гидратная известь, гипсовое вяжущее и суперпластификатор. Известь строительная гидратная представ-

ляет собой порошок, основной минеральной фазой которого является $\text{Ca}(\text{OH})_2$ производства ОАО «Угловский известковый комбинат». Гипс марки Г-6Б — ООО «Майкопгипсстрой». Использована добавка-пластификатор

C-3 (ООО «СУПЕРПЛАСТ»), которая была разведена в воде затворения в % по массе относительно количества вяжущего. Добавка успешно применяется в строительных работах, сырьем для нее является конденсат нафталинформальдегидной смолы. Пластификатор снижает потребность в воде, имеет хорошую совместимость с различными цементом [7].

Оценено влияние процентного содержания извести на прочностные характеристики камня из гипсового вяжущего нормально-влажного твердения. ППИ и ППС образцов определены способами, рекомендованными ГОСТ 23789-2018, в связи с тем, что содержание гипса в гипсоизвестковом вяжущем составляет 76–100 мас. %.

В воду затворения (при водотвердом отношении (В/Т), равном 0,56) вводили смешанное вяжущее, перемешивали, разливали в призматические формы. Были приготовлены 21 образец из вяжущего с содержанием извести от 0 до 24 мас. % со временем отверждения 28 суток и девять образцов из вяжущего с содержанием извести 12 мас. % со временем отверждения, равным 7, 14 и 21 суткам. Образцы по достижении заданного возраста в камере нормально-влажного твердения (относительная влажность воздуха 95%, температура 20 °С) выдерживали до постоянной массы в сушильном шкафу (температура 65 °С).

ППИ определен как среднее арифметическое значение двух наибольших результатов испытания из трех образцов. Половинки образцов-призм испытаны на сжатие на прессе ИП-100М. ППС отдельного образца вычислен как частное от деления величины разрушающей нагрузки на рабочую площадь пластины (на 25 см²).

Результаты и обсуждение

При проведении эксперимента определено, что с возрастанием доли извести в смешанном вяжущем до 24 мас. % (для камня возраста 28 суток):

- содержание C-3 в смеси возрастает;
- ППИ снижается на 81% по сравнению с контрольным образцом (гипсовый камень);
- ППС снижается на 57%.

ППС гипсового камня превышает ППИ в 3,2 раза. При содержании извести в смешанном вяжущем более 12 мас. % разница в аналогичных показателях составляет 7,5 раза и более. От содержания извести просматривается зависимость: **меньше — лучше**.

Полученные данные представлены на рис. 1.

Аналогичные данные представлены на рис. 2 для камня возраста 2 часа из гипсового вяжущего и на рис. 3 для камня возраста 28 суток из вяжущего нормально-твердеющего цементного.

От марки гипсового вяжущего и цементного вяжущего прослеживается обратная зависимость: марка **выше** — разница в показателях **больше**. ППС камня из гипсового вяжущего марки Г-25 превышает ППИ в 3,1 раза, аналогичный показатель для вяжущего марки Г-2 составляет 1,7 раза. ППС камня из цементного вяжущего марки М600 превышает ППИ в 8,2 раза, аналогичный показатель для вяжущего марки М300 составляет 5,1 раза.

Представлен анализ зависимостей ППИ от ППС камня, полученного при твердении вяжущего трех типов (гипсоизвесткового, гипсового и цементного), на основании экспериментальных данных автора и значений, представленных в нормативных документах.

Авторами [8] разработан торкрет-бетон с увеличенным (35 мас. %) содержанием

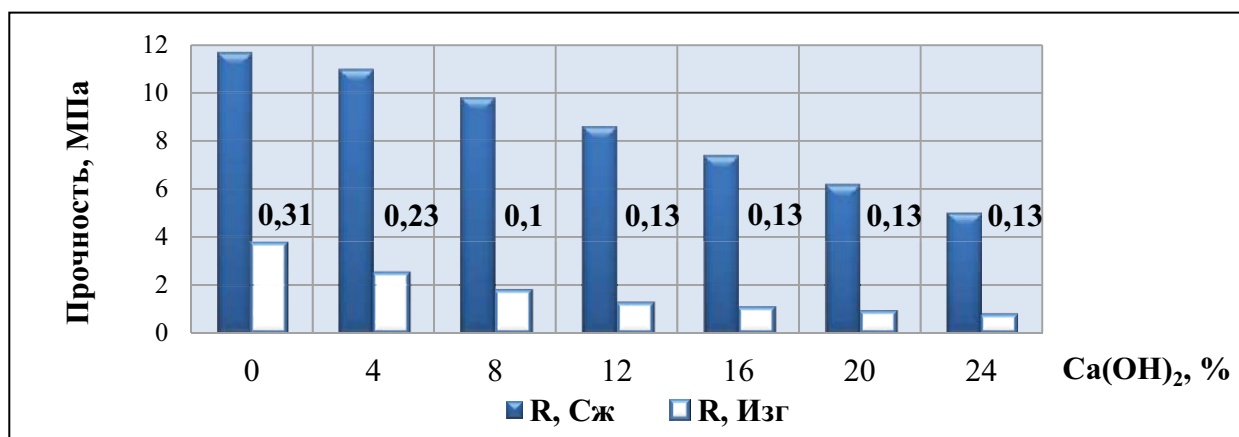


Рис. 1. Влияние увеличения количества извести в смеси вяжущего на прочность гипсоизвесткового камня возраста 28 суток

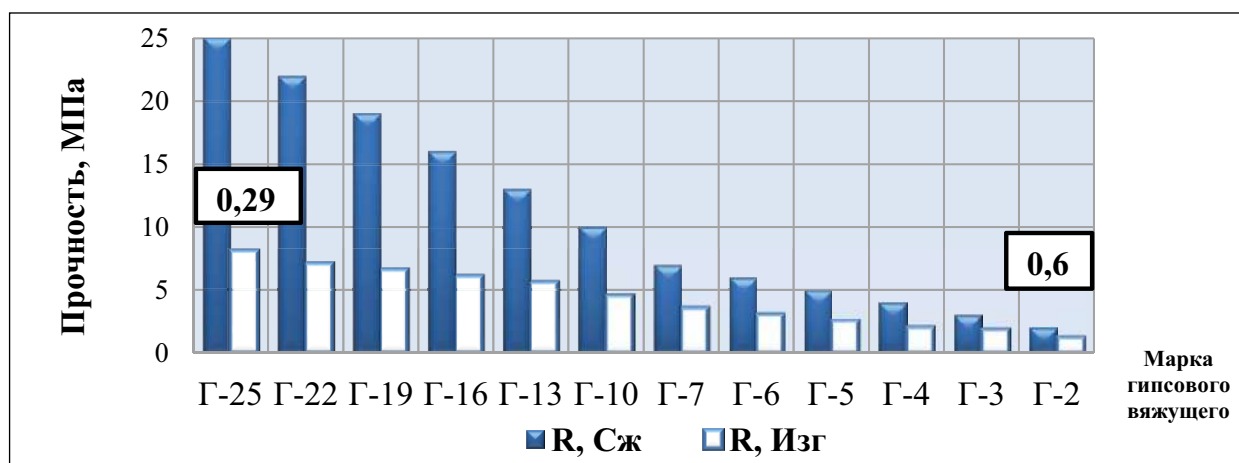


Рис. 2. Марка гипсового вяжущего в зависимости от показателей прочности камня возраста 2 часа, согласно ГОСТ 23789-2018

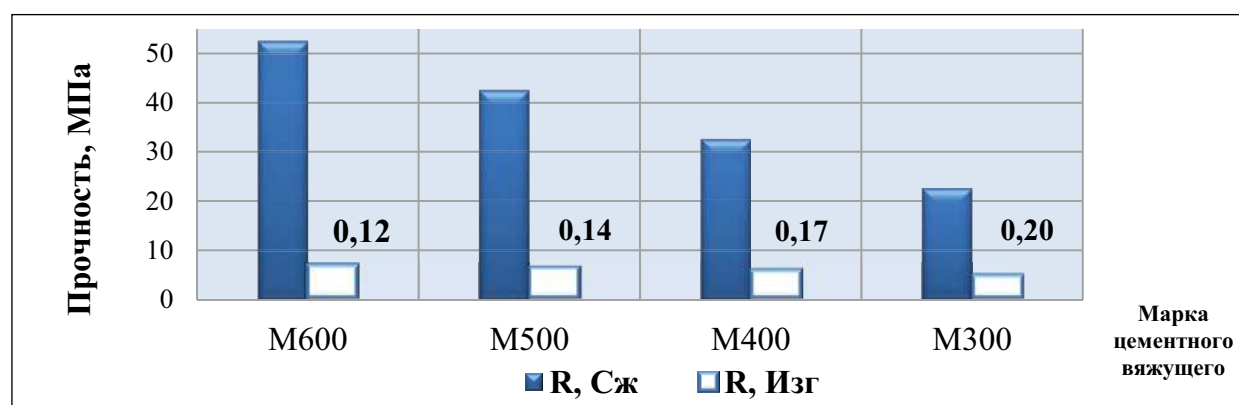


Рис. 3. Марка нормально-твердеющего цементного вяжущего в зависимости от показателей прочности камня возраста 28 суток

алюмосиликатной составляющей (АСС), полученной из золошлаковых смесей ГРЭС, в полиминеральном вяжущем. По результатам испытаний прочность торкрет-бетона на композиционном вяжущем имеет тенденцию к возрастанию с увеличением содержания АСС. Более того, отношение ППИ к ППС позволяет предположить, что увеличение АСС и снижение В/Т за счет применения С-3 улучшает характеристики раствора на композиционном вяжущем. Отношение ППИ к ППС в разном возрасте для разработанного состава превосходит значения контрольного состава. Показатели прочности торкрет-бетона возраста 28 суток представлены на рис. 4.

Отношение ППИ к ППС цементных бетонов рассмотрено в работе [9]. Создана матрица данных из прочностных показателей бездобавочных бетонов и бетонов, содержащих минеральные добавки. Сделан вывод, что в утвержденных стандартах присутствует ряд вопросов по согласованию соотношения классов бетона по ППИ и ППС.

Анализ литературных источников не выявил наличия теории, выражающей зависимости ППИ от ППС камня из воздушного вяжущего. С учетом того что прочность реставрационного состава не должна превы-

шать прочность реставрируемого материала, прочностные прогнозируемые характеристики камня из реставрационного раствора являются показателем качества гипсоизвесткового вяжущего.

Скорость нарастания прочности камня с увеличением количества извести в смеси вяжущего снижается, так как процесс уплотнения коллоидных систем гидроксида кальция — процесс, требующий длительного времени, искусственной карбонизации или присутствия активной добавки. Результат испытаний образцов разного возраста из гипсоизвесткового вяжущего с содержанием извести 12 мас.% представлен на рис. 5. Зеленым маркером отмечено значение ППС камня возраста 2 часа из гипсового вяжущего.

Было замечено [10], что небольшие добавки негашеной извести ухудшают механические и микроструктурные свойства смешанного воздушного вяжущего, приводят к снижению прочности камня (рис. 6). Но совместимые консервационные материалы можно легко разработать так, чтобы они соответствовали свойствам оригинальных исторических штукатурок. Условия ухода за образцами по достижении ими предельного возраста имеют ряд отличий от требований

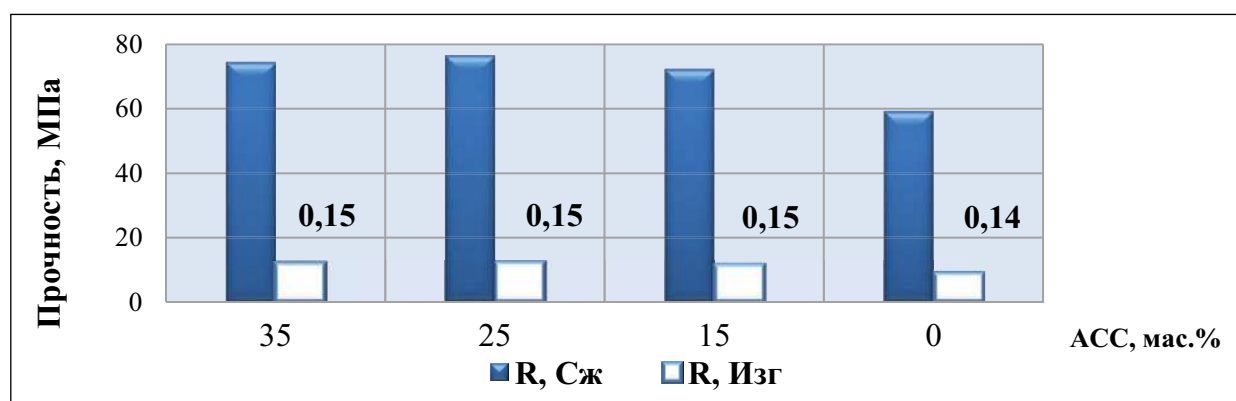


Рис. 4. Влияние увеличения количества АСС в композиционном вяжущем на прочность торкрет-бетона возраста 28 суток

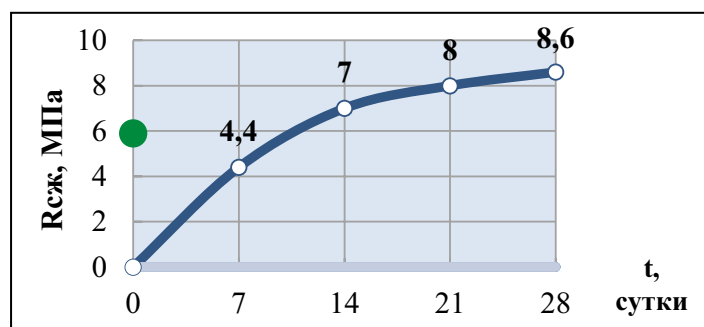


Рис. 5. Изменение ППС камня из гипсоизвесткового вяжущего

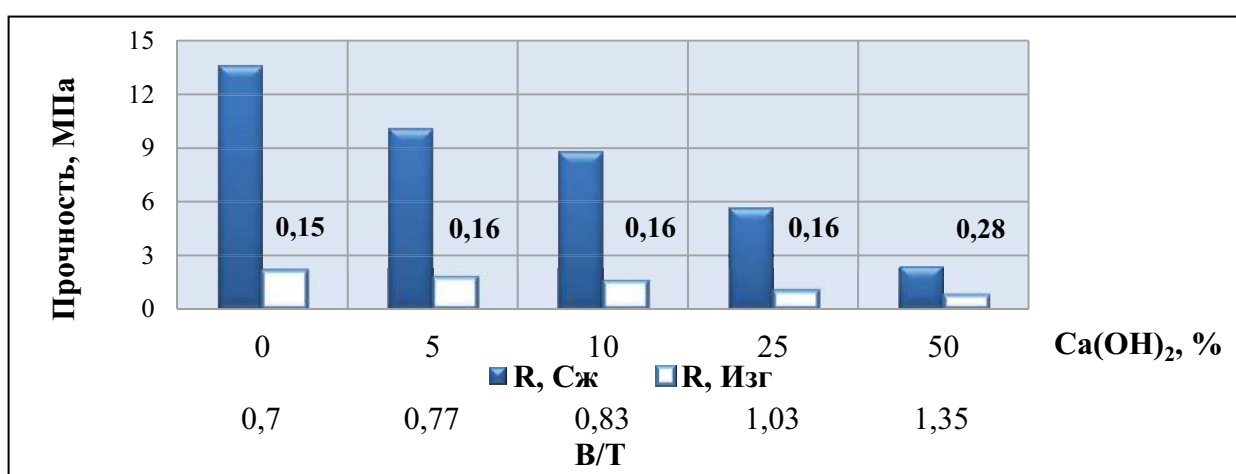


Рис. 6. Влияние увеличения количества извести в смеси вяжущего на прочность гипсоизвесткового камня возраста 28 суток [10]

ГОСТ 23789-2018. Достижение равной подвижности смесей скорректировано изменением В/Т, что показано на рис. 6.

ППС камня из гипсового вяжущего превышает ППИ в 6,8 раза. При содержании извести в гипсоизвестковом вяжущем 50 мас.% разница в аналогичных показателях составляет 3,5 раза. От содержания извести просматривается зависимость: больше — лучше, что противоречит данным нашего исследования (меньше — лучше). Выявленный аспект можно пояснить следующими факторами:

- присутствие пластификатора для регулирования В/Т смесей (в настоящем исследовании);

- различия в химическом составе гипсоизвесткового вяжущего;

- различия в подготовке проб гипсоизвесткового вяжущего;

- условия ухода за образцами в период набора прочности.

Исследования [11] показали, что небольшая добавка воздушной или гидравлической извести (15 мас.%) приводит к повышению прочности гипсового камня, что представлено на рис. 7. Приготовлены смеси **разной** подвижности с **одинаковым** В/Т, равным 0,5:

- 1 — из гипсового вяжущего;

- 2 — из гипсового вяжущего и воздушной извести;

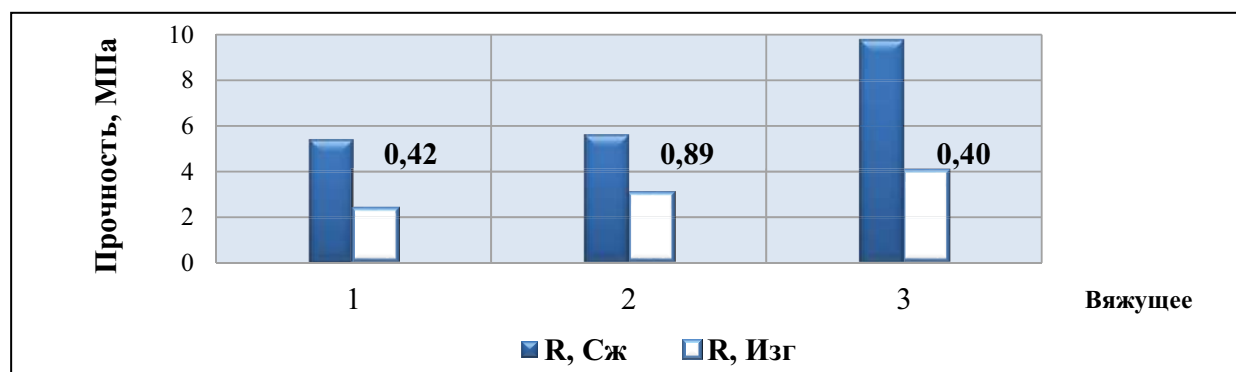


Рис. 7. Влияние добавки извести на прочность гипсового камня возраста 28 суток [11]

3 — из гипсового вяжущего и извести гидравлической.

Условия ухода за образцами по достижении ими предельного возраста имеют ряд отличий от требований ГОСТ 23789-2018.

В этом исследовании не рассматривается зависимость прочности при изгибе от прочности при сжатии, так как выявлен ряд аспектов, несогласованных со стандартами на гипсовое вяжущее. Но можно отметить, что отношение рассматриваемого показателя существенно отличается от данных, полученных автором работы.

Выводы

Контроль качества гипсоизвесткового вяжущего, предназначенного для реставрационных работ, — это соответствие (аутентичность) физико-механических свойств исторического штукатурного раствора и раствора реставрационного.

К проектированию реставрационных растворов следует подходить с консервативной точки зрения, что считается необходимым для сохранения целостности архитектурного наследия и продвижения действительно устойчивых мер. Для замены поврежденных внутренних покрытий стен и потолков следует соблюдать общие

правила совместимости применяемых компонентов, а именно:

1) механические характеристики — ППИ и ППС, а также упругие параметры должны быть одинаковыми или меньшими, чтобы избежать изменений в распределении напряжений;

2) составы реставрационных штукатурных растворов не должны блокировать проход воды или водяного пара, циркулирующих внутри этих компонентов.

Библиографический список

1. Субботин О.С. Особенности использования строительных материалов в реставрации архитектурно-градостроительного наследия // Строительные материалы и изделия. 2019. Т. 2. № 3. С. 85–89. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-3-85-89.
2. Vitti P. Lime and Gypsum Mortars in Historic Construction // Encyclopedia of Archaeology (Second Edition). 2024. Vol. 2B. P. 531–543. DOI: 10.1016/B978-0-323-90799-6.00064-1.
3. Conversion of calcium sulfate dihydrate into calcium phosphates as a route for conservation of gypsum stuccoes and sulfated marble / E. Sassoni [et al.] // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 170. P. 290–301. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.075.
4. Fort J., Cerny R. Carbon footprint analysis of calcined gypsum production in the Czech Republic //

Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 177. P. 795–802. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.002.

5. Athira V. S., Manohar S. Carbonation of air lime mortars under natural and accelerated conditions — a systematic review // *Materials today: Proceedings*. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.082.

6. Рахимов Р.З. Гипс в строительстве с древних веков до современности // *Academia. Архитектура и строительство*. 2021. № 4. С. 120–124. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-4-120-124.

7. Барабанщиков Ю.Г., Комаринский М.В. Суперпластификатор С-3 и его влияние на технологические свойства бетонных смесей // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014. № 6 (21). С. 58–69.

8. Панарин И.И., Федюк Р.С., Меркулов Д.С. Усиление конструкций подземных сооружений торкрет-бетоном // *Строительные материалы и изделия*. 2022. Т. 5. № 6. С. 5–18. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-6-5-18.

9. Несветаев Г.В., Кузьменко Т.Г. О соотношении пределов прочности цементных бетонов на рас-

тяжение при изгибе и сжатии // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8605.

10. The effect of lime addition on weathering resistance and mechanical strength of gypsum plasters and renders / K. Elert [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. 2023. Vol. 139. P. 105012. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105012.

11. Characterization and chromatic evaluation of gypsum-based pastes for construction and heritage restoration / M. Paz Saez-Perez [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 307. P. 124981. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124981.

Дата поступления: 13.06.2024

Решение о публикации: 10.08.2024

Контактная информация:

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

Directions for ensuring the quality of gypsum-lime binders during restoration

T. Yu. Safonova

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

For citation: *Safonova T. Yu. Directions for ensuring the quality of gypsum-lime binders during restoration // Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 543–552. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-543-552

Abstract

Purpose: to consider issues related to the standard definition of the strength characteristics of an air binder and a cement binder. To show a technological solution to the problem of regulating the strength of an air binder stone by stabilizing care during setting and hardening. **Methods:** during the research, GOST 23789-2018 “Gypsum binders. Test methods”. **Results:** a distinctive feature of restoration plaster solutions is that structure formation and strength gain occur only in an air-dry environment. As a result, the availability of approved and applied standards for the manufacture and use of restoration plaster solutions does not fully guarantee the creation of a reliable and safe environment for the life of an architectural heritage monument. It has been established that the mechanical characteristics (compressive and bending strength limits), as well as elastic parameters should be the same or lower in historical and restoration solutions

in order to avoid changes in stress distribution. **Practical significance:** developed taking into account the comprehensive care of hardening stone, gypsum-lime binders can have a wide range of applications. They can be used as mortars for the preservation of architectural heritage and in the reconstruction of modern buildings, self-supporting partitions, fire protection elements or drywall (in places where a higher mechanical load is expected).

Keywords: quality control, gypsum binder, lime, cement binder, flexural strength, compressive strength, hardening

References

1. Subbotin O. S. Osobennosti ispol'zovaniya stroitel'ny'x materialov v restavracii arhitekturno-gradostroitel'nogo naslediya // Stroitel'ny'e materialy' i izdeliya. 2019. T. 2. № 3. S. 85–89. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-3-85-89. (In Russian)
2. Vitti P. Lime and Gypsum Mortars in Historic Construction // Encyclopedia of Archaeology (Second Edition). 2024. Vol. 2B. P. 531–543. DOI: 10.1016/B978-0-323-90799-6.00064-1.
3. Conversion of calcium sulfate dihydrate into calcium phosphates as a route for conservation of gypsum stuccoes and sulfated marble / E. Sassoni [et al.] // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 170. P. 290–301. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.075.
4. Fort J., Cerny R. Carbon footprint analysis of calcined gypsum production in the Czech Republic // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 177. P. 795–802. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.002.
5. Athira V. S., Manohar S. Carbonation of air lime mortars under natural and accelerated conditions — a systematic review // Materials today: Proceedings. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.082.
6. Raximov R. Z. Gips v stroitel'stve s drevnix vekov do sovremennosti // Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. 2021. № 4. S. 120–124. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-4-120-124. (In Russian)
7. Barabanshnikov Yu. G., Komarinskij M. V. Superplastifikator S-3 i ego vliyanie na texnologicheskie svoystva betonny'x smesey // Stroitel'stvo unikal'ny'x zdaniy i sooruzhenij. 2014. № 6 (21). S. 58–69. (In Russian)
8. Panarin I. I., Fedjuk R. S., Merkulov D. S. Usilenie konstrukcij podzemny'x sooruzhenij torkret-betonom // Stroitel'ny'e materialy' i izdeliya. 2022. T. 5. № 6. S. 5–18. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-6-5-18. (In Russian)
9. Nesvetaev G. V., Kuz'menko T. G. O sootnoshenii predelov prochnosti cementny'x betonov na raspyazhenie pri izgibe i szhatii // Inzhenerny'j vestnik Dona. 2023. № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8605. (In Russian)
10. The effect of lime addition on weathering resistance and mechanical strength of gypsum plasters and renders / K. Elert [et al.] // Cement and Concrete Composites. 2023. Vol. 139. P. 105012. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105012.
11. Characterization and chromatic evaluation of gypsum-based pastes for construction and heritage restoration / M. Paz Saez-Perez [et al.] // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 307. P. 124981. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124981.

Received: 13.06.2024

Accepted: 10.08.2024

Author's information:

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

УДК 656.13+62-634

Методика оценки экологического эффекта от применения биотоплив

А. А. Воробьев¹, А. Л. Пенкин², В. С. Смирнов²

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

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4

Для цитирования: Воробьев А. А., Пенкин А. Л., Смирнов В. С. Методика оценки экологического эффекта от применения биотоплив // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 553–560. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-553-560

Аннотация

Цель: снижение экологического ущерба от транспортных средств обеспечивается за счет совершенствования их конструкций и двигателей, рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания, а также применения альтернативных топлив. Для определения рациональности использования биотоплив в транспортных средствах необходимо оценить экологический эффект, который будет достигнут при их применении. **Методы:** рассмотрены существующие методики оценки выбросов отработавших газов от автотранспортных средств. В качестве основы для расчета вредных веществ отработавших газов используется существующий способ из «Временной типовой методики определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды», в качестве основы для расчета выбросов углекислого газа применяется метод, приведенный в приказе Минприроды «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов». На их основе выполнены доработки, которые включают в себя ввод дополнительных коэффициентов, учитывающих изменение экологической нагрузки в зависимости от процентного содержания биотоплива в смеси с традиционным углеводородным топливом. **Результаты:** произведен расчет экологического эффекта от использования биотоплив на примере добавления биодизеля в нефтяное дизельное топливо, для определения которого на основе статистических данных от Агентства по охране окружающей среды США и данных НАМИ были установлены зависимости изменения годовых выбросов вредных веществ и углекислого газа для грузового транспортного средства большой грузоподъемности. В дополнение к расчету в статье представлены графики выбросов вредных веществ с учетом их относительной агрессивности и количества выделяемого углекислого газа в процессе сгорания биодизельных смесей. **Практическая значимость:** предложенный способ расчета экологического эффекта позволяет производить оценку объемов выбросов вредных веществ и углекислого газа в зависимости от концентрации биотоплива в смеси с традиционным топливом. Такой подход может обеспечивать общую картину эффекта применения биодизеля, и вместе с тем используемые коэффициенты нуждаются в уточнении.

Ключевые слова: биотопливо, биодизель, нефтяной дизель, экологический ущерб, альтернативные топлива, расчет ущерба

Введение

При сжигании углеводородных топлив в атмосферу выбрасывается значительное количество углекислого газа, скопление которого приводит к отрицательным процес-

сам, обусловленным парниковым эффектом. Сырьем для производства биотоплива могут быть растительные масла из сельскохозяйственных культур — первое поколение [1],

животные жиры [2] и любые жиросодержащие отходы — второе поколение [3], а также микроводоросли — третье поколение [4]. В жизненном цикле первого и третьего поколения биотоплив часть выбросов углекислого газа в атмосферу поглощается при выращивании сырья в процессе фотосинтеза, за счет чего сохраняется баланс углекислого газа в атмосфере при сжигании топлива [5]. Поэтому общее воздействие, которое биотопливо может оказать на глобальное потепление, будет зависеть не только от продуктов его сгорания, но и от выбросов, связанных с полным жизненным циклом производства и потребления биотоплива [3, 6].

Одним из направлений снижения экологической нагрузки на окружающую среду является биодизельное топливо, которое в настоящий момент добавляют в нефтяное дизельное топливо [7]. В основном биодизель применяют в качестве добавки в концентрациях 5–20% [8], так как считается, что это позволяет повысить цетановое число, улучшить смазочные свойства и экологические характеристики, при этом не ухудшив остальные показатели двигателя внутреннего сгорания [9]. Но для определения рациональности использования биотоплив в транспортных средствах необходимо оценить экологический эффект, который будет достигнут при их применении.

Оценка изменения выброса вредных веществ при использовании биотоплив

Учитывая сказанное выше, экологический эффект (ЭЭ) от применения смеси нефтяного дизельного топлива с биодизелем (далее — смесь) может описываться следующей зависимостью:

$$\text{ЭЭ} = f(M_{\text{вв}}(x); E_{\text{CO}_2}(x)), \quad (1)$$

где x — это содержание биодизеля в смеси, %;

$M_{\text{вв}}$ — приведенная масса токсичных выбросов за год, усл. т/год;

E_{CO_2} — масса выбросов углекислого газа, т/год.

Определяем приведенную массу токсичных выбросов за год ($M_{\text{вв}}$, усл. т/год) от выхлопных газов автомобиля при использовании смесового топлива и сравниваем со значениями базового варианта на ДТ. Таким образом, сравнение показателей, полученных для смесей с разными концентрациями, с показателями для базового ДТ будет давать первое представление об экологическом эффекте от применения таких смесей.

При этом оценка данного параметра будет основана на «Временной типовой методике определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды» (1986). Но с помощью данного способа будет затруднительно оценить экологический эффект для исследуемых смесей, поэтому для решения данной задачи предлагается доработать и дополнить существующие методы.

Значения, необходимые для расчета предельно допустимой концентрации вредного вещества (ПДК), отображены в табл. 1, где ПДК_{сут} — среднесуточная предельно допустимая концентрация, ПДК_{раб.зоны} — разовая предельно допустимая концентрация или значения ориентировочно безопасного уровня воздействия.

ТАБЛИЦА 1. Значения ПДК для вредных веществ выхлопных газов автомобиля

Показатель	СО	СН	NO _x	PM
ПДК _{сут}	3	1,5	0,1	0,06
ПДК _{раб.зоны}	20	30	5	6

Посчитанные значения относительной опасности присутствия вредных веществ в воздухе приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Расчет относительной агрессивности вредных веществ

Показатель	СО	СН	NO _x	PM
a_i	1	1	1	2
d_i	1	1	1,5	1,2
λ_i	1	1	1	1
β_i	1	5	1	1
a_i	0,09	0,11	1	1,18
A_i	0,09	0,53	1,5	2,83

Оценка экологического ущерба окружающей среде применима для однокомпонентных топлив, ее расчет можно оценить как непосредственным измерением выбросов вредных веществ, так и по накопленным за все время статистическим данным, что значительно упрощает процесс оценки. В случае же расчета для смесей ДТ с биодизелем предлагается ввести коэффициент, учитывающий изменения экологической нагрузки и зависящий от процентного содержания биотоплива в смеси.

Данный коэффициент будет учитываться при расчете приведенной массы годового выброса вредных веществ. Для сравнения показателей экологического ущерба расчет производится сначала для двигателя, работающего на нефтяном дизельном топливе.

Чтобы оценить примерный годовой выброс вредного вещества i -го вида в атмосферу (m_i), можно провести расчет для восьмицилиндрового дизельного двигателя КамАЗ 740.75-440 (объем 11,76 л, мощность 440 л. с., 4-й экологический класс) со средним временем работы в году 1800 ч (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Нормы выбросов вредных веществ дизельными автомобилями категории N3

Экологический класс	Допустимая норма, г/кВт·ч			
	СО	СН	NO _x	PM
1	4,50	1,10	8,00	0,36
2	4,00	1,10	7,00	0,15
3	2,10	0,66	5,00	0,10
4	1,50	0,46	3,50	0,02
5	1,50	0,46	2,00	0,02

Расчет производится перемножением удельной массы выбросов вредного вещества i -го вида (г/кВт·ч), которая берется из табл. 2, времени эксплуатации (ч) и мощности данного ТС (кВт·ч). Единица измерения полученных значений из г/год переводится в т/год, и данные значения сводятся в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Полученные значения массы годового выброса ВВ, т/год

СО	СН	NO _x	PM	Σ
1,188	0,36432	2,772	0,01584	4,34016

Данные значения веществ используются для получения значений $M_{ВВ}$, сведенных в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. Полученные значения веществ используются для получения значений $M_{ВВ}$ для нефтяного дизельного топлива, усл. т/год

СО	СН	NO _x	PM	Σ
0,1069	0,1931	4,158	0,0448	4,5028

Коэффициент для вредного вещества i -го вида, учитывающий изменение выбросов вредных веществ и зависящий от процентного содержания биотоплива в смеси,

возможно определить с помощью зависимостей, основанных на статистических данных от Агентства по охране окружающей среды США [6]. В отчете учитывались данные по двигателям, используемым на грузовиках большой грузоподъемности.

С помощью данных коэффициентов были получены данные по приведенной массе годового выброса вредных веществ для смешанного топлива с биодизелем, содержащегося в разных концентрациях (рис. 1).

За счет высокой относительной агрессивности NO_x и большой массы выбросов этого вещества при работе на дизельном цикле значение общей приведенной массы вредных веществ медленно растет с увеличением процентного содержания биодизельного топлива в смеси.

Оценка влияния применения биотоплив на парниковый эффект

На парниковый эффект влияют не вредные вещества, а парниковые газы, и прежде всего CO_2 . Поэтому для полной оценки влияния данного смешанного топлива на окружающую среду в расчете необходимо учитывать и массу годового выброса CO_2 .

Существующие методики не учитывают эффект от основного парникового компонента, которым является углекислый газ. Для компенсации этого недостатка можно использовать формулу от Минприроды России.

По этой причине вводится коэффициент, учитывающий разницу выбросов углекислого газа между ДТ и его смесями с биодизелем. Тогда формула (2) будет выглядеть следующим образом:

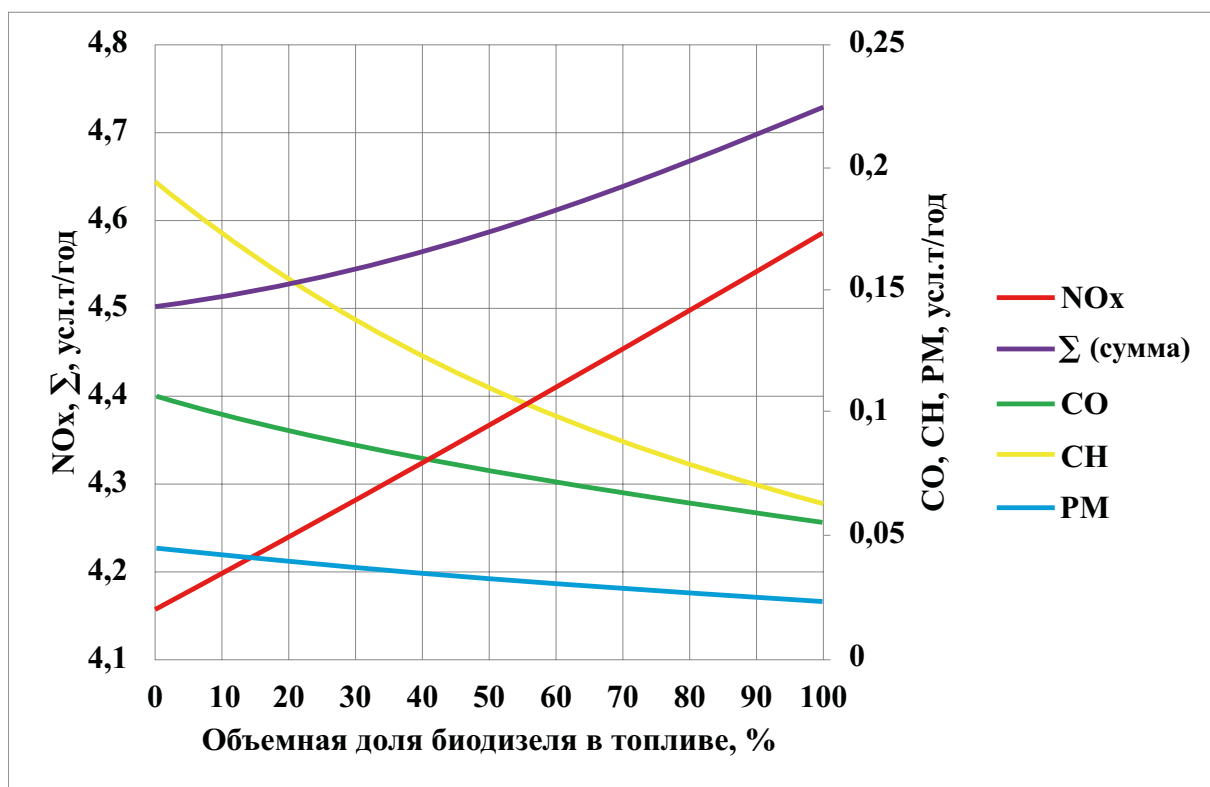


Рис. 1. Полученные значения приведенной массы годового выброса вредных веществ M_{vv} , усл. т/год

$$E_{CO_2,y} = \sum_{j,b,y} (FC_{j,b,y} \cdot EF_{j,b} \cdot K_{\text{био}}^{CO_2}), \quad (2)$$

где $FC_{j,b,y}$ — расход топлива вида j ТС типа b за период y , т;

$EF_{j,b}$ — коэффициент выбросов CO_2 при использовании в ТС типа b вида топлива j , т CO_2 /т;

j — вид топлива;

b — тип ТС;

$K_{\text{био}}^{CO_2}$ — коэффициент, учитывающий изменение выбросов CO_2 в зависимости от процентного содержания биотоплива в смеси.

Коэффициент $K_{\text{био}}^{CO_2}$ рассчитывался по средним значениям исходя из данных [10].

Режим эксплуатации транспорта был определен такими данными: рабочих дней в году — 247, длительность рабочего дня — 8 ч, средняя скорость движения — 60 км/ч. Расход топлива для выбранного двигателя —

33 л на 100 км. Плотность нефтяного дизельного топлива — 0,84 кг/л. Коэффициент выбросов CO_2 для ДТ — 3,149.

Результаты расчета массы годового выброса CO_2 по формуле 2 в зависимости от содержания биодизельного топлива в смеси представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что масса годового выброса CO_2 значительно снижается по мере увеличения содержания биодизельного топлива в смеси. Расчет для CO_2 проводился без учета относительной агрессивности, так как ущерб, который наносится окружающей среде, заключается не во вредности данного компонента, а во вкладе, который он вносит в парниковый эффект. Поэтому итоговые показатели расчетов для вредных веществ и углекислого газа суммировать некорректно и стоит их учитывать как отдельные факторы, влияющие на экологическую нагрузку.

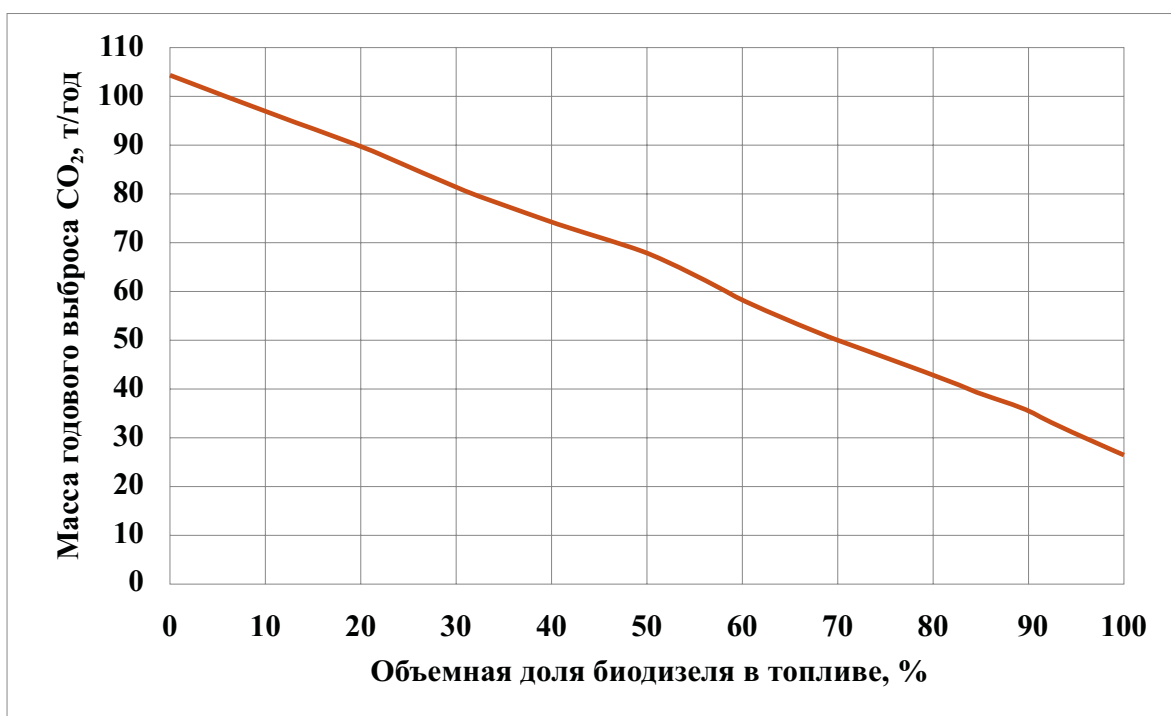


Рис. 2. Полученные значения массы годового выброса CO_2 , т/год в зависимости от процентного содержания биодизеля в смеси

Заключение

Таким образом, с учетом ввода дополнительных коэффициентов, учитывающих изменение экологической нагрузки для грузового транспортного средства, коэффициенты для вредных веществ и углекислого газа установлены по усредненному биодизельному топливу, не учитывая сырье и способ производства топлива и исходя из данных Агентства по охране окружающей среды США [6] и данных НАМИ [10], где были двигатели с несовершенными системами и устройствами снижения токсичности отработавших газов. Такой подход может обеспечивать общую картину эффекта применения биодизеля, и вместе с тем используемые коэффициенты нуждаются в уточнении.

Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации Федеральной программы поддержки университетов «ПРИОРИТЕТ 2030».

Библиографический список

1. Винаров А. Ю., Дирин Е. Н. Биодизель из растительного сырья. Повышение конкурентоспособности за счет переработки отходов производства // Транспорт на альтернативном топливе. 2009. № 4 (10).
2. Жидкое биотопливо из растительного и животного сырья. Технические и экономические аспекты / Д. Г. Горохов [и др.] // Вестник МГУЛ — Лесной вестник. 2010. № 4.
3. Кучкина А. Ю., Сушик Н. Н. Источники сырья, методы и перспективы получения биодизельного топлива // Журнал СФУ. Биология. 2014. № 1.
4. Черкаев Г. В., Чихонадских Е. А. Анализ критериев получения биотоплива из водорослей // Тру-

ды Крыловского государственного научного центра. 2021. № S1.

5. Халиль И. А., Шевченко Д. В. Биоэнергетика автотранспорта // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования, 2011. № 4.

6. U.S. Environmental Protection Agency (2002). A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions (EPA 420-P-02-001). Washington, DC: Assessment and Standard Division, Office of Transportation and Air Quality, USEPA.

7. Исследование целесообразности использования биодизельных топлив в качестве смесового компонента товарных дизельных топлив / Н. Е. Белозерцева [и др.] // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. № 1 (40).

8. Выбор наиболее предпочтительного сырья для синтеза биодизельного топлива с позиции его выхода и физико-химических свойств / Н. Е. Белозерцева [и др.] // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. № 1 (32).

9. Применение биодизельного топлива в условиях холодного климата / А. Л. Пенкин [и др.] // Грузовик. 2024. № 1.

10. Козлов А. В., Теренченко А. С. Оценка эффективности применения биодизельного моторного топлива в полном жизненном цикле // Транспорт на альтернативном топливе. 2008. № 2 (2).

Дата поступления: 14.06.2024

Решение о публикации: 05.08.2024

Контактная информация:

ПЕНКИН Алексей Леонидович — канд. техн.

наук, доцент; apenkin1@gmail.com

СМИРНОВ Вадим Сергеевич — магистрант;

v.s.smirnof@yandex.ru

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — докт. техн.

наук, доцент; nttk@pgups.ru

Methodology for assessing the environmental effect of the use of biofuels

A. A. Vorobev¹, A. L. Penkin², V. S. Smirnov²

¹ Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., Saint-Petersburg, 190005, Russia

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

For citation: Vorobev A. A., Penkin A. L., Smirnov V. S. Methodology for assessing the environmental effect from the use of biofuels // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 553–560. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-553-560

Abstract

Purpose: the fight for ecology in the transport sector is ensured by improving the design of vehicles and engines, the working processes of internal combustion engines, as well as the use of alternative fuels. To determine the rational use of biofuels in vehicles, it is necessary to assess the environmental effect that will be achieved when using them. **Methods:** the existing methods of estimating exhaust gas emissions from motor vehicles are considered. Based on them, improvements have been made, which include the introduction of additional coefficients that take into account changes in the environmental load depending on the percentage of biofuels mixed with traditional hydrocarbon fuels. **Results:** the calculation of the environmental effect from the use of biofuels was carried out using the example of adding biodiesel to petroleum diesel fuel, for which, based on statistical data from the US Environmental Protection Agency and data, WE established dependences of changes in annual emissions of harmful substances and carbon dioxide for a heavy-duty cargo vehicle. In addition to the calculation, the article presents graphs of emissions of harmful substances, taking into account their relative aggressiveness and the amount of carbon dioxide released during the combustion of biodiesel mixtures. **Practical significance:** The proposed method for calculating the environmental effect makes it possible to estimate the volume of emissions of harmful substances and carbon dioxide depending on the concentration of biofuels mixed with traditional fuels. Such an approach can provide an overall picture of the effect of using biodiesel, and at the same time, the coefficients used need to be clarified.

Keywords: biofuels, biodiesel, mixed fuels, ecology, the use of alternative fuels, calculation methods

References

1. Vinarov A. Yu., Dirina E. N. Biodizel' iz rastitel'nogo syr'ya. Povyshenie konkurentosposobnosti za schet pererabotki othodov proizvodstva // Transport na al'ternativnom toplive. 2009. № 4 (10). (In Russian)
2. Zhidkoe biotoplivo iz rastitel'nogo i zhitovno-go syr'ya. Tekhnicheskie i ekonomicheskie aspekty / D. G. Gorohov [i dr.] // Vestnik MGUL — Lesnoj vestnik. 2010. № 4. (In Russian)
3. Kuchkina A. Yu., Sushchik N. N. Istochniki syr'ya, metody i perspektivy polucheniya biodizel'no-go topliva // Zhurnal SFU. Biologiya. 2014. № 1. (In Russian)
4. Cherkaev G. V., Chihonadskih E. A. Analiz kriteriev polucheniya biotopliva iz vodoroslej // Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2021. № S1. (In Russian)
5. Halil' I. A., Shevchenko D. V. Bioenergetika avtotransporta // Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernye issledovaniya. 2011. № 4.
6. U. S. Environmental Protection Agency (2002). A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions (EPA 420-P-02-001). Washington,

DC: Assessment and Standard Division, Office of Transportation and Air Quality, USEPA.

7. Issledovanie celesoobraznosti ispol'zovaniya biodizel'nyh topliv v kachestve smesevogo komponenta tovarnyh dizel'nyh topliv / N.E. Belozerceva [i dr.] // Izvestiya vuzov. Prikladnaya himiya i biotekhnologiya. 2022. № 1 (40). (In Russian)

8. Vybor naibolee predpochitel'nogo syr'ya dlya sinteza biodizel'nogo topliva s pozicii ego vyhoda i fiziko-himicheskikh svojstv / N.E. Belozerceva [i dr.] // Izvestiya vuzov. Prikladnaya himiya i biotekhnologiya. 2020. № 1 (32). (In Russian)

9. Primenenie biodizel'nogo topliva v usloviyah holodnogo klimata / A.L. Penkin [i dr.] // Gruzovik. 2024. № 1. (In Russian)

10. Kozlov A. V., Terenchenko A. S. Ocenka effektivnosti primeneniya biodizel'nogo motornogo topliva v polnom zhiznennom cikle // Transport na al'ternativnom toplive. 2008. № 2 (2). (In Russian)

Received: 14.06.2024

Accepted: 05.08.2024

Author's information:

Aleksei L. PENKIN — PhD in Engineering, Associate Professor; apenkin1@gmail.com

Vadim S. SMIRNOV — Master's student; v.s.smirnof@yandex.ru

Aleksandr A. VOROB'EV — D. Sci. in Engineering, Associate Professor; nttk@pgups.ru

УДК 621.331

Диагностика тесноты междисциплинарных связей по семестровым экзаменационным оценкам студентов в период смешанных форм обучения в вузе

П. В. Герасименко

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

Для цитирования: Герасименко П. В. Диагностика тесноты междисциплинарных связей по семестровым экзаменационным оценкам студентов в период смешанных форм обучения в вузе // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 561–568. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-561-568

Аннотация

Проведен анализ тесноты междисциплинарных связей, построенной с помощью экзаменационных оценок, полученных студентами по предшествующим и последующим дисциплинам, согласно их последовательности в учебном плане. Рассмотрены влияние знаний математических дисциплин на знание общеинженерных дисциплин и связь знаний между дисциплинами специального блока, полученных как при очной, так и при дистанционной формах обучения. Теснота междисциплинарных связей устанавливалась на основании результатов экзаменационных экзаменов бакалавров направления «Информатика и вычислительная техника», проводимых как до возникновения, так и в период развития пандемии.

Ключевые слова: ЕГЭ по математике, математические и инженерные дисциплины, коэффициент корреляции, экзаменационные оценки, теснота связи

Введение

Сегодня в стране открылись широкие возможности для запуска новых проектов наращивания производственных мощностей. Это подтверждают достижения российских предприятий, отрасли которых за последние пять лет достигли следующего роста: валового регионального продукта — 13%, промышленного производства — 21,3%, сельского хозяйства — 21,8%, строительства — 38,8%. Тормозом для дальнейшего роста становится нехватка высококвалифицированных кадров. Особенно ярким кадровый дефицит стал на фоне экономической активности [1] в стране. На основании проведенного в мае 2023 года Институтом народнохозяйственного прогнозирования Рос-

сийской академии наук опроса предприятий отмечена максимальная с 2013 года нехватка квалифицированных трудовых ресурсов [2].

Основная причина, которая прежде всего вызвала обострение проблемы квалифицированного персонала, связана с недостаточным уровнем подготовки выпускников вузов. Они должны быть вооружены освоенными в области их будущей практической деятельности базовыми научными теориями и современными информационно-компьютерными технологиями.

Постановка задачи

Качественное исполнение выпускниками своих будущих профессиональных обязанностей

закладывается в техническом вузе фундаментальной подготовкой, которая формирует у них твердые знания и способность быстро осваивать их регулярные изменения. Эти требования обеспечиваются в том числе строгим соблюдением последовательности изучения взаимосвязанных дисциплин. Для этого материал учебных дисциплин последующих семестров должен опираться на знание студентами материала дисциплин предыдущих семестров, а студенты первого курса прежде всего должны опираться на школьные математику и физику.

Следует отметить, что в последние годы образовательный процесс в вузах РФ существенно усложнился из-за возникшей пандемии, в дополнение к произошедшим сложным социальным процессам и введению ЕГЭ. Поэтому возникла необходимость в обязательном порядке дистанционно осваивать и проводить образовательный процесс как в школе, так и в вузе. На сегодняшний день все образовательные учреждения приобрели определенный опыт проведения очных, дистанционных и смешанных форм занятий в различных последовательностях. Опыт проведения этих учебных занятий, после которых знания студентов были оценены в баллах, является важным элементом образовательного процесса. После его дальнейшего внедрения в различных формах в практику обучения он позволит студентам достигнуть высоких индивидуальных показателей в учебном процессе и избежать негативных результатов.

Как известно, экзаменационная оценка обучаемого, являясь мерой знаний, с математической точки зрения рассматривается как случайная величина, что обусловлено учетом влияния на нее множества факторов. Из них следует выделить требования преподавателя, отношение студента к учебному процессу,

организацию самого процесса, оценивание знаний и др. Поэтому величину оценки отдельного студента по конкретной дисциплине рассматривают как дискретное значение случайной величины, представляющей знания, усвоенные студентом по дисциплине. В свою очередь, среднюю оценку коллектива студентов — как дискретную случайную величину, определяемую суммой соответствующего числа одинаково распределенных случайных величин.

Процесс накопления знаний, оцениваемых в баллах, происходит за счет достаточно сложного процесса формирования у обучаемого новых знаний на основе имеющихся. Моделирование процесса формирования новых знаний по приобретенным обычно рассматривается как функционирование устройства типа «черный ящик», где содержатся определенные базовые знания, а на вход в него поступает новая учебная информация. В таком устройстве путем сложных взаимосвязанных процессов формируются новые знания [1].

Другими словами, внутри «черного ящика» под воздействием новых знаний происходит дополнение и функциональное преобразование предыдущих знаний обучаемых, увеличивая объем и повышая степень их сложности, а также взаимную связь между ними. Такая упрощенная модель позволяет за индикаторы знаний (контрольные показатели знаний) на выходе освоения учебных дисциплин принять оценки семестровых экзаменов. За второй индикатор, определяющий взаимную связь между дисциплинами, целесообразно принять коэффициенты корреляции между ними. Они вычисляются между векторами семестровых оценок учебных групп студентов или их объединений по этим дисциплинам.

Поскольку базовые знания оказывают существенное влияние на формирование новых

знаний, то математическая связь между знаниями дисциплин показывает глубину научного содержания специальности, которую студент получает в вузе [2].

Таким образом, коэффициенты корреляции межпредметных (междисциплинарных) связей оцениваются по достигнутым уровням оценок студентов и выступают индикаторами (показателями) учебного процесса в вузе, а именно показателями его содержания, структуры, методов, средств и форм обучения. Другими словами, показатели межпредметных связей служат интегрирующими характеристиками учебного процесса вуза, его научности, систематичности, целостности, преемственности.

К сожалению, в образовательном процессе нового века требования к уровню базовых знаний для профессиональных инженерных дисциплин продолжают снижаться. Определяется это снижение, прежде всего, низким уровнем знания абитуриентами элементарной школьной математики, что влечет за собой в дальнейшем низкий уровень знаний по высшей математике. Начало этой тенденции сформировалось при переходе в технических вузах на подготовку бакалавров и внедрении ЕГЭ [3].

Существование данного недостатка подтверждают многие публикации, в том числе работа [4], где проведен сравнительный анализ принятых в разные годы учебных программ по математике и оценено отношение вузов к математической подготовке по объему выделяемого учебного времени и применяемых методик обучения.

Цель настоящей работы — установить на примере анализа соотношений корреляционных связей, во-первых, влияние математических дисциплин на инженерные, во-вторых, влияние ранее изученного на последующее изучение специальных дисциплин, которые

рассмотрены в двух отдельно сформированных согласно учебному плану блоках. При этом рассматривалось изучение бакалаврами одного блока специальных дисциплин в смешанной (дистанционной и частично очной) форме в условиях распространения пандемии COVID-19 и второго блока специальных дисциплин, изучение которых проходило в завершающем периоде обучения в условиях традиционной очной формы учебного процесса. При анализе использовались статистические данные образовательного процесса студентов направления «Информатика и вычислительная математика (ИВТ)» ПсковГУ [5].

Исследование междисциплинарных связей по экзаменационным оценкам студентов направления ИВТ

Учитывая, что учебные дисциплины в вузах формируются на основании накопленных научных теорий, для чего над ними проводится дифференциация в высокой степени, то их можно объединять в блоки учебных дисциплин. Это позволяет рассматривать междисциплинарные связи как между блоками дисциплин, так и внутри них [4].

В настоящей работе исследовано влияние математических дисциплин на знания общеинженерных дисциплин путем оценивания тесноты их междисциплинарных связей.

Исходя из утверждения, что базовые знания оказывают существенное влияние на формирование новых знаний, в качестве показателей связи между этими знаниями могут выступать коэффициенты корреляции между оценками двух дисциплин одной группы студентов [5].

В настоящей работе для оценивания состояния тесноты связей между математическими и общеинженерными дисциплинами использованы результаты исследований [5], где приведена корреляционная матрица,

элементами которой являются коэффициенты корреляции между этими дисциплинами. Коэффициенты корреляции, характеризующие межпредметную связь между специальными дисциплинами, которые были изучены бакалаврами направления ИВТ в 5-м и 6-м семестрах (в 2020–2021 годах) в период развития пандемии COVID-19, представлены в табл. 1.

Результаты, представленные в табл. 1, составляют первый блок специальных дисциплин, которые изучались в 5-м и 6-м семестрах в период обучения студентов по смешанной форме (в основном дистанционно и частично при выполнении лабораторных и практических работ в очной форме). Следует заметить,

что студенты к 5-му и 6-му семестрам уже освоили в очной форме ряд учебных дисциплин, связанных с информационными технологиями, которые позволяли им успешно дистанционно осваивать материал специальных дисциплин. Сам процесс обучения специальным дисциплинам проходил с применением современных средств, базирующихся на цифровых технологиях. В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции второго блока специальных дисциплин.

Их изучение проходило после пандемии COVID-19 с теми же бакалаврами направления ИВТ на выпускном курсе в 2021/22 учебном году [3].

ТАБЛИЦА 1. Коэффициенты корреляции специальных дисциплин 5-го и 6-го семестров

N	Дисциплины	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Программная инженерия	1,0									
2	Технология программирования	0,84	1,0								
3	Объектно-ориентированное программирование	0,79	0,73	1,0							
4	Схемотехника ЭВМ	0,53	0,43	0,54	1,0						
5	Операционные системы	0,69	0,62	0,74	0,63	1,0					
6	Программирование в графических средах	0,63	0,56	0,79	0,53	0,57	1,0				
7	Основы сетевых технологий	0,65	0,58	0,68	0,57	0,55	0,65	1,0			
8	Управление данными	0,63	0,50	0,62	0,61	0,52	0,69	0,82	1,0		
9	Системное ПО	0,60	0,54	0,65	0,69	0,66	0,78	0,66	0,76	1,0	
10	Надежность вычислительных систем	0,72	0,66	0,69	0,54	0,58	0,67	0,78	0,78	0,74	1,0

ТАБЛИЦА 2. Коэффициенты корреляции специальных дисциплин 7-го и 8-го семестров

N	Дисциплины	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Веб-программирование (1)	1,0							
2	Защита информации	0,75	1,0						
3	Администрирование сетей	0,53	0,59	1,0					
4	Веб-программирование (2)	0,59	0,58	0,52	1,0				
5	Конструкторско-технологическое обеспечение ЭВМ	0,78	0,70	0,56	0,56	1,0			
6	Организация ЭВМ и систем	0,41	0,51	0,44	0,35	0,52	1,0		
7	Государственный экзамен по специальности	0,69	0,58	0,21	0,44	0,52	0,24	1,0	
8	Защита ВКР	0,68	0,57	0,52	0,82	0,59	0,81	0,51	1,0

Анализ результатов выполненных исследований

Для определения значимости уровней тесноты междисциплинарных связей, оцениваемых по величинам корреляционных коэффициентов между итоговыми экзаменационными оценками одной группы студентов по двум дисциплинам, в работе принята шкала Чеддока (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Характер связи линейных коэффициентов корреляции по шкале Чеддока

Интервал коэффициента корреляции	Характер связи
До $ \pm 0,3 $	По. — практически отсутствует
От $ \pm 0,3 $ до $ \pm 0,5 $	Сл. — слабая
От $ \pm 0,5 $ до $ \pm 0,7 $	У. — умеренная
От $ \pm 0,7 $ до $ \pm 1,0 $	С. — сильная

Таблица устанавливает зависимость характера связи от интервалов коэффициентов корреляции. По данным корреляционной матрицы работы [1] с помощью шкалы Чеддока построена матрица, отражающая характер связи между математическими и общеинженерными дисциплинами (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Корреляционная матрица характера связи между математическими и общеинженерными дисциплинами

Дисциплины	Математическая логика	Алгебра и геометрия	Математический анализ	Теория вероятностей	Дискретная математика	Вычислительная математика	Средний коэффициент
Физика	У.	У.	Сл.	У.	У.	У.	У.
Программирование	Сл.	У.	Сл.	У.	Сл.	У.	Сл.
Информатика	Сл.	По.	По.	С.	Сл.	У.	Сл.
Теория алгоритмов	У.	У.	По.	С.	У.	У.	У.
Теория кодирования	Сл.	Сл.	По.	Сл.	У.	У.	Сл.
Электроника	Сл.	У.	По.	Сл.	Сл.	Сл.	Сл.
Моделирование	У.	Сл.	Сл.	У.	У.	У.	У.
Основы теории управления	Сл.	По.	По.	У.	По.	Сл.	Сл.
Инженерная и компьютерная графика	У.	У.	Сл.	У.	У.	У.	У.

На основании приведенных в табл. 4 уровней тесноты междисциплинарных связей выполнено их обобщение, и в табл. 5 представлены количества таких связей между математическими и инженерными дисциплинами.

Из анализа приведенных уровней характера связей математических и инженерных дисциплин следует, что связи между математическим анализом и инженерными дисциплинами практически отсутствуют (64%) и слабые (36%). Остальные математические дисциплины имеют слабую либо умеренную тесноту связи с инженерными.

С использованием табл. 3 выполнено перестроение табл. 1 и табл. 2, в результате чего, соответственно, в табл. 6 и табл. 7 представлены качественные оценки междисциплинарных связей между специальными дисциплинами, которые позволили выполнить анализ качества проведенного учебного процесса в разные периоды и в разных условиях.

Согласно данным табл. 6, анализ уровней связи между специальными дисциплинами, которые изучались в период развития

ТАБЛИЦА 5. Количества характерных уровней связи между математическими и инженерными дисциплинами, выраженные в процентах

Качественные уровни тесноты связи между математическими и инженерными дисциплинами	Математические дисциплины						
	Математическая логика	Алгебра и геометрия	Математический анализ	Теория вероятностей	Дискретная математика	Вычислительная математика	Средний коэффициент корреляции
Практически отсутствует	0	9	64	0	9	9	0
Слабая	45,5	35,5	36	18	45,5	18	64
Умеренная	45,5	45,5	0	64	45,5	73	36
Сильная	9	0	0	18	0	0	0

ТАБЛИЦА 6. Характер связи между специальными дисциплинами 5-го и 6-го семестров

N	Дисциплины	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Программная инженерия	1,0									
2	Технология программирования	С.	1,0								
3	Объектно-ориентированное программирование	С.	С.	1,0							
4	Схемотехника ЭВМ	У.	Сл.	У.	1,0						
5	Операционные системы	У.	У.	С.	У.	1,0					
6	Программирование в графических средах	У.	У.	У.	У.	У.	1,0				
7	Основы сетевых технологий	У.	У.	У.	У.	У.	У.	1,0			
8	Управление данными	У.	У.	У.	У.	У.	У.	С.	1,0		
9	Системное ПО	У.	У.	У.	У.	У.	У.	У.	С.	1,0	
10	Надежность вычислительных систем	С.	У.	У.	У.	У.	У.	У.	С.	С.	1,0

ТАБЛИЦА 7. Характер связи между специальными дисциплинами 7-го и 8-го семестров

N	Дисциплины	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Веб-программирование (1)	1,0							
2	Защита информации	С.	1,0						
3	Администрирование сетей	У.	У.	1,0					
4	Веб-программирование (2)	У.	У.	У.	1,0				
5	Конструкторско-технологическое обеспечение ЭВМ	С.	С.	У.	У.	1,0			
6	Организация ЭВМ и систем	Сл.	У.	Сл.	С.	У.	1,0		
7	Государственный экзамен по специальности	У.	У.	У.	У.	Сл.	у	1,0	
8	Защита ВКР	У.	У.	У.	У.	С.	У.	У.	1,0

пандемии COVID-19, установил следующие интегральные характеристики количества пар дисциплин: слабая — 2, умеренная — 78, сильная — 20. Числовые величины представлены в процентах от общего числа межпредметных связей.

В табл. 7 представлены качественные оценки междисциплинарных связей между специальными дисциплинами, изучение которых проходило по завершении пандемии в 7-м и 8-м семестрах, что позволило проводить занятия очно.

Интегральные характеристики количества пар дисциплин в процентах в этот период, установленные на основании табл. 8, следующие: слабая — 12, умеренная — 68, сильная — 20.

Выводы

Таким образом, анализ диагностики междисциплинарных связей между математическими и инженерными дисциплинами подтвердил слабый уровень подготовленности школьников для обучения их инженерным специальностям с достаточно высоким качеством. Надежда на то, что в настоящее время выпускники большинства инженерных вузов будут вооружены достигнутыми в области их будущей практической деятельности базовыми научными теориями и современными информационно-компьютерными технологиями, весьма слабая.

Из анализа тесноты связей между специальными дисциплинами двух блоков, которые изучены в разные периоды (табл. 7 и табл. 8), следует, что теснота связи между специальными дисциплинами практически одного уровня. Результаты проведенного «вынужденного эксперимента» по изучению нового материала в вузе дистанционно с помощью цифровой техники и очно под руководством преподавателей в аудиториях вуза показывают, что эти формы обеспечивают равный успех учебного процесса, если студенты получили на первых курсах знания и умения применять компьютерную технику и информационные технологии [5].

Результаты проведенного исследования в целом свидетельствуют, что изучение уровней тесноты междисциплинарных связей в вузах является одной из задач профессиональной деятельности преподавателей. Поэтому систему междисциплинарных связей необходимо постоянно применять для

внесения изменений в учебный план и программы. Она должна быть направлена на активизацию совершенствования учебных планов и программ.

Библиографический список

1. Мануйлова А., Фролова П., Снеткова Д. Дефицит кадров повысил разборчивость // Коммерсантъ. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6085018> (дата обращения: 07.07.2023).
2. Кадровый дефицит // Всероссийская транспортная еженедельная информационно-аналитическая газета. 2023. № 28 (1303).
3. Герасименко П. В., Благовещенская Е. А., Ходаковский В. А. Математическое моделирование процесса изучения учебных многосеместровых дисциплин в технических вузах // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. 2017. Т. 14, вып. 3. С. 513–522.
4. Герасименко П. В. Путь реформирования математического образования в технических вузах РФ: от фрагментарного до фундаментального и наоборот // Актуальные проблемы преподавания математики в техническом вузе. 2020. № 8. С. 80–87.
5. Сравнительный анализ степени влияния математической подготовки на уровень знаний инженерных дисциплин при обучении студентов направления ИВТ до и во время развития пандемии COVID-19 / П. В. Герасименко [и др.] // Информатизация образования и методика электронного обучения: цифровые технологии в образовании: материалы VI Международной научной конференции (Красноярск, 20–23 сентября 2022 г.). 2022. Ч. 2. 448 с.

Дата поступления: 16.06.2024

Решение о публикации: 29.07.2024

Контактная информация:

ГЕРАСИМЕНКО Петр Васильевич — докт. техн. наук, профессор; pv39@mail.ru

Diagnostics of the closeness of interdisciplinary connections based on semester examination assessments of students

P. V. Gerasimenko

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

For citation: *Gerasimenko P. V.* Diagnostics of the closeness of interdisciplinary connections based on semester examination assessments of students // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 561–568. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-561-568

Abstract

The analysis of the closeness of interdisciplinary connections, built with the help of exam grades received by students in previous and subsequent disciplines, according to the sequence of their study according to the curriculum. The influence of the knowledge of mathematical disciplines on the knowledge of general engineering disciplines and the dependence of knowledge between the disciplines of a special block, achieved both in full-time and distance learning, is considered. The closeness of interdisciplinary ties was established on the basis of the results of the bachelor's examinations in the field of Computer Science and Computer Engineering, conducted both before the outbreak and during the development of the pandemic.

Keywords: Unified State Examination in mathematics, mathematical and engineering disciplines, correlation coefficient, exam scores, closeness of connection

References

1. Manujlova A., Frolova P., Snetkova D. Deficit kadrov povysil razborchivost' // Kommersant. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6085018> (data obrashheniya: 07.07.2023). (In Russian).
2. Kadrovyy deficit // Vserossiyskaya transportnaya ezhenedel'naya informacionno-analiticheskaya gazeta. 2023. № 28 (1303). (In Russian).
3. Gerasimenko P. V., Blagoveshenskaya E. A., Xodakovskij V. A. Matematicheskoe modelirovanie processa izucheniya uchebnyh mnogosemestrovyyh disciplin v tekhnicheskikh vuzah // Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya. 2017. T. 14, vy'p. 3. S. 513–522. (In Russian).
4. Gerasimenko P. V. Put' reformirovaniya matematicheskogo obrazovaniya v tekhnicheskikh vuzah RF: ot fragmentarnogo do fundamental'nogo i naoborot // Aktual'nye problemy prepodavaniya matematiki v tekhnicheskome vuze. 2020. № 8. S. 80–87. (In Russian).
5. Sravnitel'nyj analiz stepeni vliyaniya matematicheskoy podgotovki na uroven' znaniy inzhenernyh disciplin pri obuchenii studentov napravleniya IVT do i vo vremya razvitiya pandemii COVID-19 / P. V. Gerasimenko [i dr.] // Informatizaciya obrazovaniya i metodika elektronnoho obucheniya: cifrovye tehnologii v obrazovanii: materialy VI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (Krasnoyarsk, 20–23 sentyabrya 2022 g.). 2022. Ch. 2. 448 s. (In Russian).

Received: 16.06.2024

Accepted: 29.07.2024

Author's information:

Petr V. GERASIMENKO — PhD in Engineering; pv39@mail.ru

УДК 628.161

Очистка торфяных грунтовых вод методом ультрафильтрации и ионного обмена

А. М. Колбиков¹, О. К. Суворова², А. А. Федосеенко²

¹ Индивидуальный предприниматель

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

Для цитирования: Колбиков А. М., Суворова О. К., Федосеенко А. А. Очистка торфяных грунтовых вод методом ультрафильтрации и ионного обмена // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 569–574. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-569-574

Аннотация

Цель: оценка эффективности очистки торфяных грунтовых вод сочетанием двух методов ультрафильтрации и ионного обмена. Выявление специфических характеристик исходного состава торфяных или грунтовых вод, определение предполагаемых возможных методов очистки данных вод для обеспечения соблюдения требований СанПиН 2.1.3684–21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению населения, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий» к качеству питьевой воды. Определение перечня показателей состава, по которым требуется очистка. Оценка методов очистки сточных вод, используемых для очистки торфяных грунтовых вод. Проведение исследования состава очищенной грунтовой воды до и после очистки, определение эффективности используемых методов очистки по различным показателям. Определение концентраций компонентов состава грунтовой воды с использованием утвержденных методик в соответствии с ГОСТ Р 5716-2010 п.5; ГОСТ Р 57164-2010 п.6; ПНД Ф 14.1.2:4.207-04; ПНД Ф 14.1.2:3:4.121-97; ПНД Ф 14.1.2:4.114-97; ГОСТ 31594-2012 Метод А; ПНД Ф 14.1.2:4.50-96; ПНД Ф 14.1.2:3:4.111-97; ПНД Ф 14.1.2:3:4.111-97; ПНД Ф 14.1.2:3.154-99; ПНД Ф 14.1.2:3:4.123-97; ГОСТ 31859-2012; ПНД Ф 14.1.2:3:4.4-95; ГОСТ 31940-2012 п.6; ПНД Ф 14.1.2:4.178-02; ПНД Ф 14.1.2:4.214-06. Анализ полученных данных о составе торфяных грунтовых вод до и после очистки, определение эффективности методов ультрафильтрации и ионного обмена. Оценка результатов выполненных исследований эффективности очистки торфяных грунтовых вод с использованием методов ультрафильтрации и ионного обмена для оценки на соответствие качества очищенных грунтовых вод требованиям, установленным СанПиН 2.1.3684-21. **Практическая значимость:** полученные результаты выполненных исследований эффективности очистки торфяных грунтовых вод с использованием методов ультрафильтрации и ионного обмена свидетельствуют о возможности использования данных методов, так как они обеспечивают соответствие качества воды требованиям СанПиН 2.1.3684-21.

Ключевые слова: грунтовые воды, торфяные воды, метод ультрафильтрации и метод ионного обмена, эффективность очистки, концентрации компонентов состава грунтовой воды

В системе водоснабжения объектов инфраструктуры РЖД важную роль может играть использование для питьевого водоснабжения очищенных грунтовых вод, включая торфяные воды. Обеспечение соблюдения нормативных

гигиенических требований к качеству торфяных природных вод является сложной задачей, что определяется исходным составом данных вод, которые характеризуются повышенными значениями таких показателей, как ХПК, БПК,

цветность, мутность, взвешенные вещества, железо. Как правило, данные грунтовые воды имеют желтый или коричневый цвет.

Качественный и количественный состав природных грунтовых вод определяется как региональными особенностями, так и свойствами почвогрунтов, в которых они залегают. Болотные воды характеризуются высоким содержанием органических веществ гумусовой природы, низким содержанием растворенного кислорода, имеют низкую минерализацию.

Как правило, качество болотных вод не соответствует гигиеническим требованиям, предъявляемым к составу питьевой воды. Это связано с высоким содержанием гуминовых кислот, взвешенных веществ, а также высоким содержанием железа, марганца и других элементов.

По результатам исследований в болотных водах выявлено повышенное содержание ионов железа, показателя бихроматной окисляемости, взвешенных веществ, в том числе гуминовых кислот, фульвиоокислот [1]. Кроме того, торфяные грунтовые воды зачастую характеризуются такими органолептическими показателями, как желтый цвет и выраженный неприятный запах. Содержание вышеназванных ингредиентов в грунтовой воде требует применения различных технологических процессов и, соответственно, систем для обеспечения нормативных требований к качеству грунтовой воды для использования в хозяйственно-питьевом водоснабжении. Использование ступенчатой системы очистки воды с использованием различных установок и фильтров делает очистку достаточно сложным процессом и приводит к значительному ее удорожанию.

Для удаления взвешенных веществ и гуминовых кислот применяется система фильтрации, для окисления железа — система аэрации, угольные фильтры используются для удаления запаха и т. д. [2, 3].

Иногда для очистки торфяной воды используют систему напорной коагуляции с применением осадочных колонн с управляющим клапаном, колонн с ионообменными смолами [4].

Большинство используемых методов очистки торфяных вод являются либо неэффективными, либо очень дорогими и требующими дополнительного применения реагентов.

В настоящей работе проведены исследования эффективности очистки грунтовых вод на торфянике методом, включающим последовательные процессы: ультрафильтрацию и использование метода ионного обмена.

Применение предлагаемого комплекса очистки предусматривается для источников, в которых преобладают коллоидные органические соединения, железо, в зависимости от региона, а также соли жесткости.

Ультрафильтрационные погружные модули (УФПМ) можно устанавливать непосредственно в колодец либо в первичный накопитель.

Первый этап очистки осуществляется при прохождении через ультрафильтрационную (УФ) мембрану, произведенную в государственном научном учреждении «Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси». В качестве материала для УФПМ используются ультрафильтрационные полуволокнистые волокна ПАН-100 (длина пучка — 600 мм). Полые волокна представляют собой ультрафильтрационную мембрану. Они изготовлены из сополимера акрилонитрила и предназначены для тонкой очистки питьевой воды от коллоидных частиц, железа (III), удаления бактерий, вирусов и водорастворимых полимеров с молекулярной массой более 100 кДа в составе специального устройства (фильтрующего элемента). При сильном загрязнении мембран и падении производительности по воде необходимо произвести обработку мембраны регенерирующим

раствором. Производительность мембраны по дистиллированной воде при 0,1 Мпа и 25 °С составляет не менее 230–450 л/м²/ч.

Использование УФПМ позволяет удалять из воды взвешенные вещества, окисленные формы железа, крупные коллоидные частицы, а также вирусы и бактерии. Самовсасывающий насос создает необходимый перепад давления для работы мембранных фильтров.

После очистки на УФПМ вода поступает на следующую стадию очистки с использованием метода ионного обмена (ионообменный фильтр «Гейзер»). Очистка воды на ионообменных фильтрах позволяет удалить из грунтовой воды такие вещества, как ионы тяжелых металлов, растворенные органические соединения, соли жесткости, гуминовые кислоты.

Далее предлагаемая схема очистки воды предусматривает ее очистку с использованием угольного фильтра, что позволяет обеспечить нормативные значения таких показателей, как вкус и запах.

Электромагнитный клапан обеспечивает подачу воды из накопителя при автоматической промывке ионообменной системы. Ионообменные свойства смол восстанавливаются за счет промывки раствором хлорида натрия.

В ходе настоящей работы были проведены исследования для определения концентраций основных показателей качества воды до и после ее очистки в лаборатории «АСТ-Аналитика» (аттестат аккредитации RA.RU.21AK10).

На рис. 1 представлена схема установки для очистки грунтовых вод, используемая в данной работе.

В табл. 1 представлены результаты исследований состава грунтовых вод до и после их очистки методом ультрафильтрации и ионного обмена.

В ходе проведенных исследований выявлены превышения предельно допустимых концентраций таких показателей, как вкус, привкус, цветность, железо, перманганатная окисляемость, БПК₅.

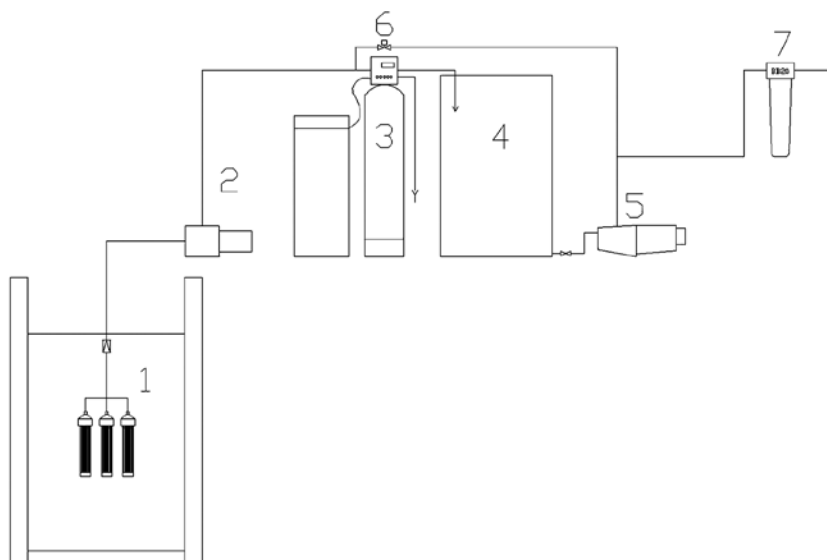


Рис. 1. Схема установки водоочистки: 1 — ультрафильтрационные погружные модули (УФПМ); 2 — самовсасывающий насос; 3 — ионообменная система; 4 — накопительная емкость; 5 — насосная станция; 6 — электромагнитный клапан; 7 — угольный фильтр

ТАБЛИЦА 1. Концентрации загрязняющих веществ в торфяной грунтовой воде методом ультрафильтрации с использованием ионообменных фильтров

№	Определяемый показатель	МВИ	Единицы измерения	До очистки	После очистки	ПДК
1	Запах при 20 °С	ГОСТ Р 57164-2010 п.5	балл, характер	1	1	2
2	Запах при 60 °С	ГОСТ Р 57164-2010 п.5	балл, характер	1	1	2
3	Вкус, привкус	ГОСТ Р 57164-2010 п.5	балл, характер	7	7	2
4	Мутность	ГОСТ Р 57164-2010 п.6	ЕМФ	1,856	<10,0	2,6
5	Цветность	ПНД Ф 14.1.2:4.207-04	градус	103,034	14,624	20
6	рН	ПНД Ф 14.1.2:3:4.121-97	ед. рН	7,68	7,13	6,0–9,0
7	Сухой остаток	ПНД Ф 14.1.2:4.114-97	мг/дм ³	92,59	564,81	1000
8	Жесткость общая	ГОСТ 31594-2012 Метод А	град Ж	2,653	0,020	7,0
9	Железо общее	ПНД Ф 14.1.2:4.50-96	мг/дм ³	0,8603	—	0,3
10	Хлориды	ПНД Ф 14.1.2:3:4.111-97	мг/дм ³	3,9	74,6	350
11	Перманганатная окисляемость	ПНД Ф 14.1.2:3:4.111-97	мг О ₂ / дм ³	6,17	0,7	5
12	Нефтепродукты	ПНД Ф 14.1.2:3.154-99	мг/дм ³	<0,04	—	0,1
13	БПК ₅	ПНД Ф 14.1.2:3:4.123-97	мг О ₂ / дм ³	6,17	0,7	3
14	ХПК	ГОСТ 31859-2012	мг/дм ³	9,5	< 5	15
15	Нитраты	ПНД Ф 14.1.2:3:4.4-95	мг/дм ³	2,4	—	45
16	Сульфат-ион	ГОСТ 31940-2012 п.6	мг/дм ³	15,9	—	500
17	Сероводород	ПНД Ф 14.1.2:4.178-02	мг/дм ³	—	—	0,003
18	Цинк	ПНД Ф 14.1.2:4.214-06	мг/дм ³	0,0219	0,0115	5,0

По результатам проведенных исследований качества воды до и после очистки установлена высокая эффективность предлагаемой системы очистки по следующим показателям: цветность (86%); жесткость общая (99%); железо общее (100%); перманганатная окисляемость (89%); БПК₅ (89%); ХПК (89%).

Увеличение после очистки концентрации хлоридов и сухого остатка связано с использованием таблетированной соли для регенерации ионита.

Установлено, что очищенная вода по составу соответствует санитарно-эпидемиологическим требованиям к качеству воды питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, установленным СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологиче-

ские требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению населения, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий» [5].

Библиографический список

1. Химический состав вод торфяно-болотных экосистем горного Алтая / М.В. Шурова и [др.] // Вестник ТГПУ. 2009. Вып. 3 (81).
2. Молодкина Л.М. Методы очистки питьевых, природных и сточных вод: учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 275 с.

3. Софинская О.С. Водозаборные сооружения: учебно-методический комплекс для студентов специальности 1–70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов». Новополюцк: ПГУ, 2014. 264 с.

4. Свиридова Е.В. Возможности применения новых эффективных технологий очистки маломутных цветных вод до питьевого качества на примере города Котласа // Наука сегодня. Глобальные вызовы и механизмы развития: материалы Международной научно-практической конференции (Вологда, 24 апреля 2019 г.). Вологда: Маркер, 2019. С. 6–7.

5. СанПиН 2.1.3684-21. «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению

населения, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий».

Дата поступления: 29.07.2024

Решение о публикации: 29.08.2024

Контактная информация:

СУВорова Ольга Константиновна — канд. ф.-м. наук, доцент; suolko@gmail.com

КОЛБИКОВ Александр Михайлович — индивидуальный предприниматель; kolbikov@yandex.ru

ФЕДОСЕЕНКО Анастасия Алексеевна — доцент; aa.fedoseenko@mail.ru

Purification of peat groundwater by ultrafiltration and membrane purification

A. M. Kolbikov¹, O. K. Suvorova², A. A. Fedoseenko²

¹ Individual entrepreneur

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

For citation: Kolbikov A. M., Suvorova O. K., Fedoseenko A. A. Purification of peat groundwater by ultrafiltration and membrane purification // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 569–574. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-569-574

Abstract

Purpose: assessing the effectiveness of peat groundwater purification using a combination of two methods of ultrafiltration and membrane purification. Identify specific characteristics of the composition of peat or groundwater, determine possible possible methods of treating these waters to ensure compliance with the requirements of 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 to the population, atmospheric air, soil, residential premises, operation of industrial and public premises, organization and implementation of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures” to the quality of drinking water. Determine the list of composition indicators that require cleaning. Conduct an assessment of wastewater treatment methods used to treat peat groundwater. Togo, Conduct research on the composition of purified groundwater before and after treatment, determine the effectiveness of the treatment methods used according to various indicators. Determination of the concentrations of groundwater composition components was carried out using approved methods in accordance with GOST R 57164-2010 clause 5; GOST R 57164-2010 clause 6; PND F 14.1.2:4.207-04; PND F 14.1.2:3:4.121-97; PND F 14.1.2:4.114-97;

GOST 31594-2012 Method A; PND F 14.1.2:4.50-96; PND F 14.1.2:3:4.111-97; PND F 14.1.2:3:4.111-97; PND F 14.1.2:3:154-99; PND F 14.1.2:3:4.123-97; GOST 31859-2012; PND F 14.1.2:3:4.4-95; GOST 31940-2012 clause 6; PND F 14.1.2:4.178-02; PND F 14.1.2:4.214-06. An analysis of the results of laboratory studies of the composition of peat groundwater before and after treatment was carried out, and the effectiveness of ultrafiltration and membrane water purification methods was determined. The results of studies of the effectiveness of purification of peat groundwater using ultrafiltration and membrane purification methods show that purified groundwater meets the sanitary and epidemiological requirements for the quality of drinking and domestic water supply established by SanPiN 2.1.3684-21. **Practical significance:** the results obtained from studies of the effectiveness of peat groundwater treatment using ultrafiltration and membrane treatment methods indicate the possibility of using these methods, because they ensure that water quality meets the requirements of SanPiN 2.1.3684-21.

Keywords: ultrafiltration method and membrane groundwater purification method, efficiency of groundwater treatment, concentrations of groundwater composition components

References

1. Ximicheskij sostav vod torfyano-bolotny`x e`o-sistem gornogo Altaya / M. V. Shurova i [dr.] // Vestnik TGPU. 2009. Vy`p. 3 (81). (In Russian)
2. Molodkina L. M. Metody` ochistki pit`evy`x, prirodny`x i stochny`x vod: uchebnoe posobie. SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2010. 275 s. (In Russian)
3. Sofinskaya O. S. Vodozaborny`e sooruzheniya: uchebno-metodicheskij kompleks dlya studentov special`nosti 1–70 04 03 “Vodosnabzhenie, vodootvedenie i ohrana vodny`x resursov”. Novopoloczk: PGU, 2014. 264 s. (In Russian)
4. Sviridova E. V. Vozmozhnosti primeneniya novy`x e`ffektivny`x tehnologij ochistki malomutny`x czvetny`x vod do pit`evogo kachestva na primere goroda Kotlasa // Nauka segodnya. Global`ny`e vy`zovy` i mexanizmy` razvitiya: materialy` Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii (Vologda, 24 aprelya 2019 g.). Vologda: Marker, 2019. S. 6–7. (In Russian)

5. SanPiN 2.1.3684-21. “Sanitarno-e`pidemiologicheskie trebovaniya k sodержaniyu territorij gorodskix i sel`skix poselenij, k vodny`m ob`ektam, pit`evoj vode i pit`evomu vodosnabzheniyu naseleniya, atmosfernomu vozduxu, pochvam, zhily`m pomeshheniyam, e`kspluatacii proizvodstvenny`x, obshhestvenny`x pomeshhenij, organizacii i provedeniyu sanitarno-protivoe`pidemicheskix (profilakticheskix) meropriyatij”. (In Russian)

Received: 29.07.2024

Accepted: 29.08.2024

Author’s information:

Olga K. SUVOROVA — PhD, Associate Professor; suolko@gmail.com

Alexander M. KOLBIKOV — Individual Entrepreneur; kolbikov@yandex.ru

Anastasia A. FEDOSEENKO — Associate Professor; aa.fedoseenko@mail.ru



УДК 656.073.2

Организация работы терминала при хранении контейнеров на полуприцепах

Н. В. Малышев

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

Для цитирования: Малышев Н. В. Организация работы терминала при хранении контейнеров на полуприцепах // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 575–584. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-575-584

Аннотация

Цель: разработка метода определения конфигурации транспортно-складской системы контейнерного терминала, который поможет в процессе проектирования определить количество козловых кранов, терминальных тягачей, а также количество и расположение мест хранения. **Методы:** наблюдение и анализ технологии работы современных контейнерных терминалов. Применяется системный подход к их проектированию. **Результаты:** разработан метод определения конфигурации транспортно-складской системы контейнерного терминала, отличием которого является хранение контейнера на полуприцепе. **Практическая значимость:** разработанный метод позволит оценить производительность контейнерного терминала и капитальные затраты перед началом проектирования.

Ключевые слова: подъемно-транспортная машина, терминал, контейнерно-транспортная система, рациональное распределение ресурсов

Введение

Хорошо изучено, что основным методом хранения контейнеров на контейнерных терминалах является складирование штабелями [1–3]. Такая конфигурация выгодна при большом контейнеропотоке и ограниченном пространстве для хранения, как в случае с морскими портами, но осложняется операцией извлечения контейнера из штабеля [4, 5]. Одним из альтернативных методов является хранение контейнера на полуприцепе [6]. Такой метод требует меньших вложений в дорогостоящее подъемно-транспортное оборудование и отличается от наиболее распространенной схемы высокой скоростью

перемещения контейнера внутри терминала. Широкое распространение метод получил на мультимодальных терминалах при работе железнодорожным и автомобильным видами транспорта в Северной Америке [7, 8]. Условиями применения такого метода являются небольшой контейнеропоток и необходимость снизить простой под грузовыми операциями железнодорожных составов. В отечественном академическом сообществе теоретическим исследованиям этих терминалов уделяется мало внимания, поскольку распространения на территории Российской Федерации они не получили.

Перспективы применения на сети железных дорог Российской Федерации

В сети железных дорог России находится 153 контейнерных терминала, принадлежащих Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом ОАО «РЖД» [9] и оборудованных преимущественно козловыми кранами. Применение схемы с хранением контейнеров на прицепах может позволить:

- ускорить оборот контейнеров и взаимодействие с автомобильным транспортом без задействования погрузочно-разгрузочной техники;

- интегрировать автомобильные перевозки с железнодорожной логистикой, перемещая контейнеры между терминалами ОАО «РЖД» и партнеров;

- уменьшить эксплуатационные расходы на техническое обслуживание и ремонт погрузочно-разгрузочной техники на терминалах с контейнеропотоком менее 10 тыс. контейнеров в год;

- создать более удобные логистические схемы и повысить уровень сервиса, что особенно важно в условиях высокой конкурентной среды.

Расчет времени погрузочно-разгрузочных и транспортно-складских операций

Для расчета разработаны формулы определения времени цикла работы кранов и тягачей с целью планировки двора, которая минимизирует эксплуатационные и капитальные затраты.

Козловые краны работают путем перемещения контейнеров из вагона в тягач при прибытии состава и обратно при отправлении. На основании формулы ожидаемого времени цикла крана [10] предложены формулы цикла

при погрузке в транспортное средство и выгрузке контейнера из транспортного средства.

Время операции выгрузки, мин:

$$t_{\text{выгр}} = t_{\text{выгр}}^{\text{пуст}} + t_{\text{опуск}}^{\text{пуст}} + t_{\text{зах}} + t_{\text{под}}^{\text{эрузж}} + t_{\text{тел}}^{\text{эрузж}} + t_{\text{опуск}}^{\text{эрузж}} + t_{\text{отпуск}} + t_{\text{под}}^{\text{пуст}} = t_{\text{выгр}}^{\text{пуст}} + \frac{h_{\text{опуск}}^{\text{ваг}} + h_{\text{под}}^{\text{авто}}}{v_{\text{спред}}^{\text{пуст}}} + t_{\text{зах}} + \frac{h_{\text{под}}^{\text{ваг}} + h_{\text{опуск}}^{\text{авто}}}{v_{\text{спред}}^{\text{конт}}} + \frac{2 \cdot b_{\text{жа}} + b_n \cdot (N_n - 1)}{2 \cdot v_{\text{тел}}^{\text{эрузж}}} + t_{\text{отпуск}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{выгр}}^{\text{пуст}}$ — время одновременного движения портала и тележки при выгрузке, мин;

$t_{\text{опуск}}^{\text{пуст}}$ — время опускания пустого спредера, мин;

$t_{\text{зах}}$ — время захвата спредером контейнера, мин;

$t_{\text{под}}^{\text{эрузж}}$ — время подъема спредера с контейнером, мин;

$t_{\text{тел}}^{\text{эрузж}}$ — время движения тележки с контейнером, мин;

$t_{\text{опуск}}^{\text{эрузж}}$ — время опускания спредера с контейнером, мин;

$t_{\text{отпуск}}$ — время отпускания спредером контейнера, мин;

$t_{\text{под}}^{\text{пуст}}$ — время подъема пустого спредера, мин;

$h_{\text{опуск}}^{\text{ваг}}$ — расстояние опускания спредера с высоты движения тележки до автомобиля, м;

$h_{\text{под}}^{\text{ваг}}$ — расстояние подъема спредера с платформы до высоты движения тележки крана, м;

$v_{\text{тел}}^{\text{конт}}$ — скорость тележки крана с контейнером, м/мин;

$v_{\text{спред}}^{\text{конт}}$ — скорость спредера крана с контейнером, м/мин;

$v_{\text{спред}}^{\text{пуст}}$ — скорость спредера крана без контейнера, м/мин;

$b_{\text{жа}}$ — расстояние, преодолеваемое тележкой крана от оси ближайшей полосы

для автомобилей до оси ближайшего железнодорожного пути, м;

b_n — расстояние между осями ближайших железнодорожных путей, м;

N_n — количество железнодорожных путей под порталом крана.

Время операции погрузки, мин:

$$t_{\text{погр}} = t_{\text{погр}}^{\text{пуст}} + t_{\text{опуск}}^{\text{пуст}} + t_{\text{зах}} + t_{\text{под}}^{\text{груз}} + t_{\text{тел}}^{\text{груз}} + t_{\text{опуск}}^{\text{груз}} + t_{\text{отпуск}} + t_{\text{под}}^{\text{пуст}} = t_{\text{погр}}^{\text{пуст}} + \frac{h_{\text{авт}}^{\text{опуск}} + h_{\text{ваг}}^{\text{опуск}}}{v_{\text{спред}}^{\text{пуст}}} + t_{\text{зах}} + \frac{h_{\text{под}}^{\text{авт}} + h_{\text{опуск}}^{\text{ваг}}}{v_{\text{спред}}^{\text{пуст}}} + \frac{h_{\text{под}}^{\text{авт}} + h_{\text{опуск}}^{\text{ваг}}}{v_{\text{спред}}^{\text{конт}}} + \frac{2 \cdot b_{\text{жа}} + b_n \cdot (N_n - 1)}{2 \cdot v_{\text{тел}}^{\text{груз}}} + t_{\text{отпуск}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{погр}}^{\text{пуст}}$ — время одновременного движения портала и тележки при погрузке, мин.

Поскольку на грузовом фронте одновременно может работать несколько козловых кранов, предполагается, что каждый из них работает в отдельных зонах, имеющих одинаковый размер.

Для определения ожидаемого времени одновременного движения портала и тележки при выгрузке или погрузке задаем минимальное время перемещения тележки крана:

$$t_{\text{тел}}^{\text{мин}} = \frac{b_{\text{жа}}}{v_{\text{тел}}^{\text{пуст}}}, \quad (3)$$

где $v_{\text{тел}}^{\text{пуст}}$ — скорость тележки крана без контейнера, м/мин.

Тогда максимальное время перемещения тележки крана:

$$t_{\text{тел}}^{\text{макс}} = \frac{(b_{\text{жа}} + b_{\text{ж}})}{v_{\text{тел}}^{\text{пуст}}}, \quad (4)$$

где $b_{\text{ж}}$ — расстояние, преодолеваемое тележкой крана от оси ближайшего железнодорожного пути до оси крайнего железнодорожного пути, м.

При этом максимальное время перемещения портала задается формулой:

$$t_{\text{порт}}^{\text{макс}} = \frac{b_{\text{пт}}}{v_{\text{порт}}^{\text{пуст}}}, \quad (5)$$

где $b_{\text{пт}}$ — расстояние, преодолеваемое порталом крана от первой платформы до последней платформы, м;

$v_{\text{порт}}^{\text{пуст}}$ — скорость портала крана без контейнера, м/мин.

Расчет ожидаемого времени одновременного движения портала и тележки при выгрузке или погрузке производится по предложенной формуле:

$$M[t_{\text{погр}}^{\text{пуст}}] = M[t_{\text{выгр}}^{\text{пуст}}] = \int_{t_{\text{тел}}^{\text{мин}}}^{t_{\text{тел}}^{\text{макс}}} \left(1 - \frac{t - t_{\text{тел}}^{\text{мин}}}{t_{\text{тел}}^{\text{макс}} - t_{\text{тел}}^{\text{мин}}}\right) \cdot \left(1 - \frac{(t_{\text{тел}}^{\text{макс}} - t)^2}{(t_{\text{тел}}^{\text{макс}})^2}\right) dt + \int_{t_{\text{порт}}^{\text{макс}}}^{t_{\text{порт}}^{\text{мин}}} \frac{(t_{\text{тел}}^{\text{макс}} - t)^2}{(t_{\text{тел}}^{\text{макс}})^2} dt. \quad (6)$$

В методе предполагаем, что зона хранения параллельна оси погрузочно-выгрузочных железнодорожных путей, а парковочные места перпендикулярны к ней. Проезды для автомобилей под порталом крана являются двусторонними. Чтобы вычислить ожидаемое расстояние перемещения терминального тягача, вводятся отдельные формулы для ожидаемого расстояния перемещения по горизонтали и вертикали [11].

Ожидаемое расстояние по вертикали задается предложенным уравнением, учитывая случайность расположения необходимого контейнера в зоне хранения. Коэффициент 2 перед суммированием учитывает перемещение тягача в оба конца:

$$M[l_{\text{верт}}] = 2 \cdot \sum_{i=1}^{N_{\text{шир}}} \frac{i \cdot b_{\text{прод}} + (i-1) \cdot b_{\text{зп}} + \frac{b_{\text{зп}}}{2}}{N_{\text{шир}}}, \quad (7)$$

где $N_{\text{шир}}$ — количество групп по ширине;

$b_{\text{прод}}$ — ширина продольного прохода, м;

$b_{\text{зп}}$ — ширина группы в зоне хранения, м.

Чтобы вычислить ожидаемое расстояние перемещения по горизонтали, зона хранения разделена на $N_{дл}$ групп длиной $\frac{L_{дл}}{N_{дл}}$. Предполагается, что в каждом цикле терминальный тягач начинает и заканчивает свой путь в середине такой группы.

Для перемещений, выполняемых между разными столбцами групп, необходимо ввести количество групп между начальной и конечной позициями j . Расстояние перемещения по горизонтали для конкретного j равно $\frac{j \cdot L_{дл}}{N_{дл}}$, а его вероятность равна $\frac{2 \cdot (N_{дл} - j)}{N_{дл}^2}$. Согласно приведенному выше анализу, ожидаемое расстояние перемещения по горизонтали вычисляется по формуле:

$$M[l_{гориз}] = 2 \cdot \left(\frac{L_{дл}}{2 \cdot N_{шур} \cdot N_{дл}^2} + \frac{(N_{шур} - 1) \cdot L_{дл}}{N_{шур} \cdot N_{дл}^2} + \sum_{j=1}^{N_{дл}-1} \frac{2 \cdot j \cdot L_{дл} \cdot (N_{дл} - j)}{N_{дл}^3} \right). \quad (8)$$

Таким образом, ожидаемое время в пути терминальных тягачей может быть рассчитано:

$$T_{тяг} = \frac{M[l_{верт}]}{v_{тяг}} + \frac{M[l_{гориз}]}{v_{тяг}} + t_{с/о}, \quad (9)$$

где $v_{тяг}$ — средняя скорость терминального тягача, м/мин;

$t_{с/о}$ — время для соединения/отсоединения с прицепом тягача в зоне хранения, мин.

Для определения конфигурации терминала с минимальными капитальными и эксплуатационными расходами, учитывая годовые затраты, предложена целевая функция:

$$F(N_{дл}, N_{шур}, n_{кран}, n_{тяг}) = n_{дн} \cdot \mathcal{E}_{кр} \cdot t_{перег} \cdot (N_{приб} + N_{отпр} + N_{пн}) + n_{дн} \cdot \mathcal{E}_{тяг} \cdot T_{тяг} \cdot (N_{приб} + N_{отпр}) + K_{кран} \cdot \varepsilon \cdot n_{кран} + K_{тяг} \cdot \varepsilon \cdot n_{тяг} + K_{покp} \cdot \varepsilon \cdot L_{дл} + B_{шур} + K_{жднyти} \cdot \varepsilon \cdot L_{жднyти} \rightarrow \min, \quad (10)$$

где $N_{дл}$ — количество групп по длине;

$n_{кран}$ — количество козловых кранов;

$n_{тяг}$ — количество терминальных тягачей;

$n_{дн}$ — количество дней работы терминала, дни;

$\mathcal{E}_{кр}$ — эксплуатационные затраты на работу козловой крана, тыс. руб./ч;

$t_{перег}$ — среднее время погрузочно-разгрузочной операции, мин;

$N_{приб}$ — количество прибывающих контейнеров в сутки, конт.;

$N_{отпр}$ — количество отправляющихся контейнеров в сутки, конт.;

$N_{пн}$ — количество контейнеров по прямой перегрузке в сутки, конт.;

$\mathcal{E}_{тяг}$ — эксплуатационные затраты на работу терминального тягача, тыс. руб./ч;

$K_{кран}$ — капитальные затраты на козловой кран, млн руб.;

ε — норма дисконта;

$K_{тяг}$ — капитальные затраты на терминальный тягач, млн руб.;

$K_{покp}$ — капитальные затраты на квадратный метр покрытия, млн руб.;

$K_{жднyти}$ — капитальные затраты на погонный метр железнодорожного пути, млн руб.

Ограничения:

$$\frac{N_{шур} (L_{дл} - b_{нопер} \cdot (N_{дл} + 1))}{b_{конт}} \geq \frac{N_{приб} \cdot t_{хран}^{приб} + N_{отпр} \cdot t_{хран}^{отпр}}{k_c}, \quad (11)$$

где $b_{нопер}$ — ширина поперечного прохода, м;

$b_{\text{конт}}$ — ширина контейнера, м;
 $t_{\text{хран}}^{\text{приб}}$ — срок хранения прибывающего контейнера, ч;
 $t_{\text{хран}}^{\text{отпр}}$ — срок хранения отправляющегося контейнера, ч;
 k_c — коэффициент использования площади для хранения.

$$\frac{1}{n_{\text{кран}} \cdot k_{\text{кран}}} \cdot (N_{\text{приб}} + N_{\text{отпр}} + N_{\text{нп}}) \cdot t_{\text{перез}} + t_{\text{под/уб}} \cdot k_{\text{TEU}} \cdot \frac{N_{\text{приб}} + N_{\text{отпр}} + N_{\text{нп}}}{N_{\text{сост}} \cdot L_{\text{ждпути}}} \leq T_{\text{раб}}, \quad (12)$$

где $k_{\text{кран}}$ — коэффициент использования крана;
 $t_{\text{под/уб}}$ — время на подачу и уборку контейнерного состава, ч;
 K_{TEU} — коэффициент сорокафутовых к двадцатифутовым контейнерам;
 $N_{\text{сост}}$ — количество контейнеров в составе, конт;
 $T_{\text{раб}}$ — время работы терминала в сутки, ч.

$$\frac{1}{n_{\text{тяг}} \cdot k_{\text{тяг}}} \cdot (N_{\text{приб}} + N_{\text{отпр}}) \cdot T_{\text{тяг}} \leq T_{\text{раб}}, \quad (13)$$

$$N_{\text{дл}}, N_{\text{шир}}, n_{\text{кран}}, n_{\text{тягач}} \in Z, \quad (14)$$

где $k_{\text{тяг}}$ — коэффициент использования терминального тягача.

Результаты расчета

Для определения зависимостей количества козловых кранов, терминальных тягачей и мест хранения от различных контейнеропотоков приняты характеристики, представленные в табл. 1.

Объем контейнеропотока по прибытию и отправлению равный. Срок хранения на терминале для контейнеров одинаковый.

Важно отметить, что формула времени цикла работы крана имеет некоторые упрощения. Предполагается, что подъем и перемещение

контейнера краном происходят случайным образом; однако это предположение не относится к действующему терминалу, где движения крана тщательно упорядочиваются, чтобы оптимизировать выполнение конкретной задачи. Кроме того, зона работы кранов может быть разделена на неравные зоны для одинаковых кранов.

На основании предложенных расчетов для определения конфигурации контейнерного терминала результаты (табл. 2) показывают, что время простоя контейнера оказывает значительное влияние на производительность терминала. На терминалах с контейнеропотоком до 50 тыс. контейнеров в год наиболее сложными являются погрузочно-разгрузочные операции с вагонами. На терминалах с контейнеропотоком более 50 тыс. контейнеров в год наиболее трудоемкие операции связаны с большим временем простоя и рациональным использованием терминальных тягачей (рис. 1).

Выводы

Увеличение размера терминала позволяет создать оптимальную конфигурацию с меньшим количеством групп по ширине и большим количеством по длине. При этом продолжительность хранения контейнера не оказывает существенного влияния на время цикла работы всей техники, которое в основном складывается из цикла работы кранов и локомотивов. Однако время хранения контейнеров существенно влияет на затраты, особенно для крупных терминалов. Это означает экономически нецелесообразное применение предложенной технологии на терминалах с контейнеропотоком более 100 тыс. контейнеров в год.

Как видно из графика, сокращение цикла работы крана до 1,01 мин. для терминала с контейнеропотоком более 500 тыс. контейнеров в год обусловлено конфигурацией с использованием двух козловых кранов, в отличие

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные для определения зависимостей

Показатель	Значение
<i>Коэффициенты</i>	
Коэффициент использования терминального тягача	0,75
Коэффициент использования площадки для хранения	0,75
Коэффициент использования крана	0,75
Коэффициент сорокафутовых к двадцатифутовым контейнерам	1,4
<i>Характеристика контейнеропотока</i>	
Длина контейнерного состава, м	700
Количество контейнеров в одном составе, конт.	50
<i>Характеристика терминала</i>	
Длина зоны хранения контейнеров, м	70
Время на подачу и уборку контейнерного состава, мин.	30
Ширина поперечного прохода, м	15
Ширина продольного прохода, м	20
Ширина группы в зоне хранения, м	26
Средняя скорость терминального тягача, м/мин	350
Скорость спредера крана без контейнера, м/мин	100
Скорость спредера крана с контейнером, м/мин	60
Скорость тележки крана с контейнером, м/мин	150
Скорость тележки крана без контейнера, м/мин	150
Скорость портала крана без контейнера, м/мин	190
Скорость портала крана с контейнером, м/мин	190
Время для соединения/отсоединения с прицепом тягача в зоне хранения, мин.	2
Время захвата спредером контейнера, мин.	2
Время отпускания спредером контейнера, мин.	2
<i>Экономические показатели</i>	
Капитальные затраты на квадратный метр покрытия, млн руб.	0,01
Капитальные затраты на погонный метр железнодорожного пути, млн руб.	0,05
Эксплуатационные затраты на работу козловой крана, тыс. руб./ч	15
Эксплуатационные затраты на работу терминального тягача, тыс. руб./ч	10
Капитальные затраты на терминальный тягач, млн руб.	0,7
Капитальные затраты на козловой кран, млн руб.	10

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета

Контейнеропоток, конт./год	Срок хранения, сутки	Количество групп контейнеров по длине зоны хранения, штук	Количество групп контейнеров по длине, штук	Количество козловых кранов, штук	Количество терминальных тягачей, штук	Капитальные вложения, млн
25 000	0,5	35	1	1	1	89,99
	1,0	30	1	1	1	89,99
	1,5	25	1	1	1	89,99
	3,0	8	1	1	1	90,41
	5,0	11	2	1	1	135,63
50 000	0,5	31	1	1	1	93,17
	1,0	19	1	1	1	93,80
	1,5	5	1	1	1	93,80
	3,0	13	3	1	1	184,43
	5,0	4	4	1	1	230,06
100 000	0,5	25	1	1	1	96,50
	1,0	19	2	1	1	143,87
	1,5	5	2	1	1	144,96
	3,0	8	5	1	1	280,76
	5,0	4	8	1	1	417,67
500 000	0,5	12	3	2	2	234,50
	1,0	6	7	2	3	420,13
	1,5	3	11	2	5	621,74
	3,0	2	25	2	9	1939,40
	5,0	1	44	2	17	2224,60

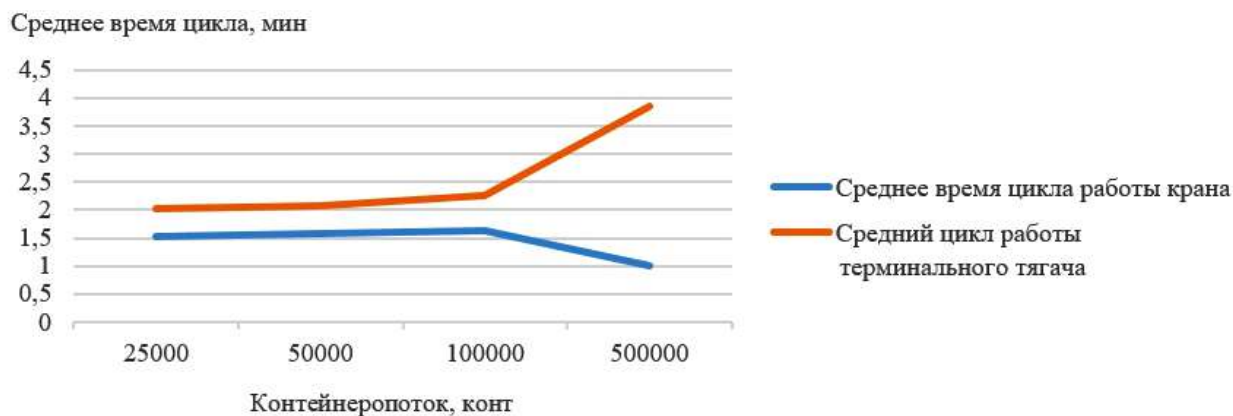


Рис. 1. Зависимость среднего времени цикла погрузочно-разгрузочных машин от контейнеропотока на терминале

от других конфигураций, в которых используется только один кран. С увеличением размера терминала увеличивается и время работы терминальных тягачей. Однако увеличение количества терминальных тягачей не влияет на продолжительность цикла, как это происходит при использовании кранов. Наиболее трудоемкой операцией является работа на железнодорожных путях на терминалах с контейнеропотоком 25 тыс. и 50 тыс. контейнеров в год, учитывая, что кранам приходится выполнять в том числе и перегрузки по прямому варианту. И наоборот, для крупных терминалов наиболее трудоемкая работа связана с внутритерминальным перемещением из-за размера терминала.

Таким образом, использование технологии хранения контейнеров на прицепах на терминалах Дирекции по управлению терминально-складским комплексом ОАО «РЖД» имеет перспективы увеличить конкурентоспособность компании на рынке контейнерных перевозок и способствует более устойчивому развитию в условиях современного бизнеса.

Однако реализация этих перспектив требует комплексного подхода и сотрудничества всех участников транспортного процесса для решения вопросов:

- наличия места для хранения контейнеров на прицепах;
- безопасности хранения контейнера на прицепе;
- юридических аспектов технологии;
- приобретения прицепов.

Библиографический список

1. Маликов О. Б., Коровяковский Е. К., Коровяковская Ю. В. Проектирование контейнерных терминалов. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2015. 52 с.

2. Кобозева Н. Г., Воронов А. А. Эффективность системы железнодорожных перевозок в условиях появления и роста частного парка: маркетинговые и операционные аспекты // Экономика устойчивого развития. 2022. № 2 (50). С. 97–99.

3. Кузьменкова В. Н., Паламарчук Г. И., Поляков В. В. Особенности и правила перевозки грузов универсальными контейнерами при смешанном сообщении // Специальная техника и технологии транспорта. 2022. № 14. С. 166–171.

4. Конограй О. А., Воронов А. А. Перспективы конверсии международных транспортно-логистических потоков и потенциал арктической транспортной инфраструктуры в транзите Китай — Европа // Экономика устойчивого развития. 2022. № 2 (50). С. 190–193. DOI: 10.37124/20799136_2022_2_50_190.

5. Разработка модели-тренажера морского порта / Е. К. Коровяковский [и др.] // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке: сборник трудов XI Санкт-Петербургского конгресса (Санкт-Петербург, 23–24 ноября 2017 года). СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2017. 138 с.

6. Илесалиев Д. И., Коровяковский Е. К. К вопросу о наиболее рациональном размещении грузовых терминалов // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 18–25 апреля 2016 года). СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2016. С. 162–166.

7. Арефьев И. Б., Коровяковский Е. К. Анализ и моделирование транспортных узлов. СПб.: издательство «ЮПИ», 2018. 228 с.

8. Малышев Н. В., Коровяковский Е. К. К вопросу роботизации тыловых контейнерных терминалов // Бюллетень результатов научных исследований. 2020. № 1. С. 15–25. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-1-15-25.

9. ЦМ-Контейнеризация | Терминально-складские услуги // Грузовые перевозки [Электронный ресурс]. URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9774/page/103290?id=18632#main-header> (дата обращения: 05.07.2024).

10. Малышев Н. В. Модели и методы диспетчеризации контейнеропотока на терминалах: дисс. ... канд. техн. наук. СПб, 2022. 137 с.

11. Малышев Н. В., Бойков С. А. Математическая модель распределения заданий между

подъемно-транспортными машинами // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19, № 3. С. 651–658.

Дата поступления: 29.07.2024

Решение о публикации: 16.08.2024

Контактная информация:

МАЛЫШЕВ Николай Валерьевич — канд. техн. наук, старший преподаватель; kol.pgups@mail.ru

Organization of terminal operations when storing containers on semi-trailers

N. V. Malyshev

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

For citation: *Malyshev N. V.* Organization of terminal operations when storing containers on semi-trailers // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 575–584. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-575-584

Abstract

Purpose: development of a method for determining the configuration of a container terminal that will help in the terminal design process to determine the number of gantry cranes, terminal trucks, and the number and location of storage areas. **Methods:** materials from open sources are used in the work. A systematic approach to the design of a container terminal is applied. **Results:** a method for determining the configuration of a container terminal is developed, the difference being the storage of a container on a semi-trailer. **Practical importance:** the developed method will allow estimation of container terminal performance and capital costs before design.

Keywords: lifting and transport machine, terminal, container transport system, rational allocation of resources

References

1. Malikov O. B., Korovyakovskij E. K., Korovyakovskaya Yu. V. Proektirovanie kontejnernih terminalov. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2015. 52 s. (In Russian)

2. Kobozeva N. G., Voronov A. A. Effektivnost' sistemy zheleznodorozhnyh perevozok v usloviyah pojavleniya i rosta privatnogo parka: marketingovy

i operacionnye aspekty // Ekonomika ustojchivogo razvitiya. 2022. № 2 (50). S. 97–99. (In Russian)

3. Kuz'menkova V. N., Palamarchuk G. I., Polyakov V. V. Osobennosti i pravila perevozki грузов universal'nymi kontejnerami pri smeshannom soobshchenii // Special'naya tekhnika i tekhnologii transporta. 2022. № 14. S. 166–171. (In Russian)

4. Konograj O. A., Voronov A. A. Perspektivy konversii mezhdunarodnyh transportno-logisticheskikh

potokov i potencial arkticheskoj transportnoj infrastruktury v tranzite Kitaj — Evropa // *Ekonomika ustojchivogo razvitiya*. 2022. № 2 (50). S. 190–193. DOI: 10.37124/20799136_2022_2_50_190. (In Russian)

5. Razrabotka modeli-trenazhera morskogo porta / E. K. Korovyakovskij [i dr.] // *Professional'noe obrazovanie, nauka i innovacii v XXI veke: sbornik trudov XI Sankt-Peterburgskogo kongressa (Sankt-Peterburg, 23–24 noyabrya 2017 goda)*. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2017. 138 s. (In Russian)

6. Ilesaliev D. I., Korovyakovskij E. K. K voprosu o naibolee racional'nom razmeshchenii gruzovyh terminalov // *Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXVI Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh (Sankt-Peterburg, 18–25 aprelya 2016 goda)*. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2016. S. 162–166. (In Russian)

7. Aref'ev I. B., Korovyakovskij E. K. *Analiz i modelirovanie transportnyh uzlov*. SPb.: izdatel'stvo “YUPI”, 2018. 228 s. (In Russian)

8. Malyshev N. V., Korovyakovskij E. K. K voprosu robotizacii tylovyh kontejnernyh terminalov // *Byulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij*. 2020. № 1. S. 15–25. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-1-15-25. (In Russian)

9. CM-Kontejnerizaciya | Terminal'no-skladskie uslugi // *Gruzovye perevozki [Elektronnyj resurs]*. URL: <https://cargo.rzd.ru/ru/9774/page/103290?id=18632#main-header> (data obrashcheniya: 05.07.2024). (In Russian)

10. Malyshev N. V. *Modeli i metody dispatcherizacii kontejneropotoka na terminalah: diss. ... kand. tekhn. nauk*. SPb., 2022. 137 s. (In Russian)

11. Malyshev N. V., Bojkov S. A. *Matematicheskaya model' raspredeleniya zadaniy mezhdru pod'emno-transportnymi mashinami* // *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya*. 2022. T. 19, № 3. S. 651–658. (In Russian)

Received: 29.07.2024

Accepted: 16.08.2024

Author's information:

Nicolay V. MALYSHEV — PhD in Engineering, Senior lecturer; kol.pgups@mail.ru

УДК 624.21

Структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в городе Санкт-Петербурге. Часть 2

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

¹ ООО «Оператор скоростных автомагистралей – Север», Россия, 191186, пер. Волынский, 3а, литера А

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, литера Б

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

Для цитирования: Махонько А. А., Лазарев Ю. Г., Антонюк А. А. Структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в городе Санкт-Петербурге. Часть 2 // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 585–597. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-585-597

Аннотация

Цель: оценка работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций и оценка текущего состояния конструкций вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в городе Санкт-Петербурге по причине возникновения нештатных ситуаций, при которых акселерометрами на пилонах фиксируются значения, превышающие предельные. **Методы:** для получения результатов используются статистические данные с баз данных действующей системы мониторинга инженерных конструкций. Поставленные в рамках исследования задачи решены посредством применения теоретических методов научного познания: аналитического метода, теории математической статистики, индукции. **Результаты:** предложен структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций и текущего состояния конструкций вантового моста, по полученным данным с акселерометров, включающий три этапа: I этап — предварительный анализ; II этап — выборочный анализ; III этап — детальный анализ. **Практическая значимость:** полученный структурный подход по оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций на вантовых мостах позволяет уменьшить количество ложных срабатываний системы и оценить текущее состояние мостового сооружения. В рамках III этапа структурного подхода предлагается разработка методики оценки работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций с последующей оценкой текущего состояния конструкций вантового моста.

Ключевые слова: мониторинг искусственных сооружений, управление техническим состоянием, объект транспортной инфраструктуры, вантовый мост, напряженно-деформированное состояние, акселерометр, вибрационный мониторинг

Введение

Система мониторинга инженерных конструкций (СМИК) представляет собой технологию информационного обеспечения принятия решений по управлению параметрами состояния мостового сооружения на всех стадиях жизненного цикла, реализуемых посредством систематического или периодического слежения (наблюдения) за техническим состоянием.

Использование СМИК является обязательным условием при реализации любого объекта транспортной инфраструктуры, относящегося к внеклассным сооружениям, к которым, в свою очередь, относятся вантовые мосты. Система мониторинга инженерных конструкций реализуется для обеспечения требуемого уровня безопасности, в том числе снижения риска, связанного с причинением вреда жизни и здоровью граждан, окружающей застройке, имуществу и окружающей среде конструкций [1–8].

Основным показателем работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций является надежность системы, а именно свойство системы сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в соответствии с заданными целями и условиями применения. При высокой степени надежности системы уменьшается риск возникновения нештатных ситуаций, который, в свою очередь, может привести к аварийным ситуациям, а именно состояниям эксплуатируемого объекта, характеризующимся нарушением пределов и (или) условий безопасности эксплуатации, при которых все неблагоприятные влияния источников опасности на персонал, население и окружающую среду удерживаются в приемлемых пределах посредством соответствующих технических средств, предусмотренных проектом. Иными

словами, система мониторинга инженерных конструкций должна обеспечивать возможность детальной оценки технического состояния сооружения в момент наступления нештатных ситуаций с последующей оценкой рисков в кратчайшие сроки для недопущения ухудшения потребительских свойств мостового сооружения [9–13].

В данной статье продолжается научное исследование вопроса структурного подхода к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций, который был озвучен в первой части настоящей статьи.

Структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций

Для проверки гипотезы о том, что исследуемые случайные величины ускорений колебаний относятся к семейству нормальных распределений, необходимо подобрать нормальное распределение таким образом, чтобы оно было максимально приближено к эмпирическому распределению случайных величин ускорений колебаний. Для решения поставленной задачи коллектив авторов предлагает использовать коэффициент детерминации, который вычисляется по формуле (1):

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (1)$$

где SS_{res} — сумма квадратов отклонений, рассчитанная по формуле (2);

SS_{tot} — общая сумма квадратов случайной величины, рассчитанная по формуле (3).

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2 \quad (2)$$

$$SS_{tot} = n\hat{\sigma}_x^2 \tag{3}$$

где x_j, \hat{x}_i — эмпирические и расчетные (теоретические) значения объясняемой переменной;

$\hat{\sigma}_x^2$ — дисперсия случайной величины.

Коэффициент детерминации, также известный как R^2 , представляет собой статистическую меру согласия, используемую в регрессионном анализе, чтобы определить, насколько хорошо регрессионная модель аппроксимирует реальные точки данных. Он дает представление о доле дисперсии зависимой переменной, которую можно предсказать на основе независимых переменных. Значения коэффициента детерминации варьируются от 0 до 1, причем более высокие значения указывают на лучшее соответствие модели.

Основной характеристикой закона нормального распределения является математическое ожидание и стандартное отклонение, которые определяются по формулам (4) и (5) соответственно:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^k n_j \cdot \bar{x}_j \tag{4}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^k n_j \cdot (\bar{x}_j - \bar{x})^2}, \tag{5}$$

где n_j — частота варианты;

n — объем выборки.

Таким образом, необходимо подобрать значение математического ожидания и стандартного отклонения нормального (теоретического) распределения, чтобы коэффициент детерминации стремился к 1, а сумма квадратов отклонений близилась к 0.

Для проверки гипотезы были рассчитаны коэффициент детерминации и сумма квадратов отклонения для произвольных выборок случайных величин ускорений колебаний пилонов, полученных при срабатывании СММК.

В табл. 1 показаны несколько выборок с вычисленными значениями математических ожиданий, стандартных отклонений, коэффициента детерминации и суммой квадратов отклонений.

На рис. 1–12 показаны графики эмпирической и теоретической функции нормального распределения и их плотности вероятности.

ТАБЛИЦА 1. Результаты анализа выборок

№ п/п	Наименование выборки	$\bar{x}_{эмп}$	$\sigma_{эмп}$	$\bar{x}_{теор}$	$\sigma_{теор}$	SS_{res}	R^2	Группа
1	Выборка №1-R	-0,127	0,7299	1E-06	0,5861	0,3058	0,992088	1
2	Выборка №2-R	0,1106	0,5279	0,0679	0,3798	0,0696	0,998110	1
3	Выборка №3-R	-0,1169	0,2338	1E-06	0,2566	0,8924	0,977549	2
4	Выборка №4-R	0,1118	0,1685	0,0828	0,1351	0,0026	0,999934	2
5	Выборка №5-R	-0,3148	0,11501	1E-06	0,6388	2,8938	0,673582	3
6	Выборка №6-R	-0,2974	0,1244	1E-06	0,3997	5,9006	0,562387	3

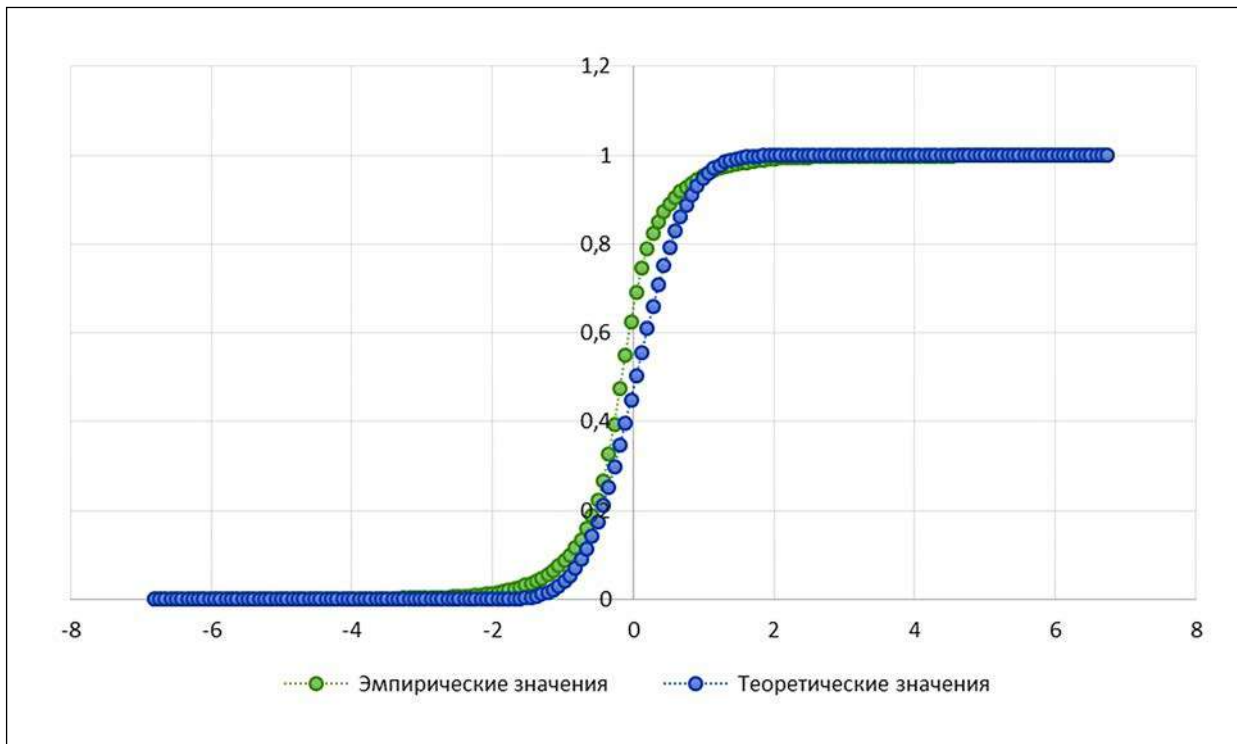


Рис. 1. Эмпирическая и теоретическая интегральная функция (каммулята) выборки №1-R

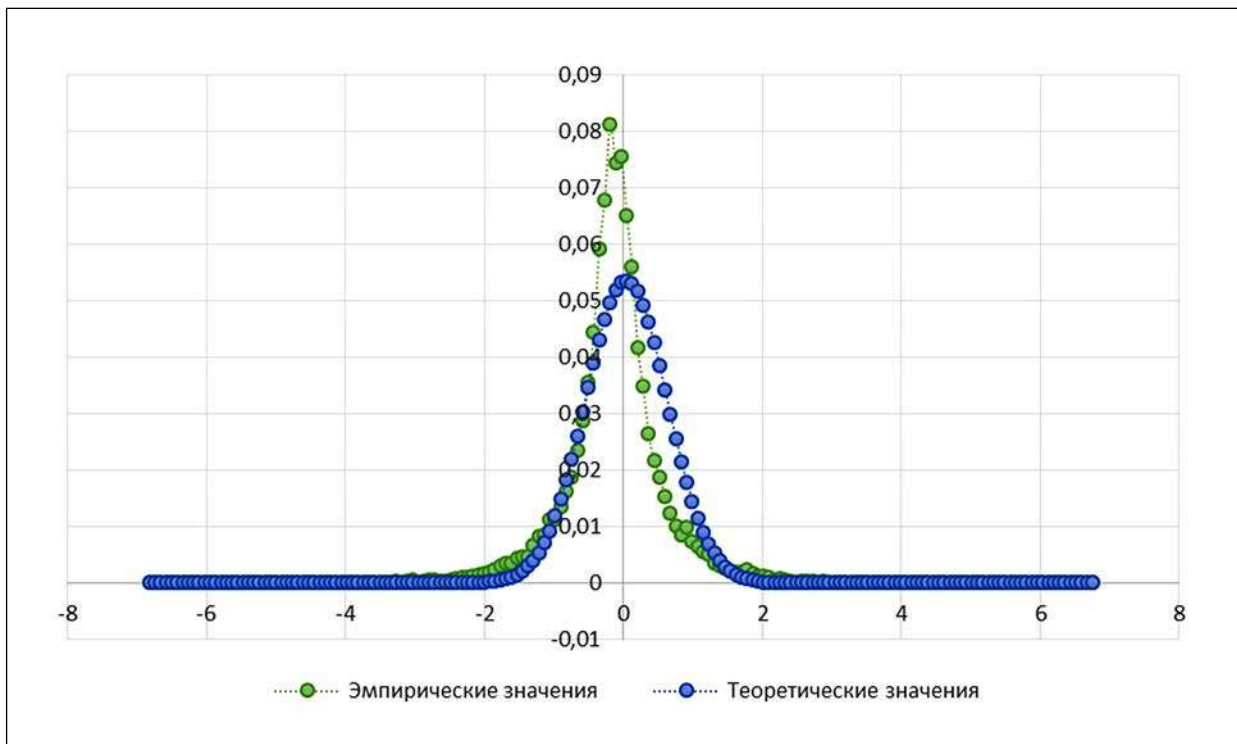


Рис. 2. Эмпирическая и теоретическая функция плотности вероятности выборки №1-R

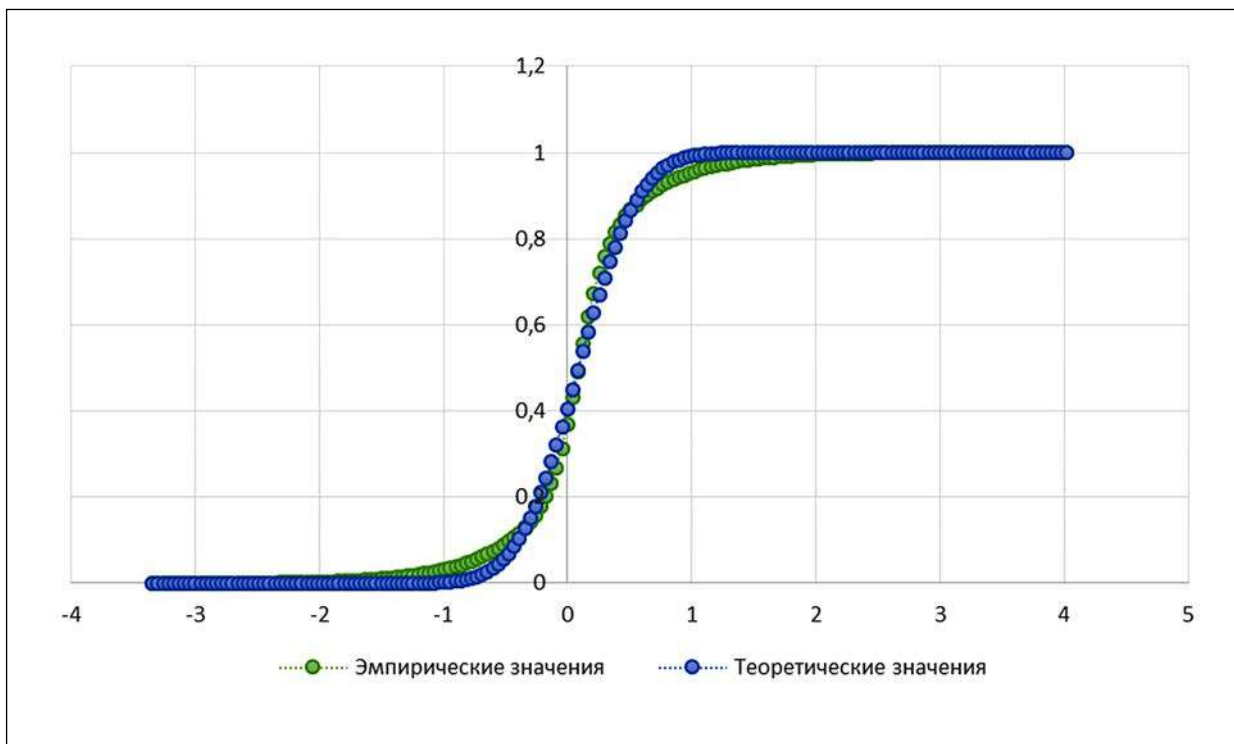


Рис. 3. Эмпирическая и теоретическая интегральная функция (каммулята) выборки №2-R

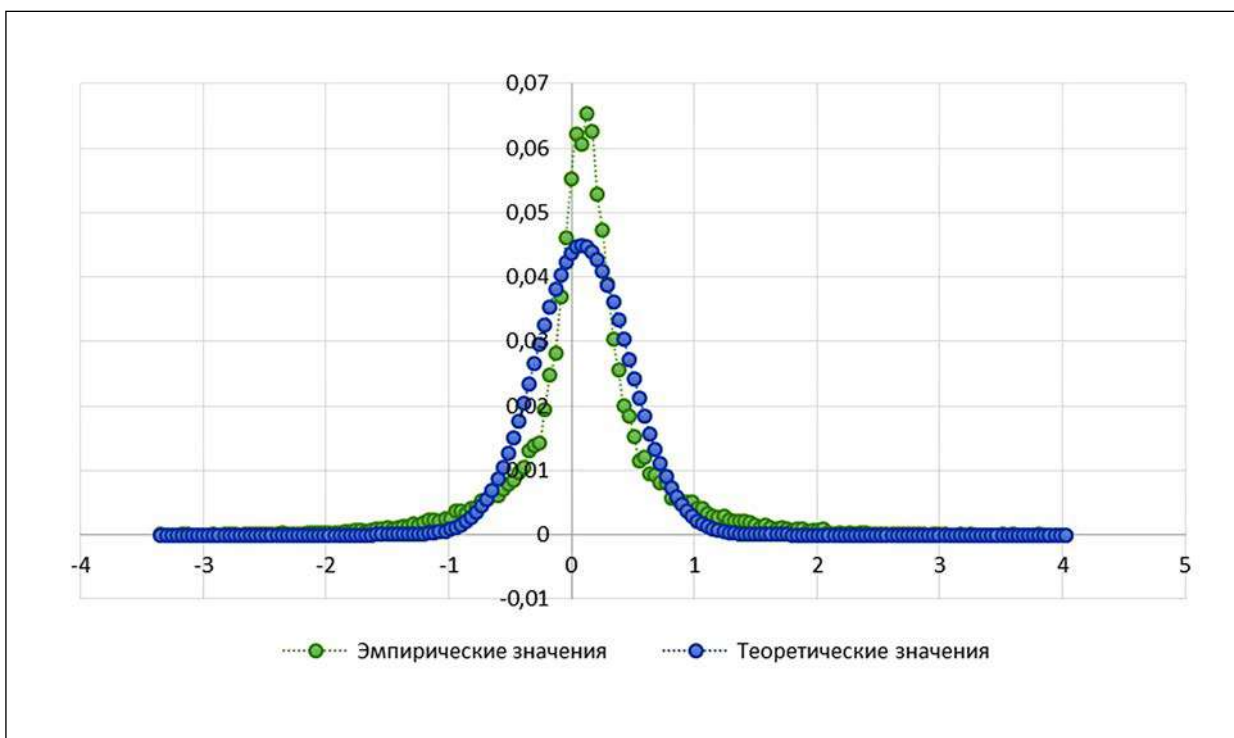


Рис. 4. Эмпирическая и теоретическая функция плотности вероятности выборки №2-R

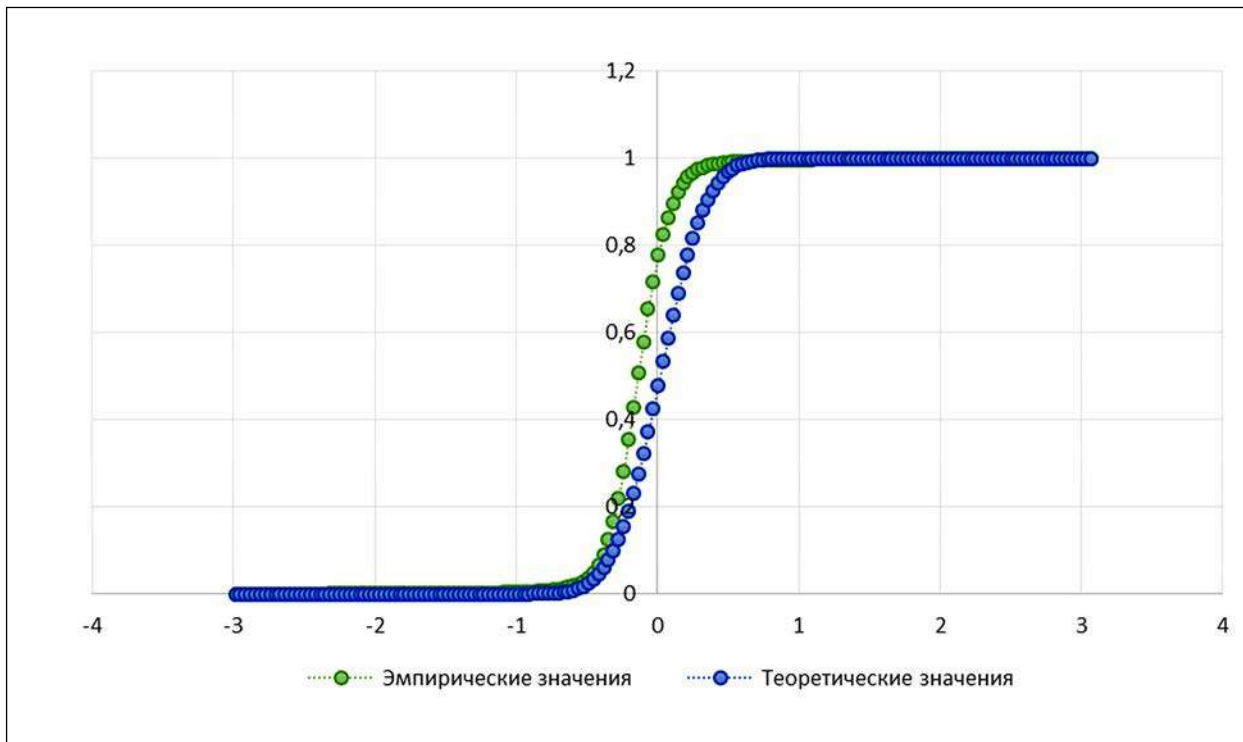


Рис. 5. Эмпирическая и теоретическая интегральная функция (кумулята) выборки №3-R

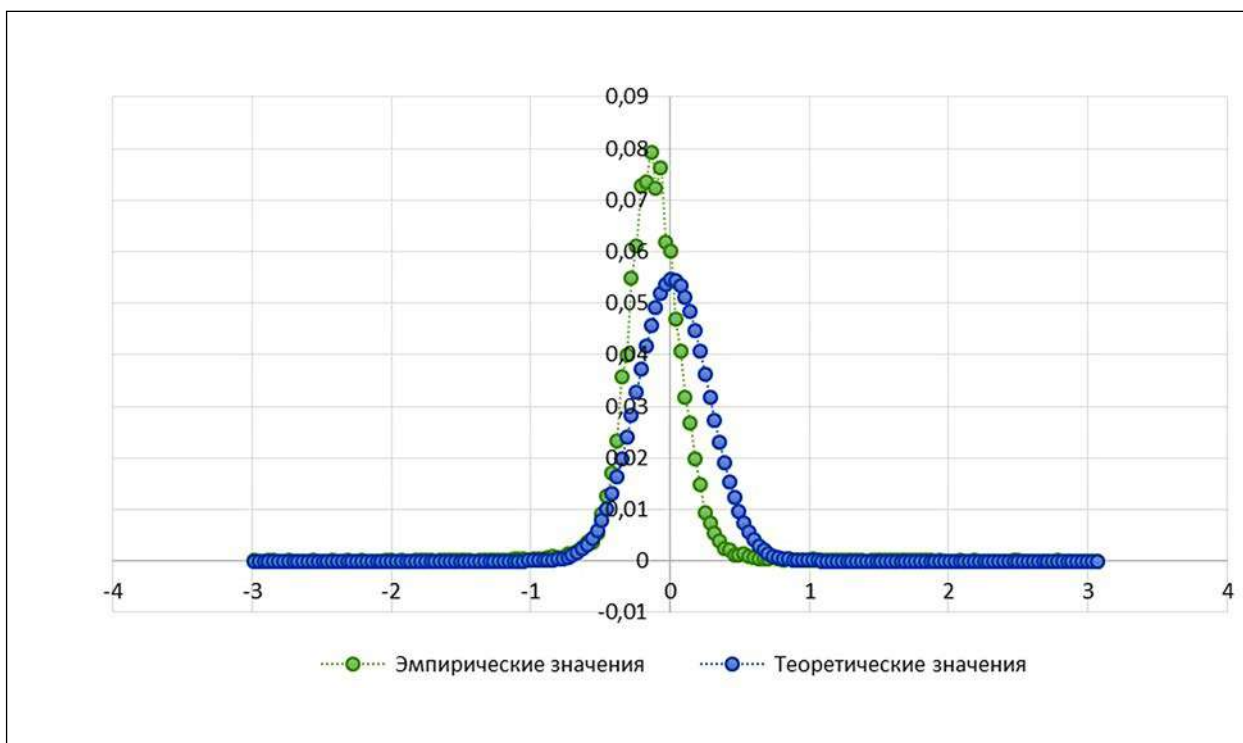


Рис. 6. Эмпирическая и теоретическая функция плотности вероятности выборки №3-R

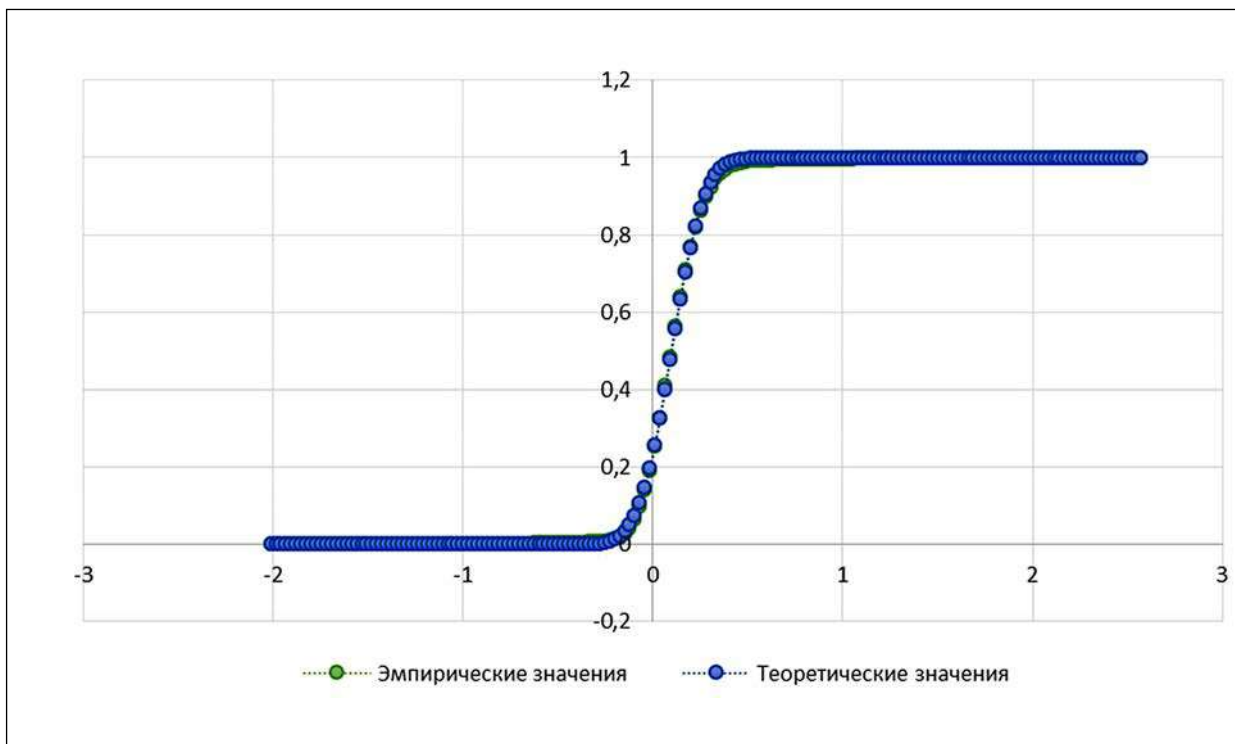


Рис. 7. Эмпирическая и теоретическая интегральная функция (каммулята) выборки №4-R

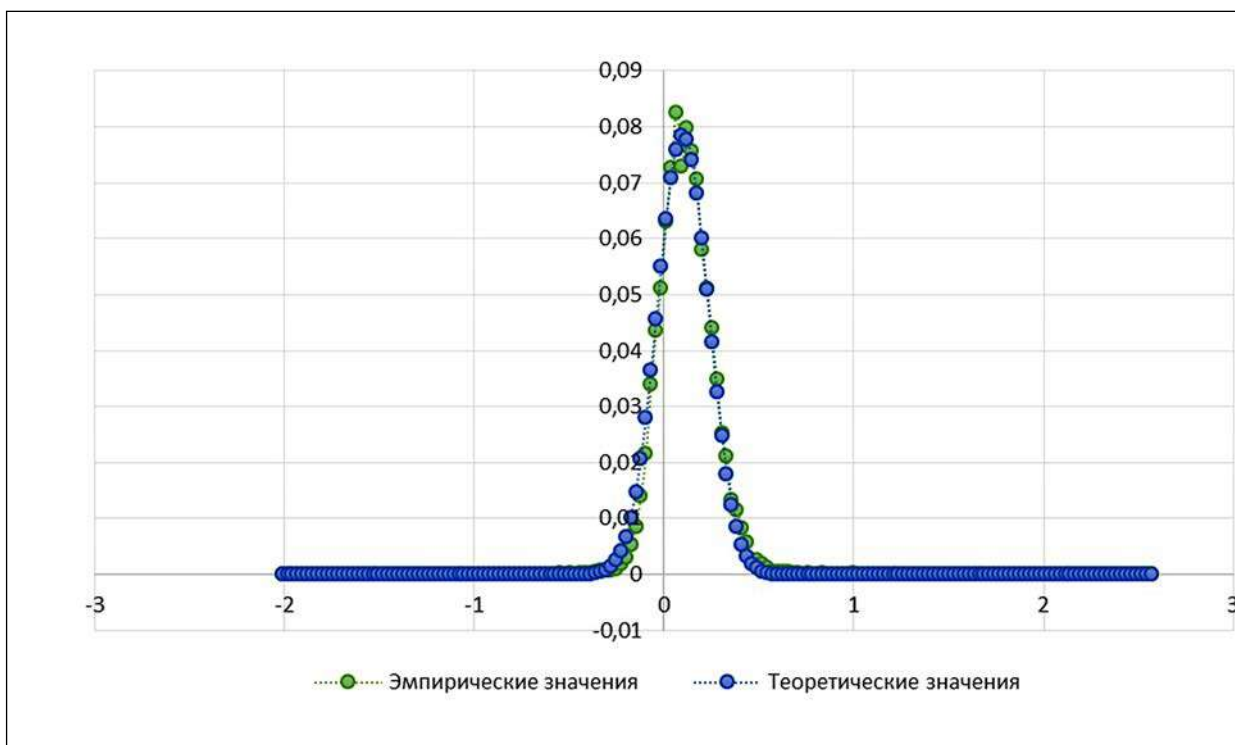


Рис. 8. Эмпирическая и теоретическая функция плотности вероятности выборки №4-R

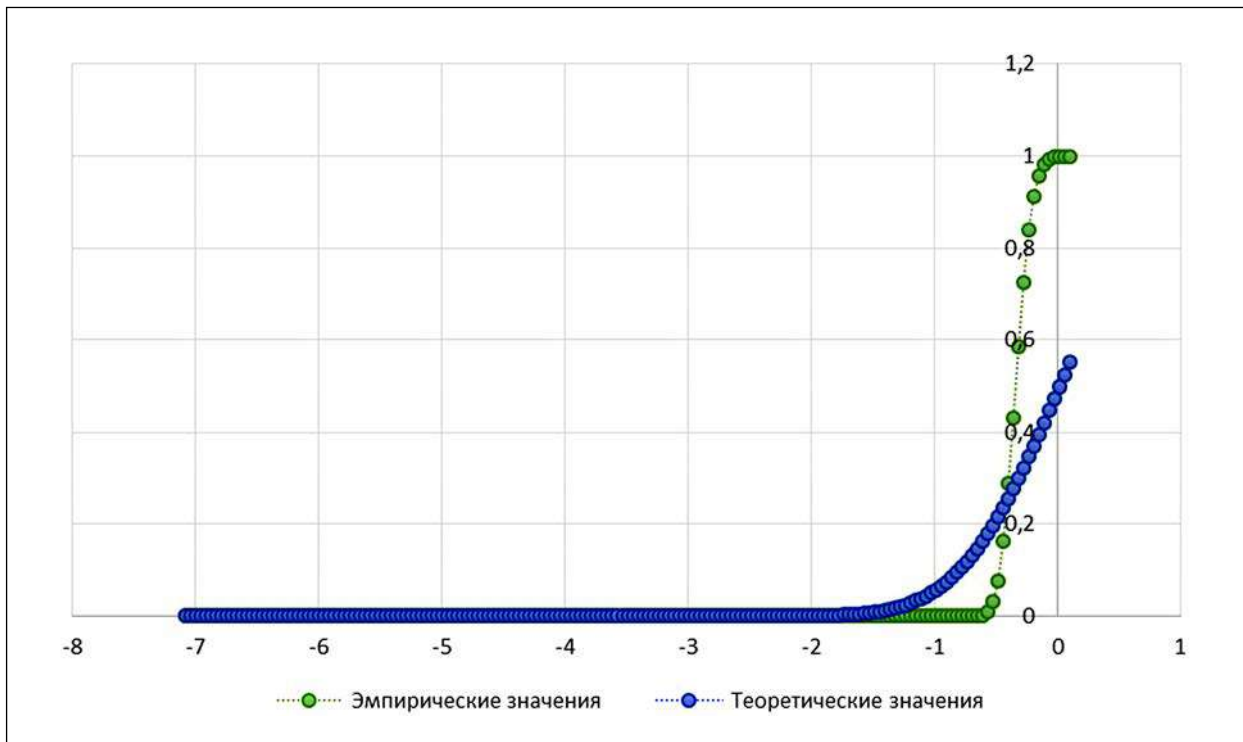


Рис. 9. Эмпирическая и теоретическая интегральная функция (кумулята) выборки №5-R

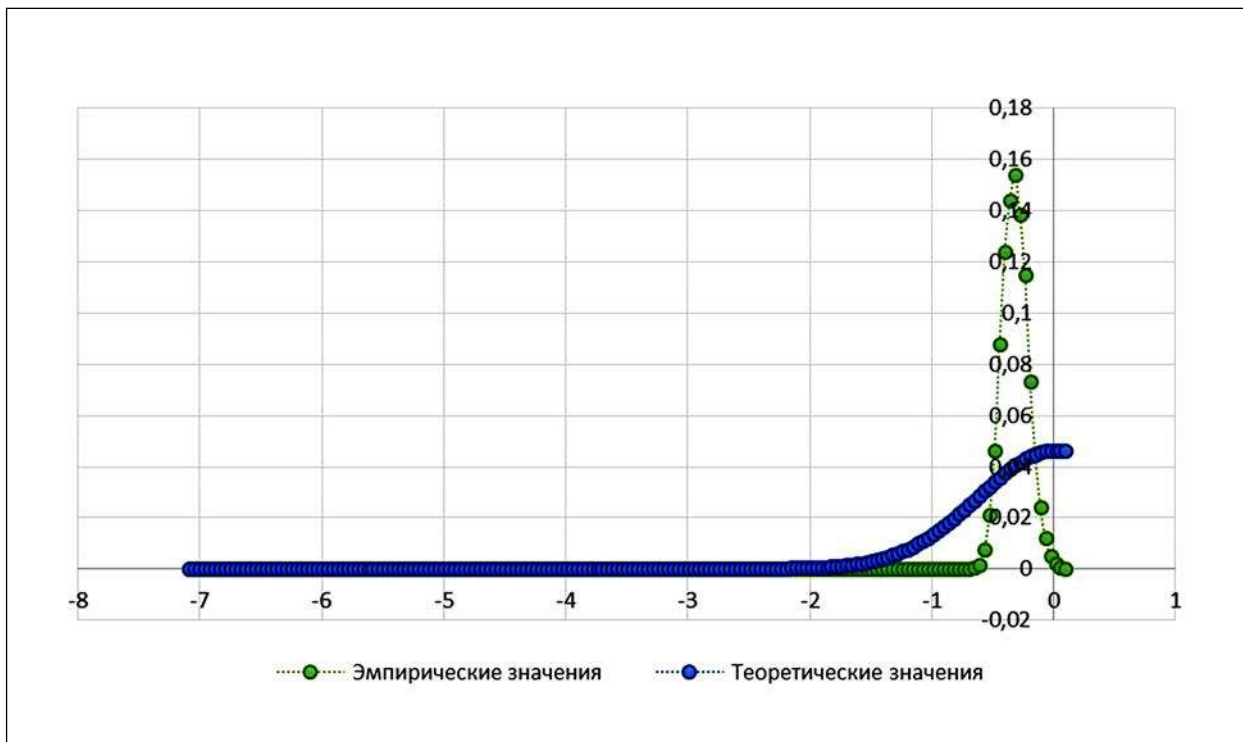


Рис. 10. Эмпирическая и теоретическая функция плотности вероятности выборки №5-R

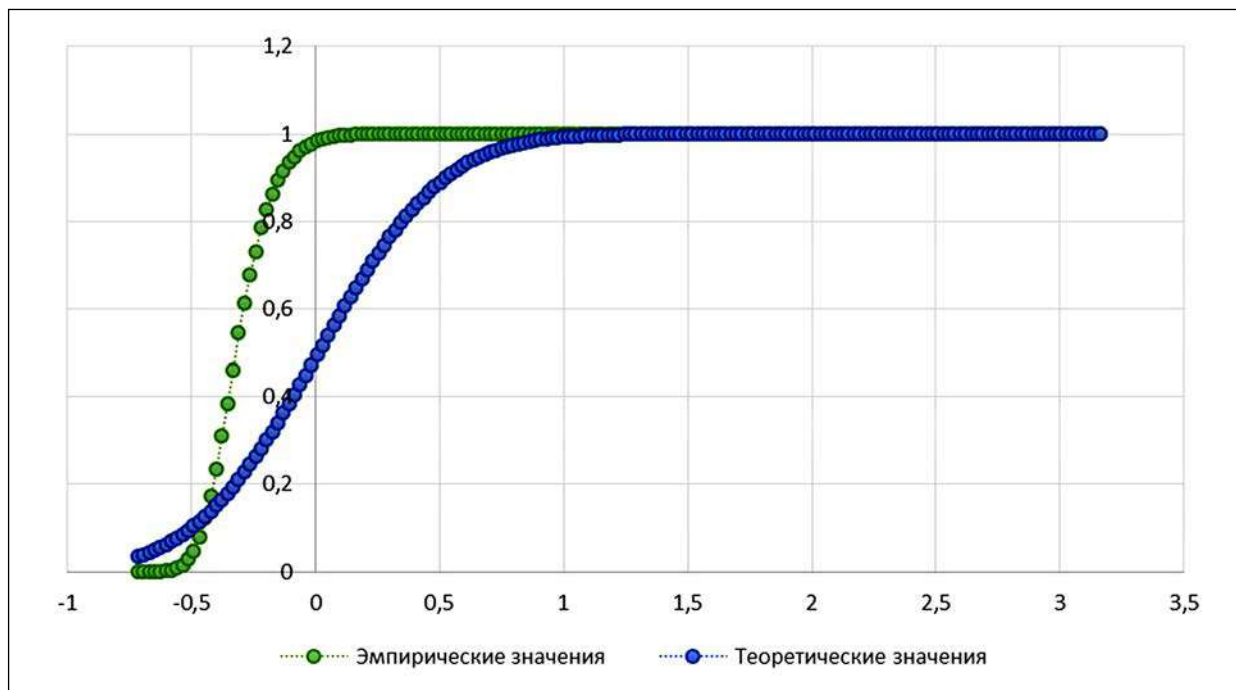


Рис. 11. Эмпирическая и теоретическая интегральная функция (кумулята) выборки №6-R

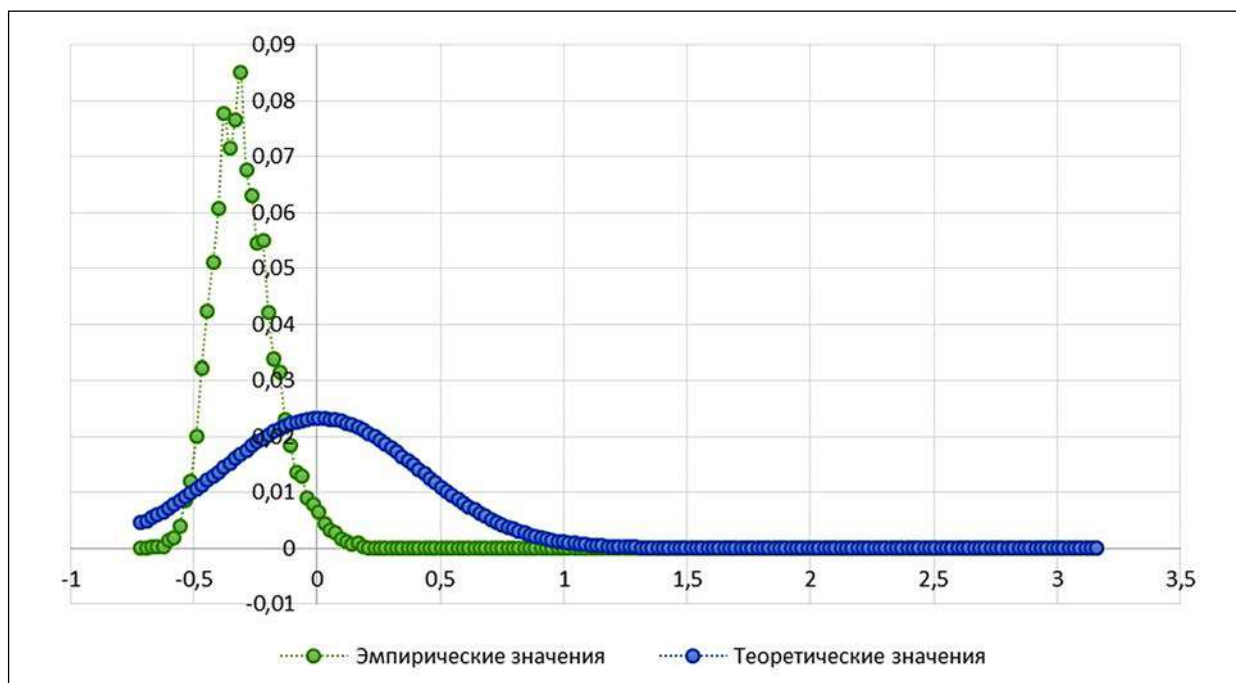


Рис. 12. Эмпирическая и теоретическая функция плотности вероятности выборки №6-R

Из анализа полученных результатов следует, что случайные величины ускорений колебаний распределены в большинстве случаев по

нормальному закону распределения с различными значениями математического ожидания и стандартного отклонения. Также из анализа

видно, что присутствуют выборки, где коэффициент детерминации значительно меньше, чем в других выборках, а сумма квадратов отклонений намного больше.

Из вышесказанного можно сделать строгий вывод, что предположение, сделанное на этапе предварительного анализа данных о делении нештатных ситуаций на 2 группы, верно, но частично, так как более корректно распределить все срабатывания системы мониторинга инженерных конструкций на 3 группы.

В 1-ю группу вошли те нештатные ситуации, когда срабатывание СММК обоснованно и вызвано динамическим откликом конструкции. При этом коэффициент детерминации стремится к 1, что показывает практическую сходимость с теоретической регрессионной моделью нормального закона распределения. График функции плотности нормального распределения получается более пологим с менее длинными хвостами, что характеризуется показателем стандартного отклонения, который по сравнению с другими группами получается ближе к значению, равному 1. Предлагается ситуации, вошедшие в 1-ю группу, называть откликами.

К 2-й группе относятся нештатные ситуации, вызванные единичными, сильно локализованными экстремумами, значения которых превосходят предельные. В данном случае график функции плотности вероятности нормального распределения получается островершинным с длинными хвостами, что указывает на маленькое значение стандартного отклонения, которое, в свою очередь, показывает небольшой разброс случайных величин относительно среднего значения. При этом коэффициент детерминации также стремится к 1. Авторами предлагается для удобства терминологии называть такие нештатные ситуации выбросами.

В 3-ю группу распределены случаи, когда срабатывание СММК необоснованно и вызвано

сбоями или ошибками оборудования, что показывают значения коэффициента детерминации и суммы квадратов отклонений. Коэффициент детерминации может получиться значительно меньше 1, а сумма квадратов отклонений — в разы больше 1, что показывает совершенную несходимость эмпирического закона распределения с нормальным. Также стоит отметить, что и визуально каммулята и функция плотности вероятности на графиках значительно отличаются от графиков нормального распределения. Предлагается называть такие нештатные ситуации сбоями.

Для перехода на III этап структурного подхода необходимо проанализировать все нештатные ситуации за весь период эксплуатации вантового моста через Петровский канал. Также необходимо разработать методику оценки работоспособности системы мониторинга.

Выборочный анализ нештатных ситуаций во время эксплуатации системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал показал, что присутствует корреляция между срабатыванием системы и полученными характеристиками нормального закона распределения: стандартным отклонением, общей суммой квадратов отклонений и коэффициентом детерминации. Данные выводы дают возможность уменьшить количество ложных срабатываний СММК с последующей оценкой текущего состояния мостового сооружения. Однако для этого необходимо проанализировать все случаи нештатных ситуаций за весь период эксплуатации мостового сооружения.

Заключение

1. Авторами предложен структурный подход к оценке работоспособности системы мониторинга инженерных конструкций вантового моста через Петровский канал в створе

автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в городе Санкт-Петербурге, включающий три этапа: I этап — предварительный анализ; II этап — выборочный анализ; III этап — детальный анализ.

2. На II этапе проведена проверка нулевой гипотезы о распределении случайных величин ускорений колебаний пилона по стандартному нормальному закону распределения. По результатам проверки гипотеза была отклонена.

3. Авторами было предложено использовать коэффициент детерминации и сумму квадратов отклонений для подбора нормального закона распределения. По результатам сделан строгий вывод, что в большей степени случайные величины ускорений колебаний распределены по нормальному закону распределения, а все нештатные ситуации можно распределить на 3 группы: отклик, выброс, сбой.

4. Для перехода на III этап необходимо удостовериться в полученных выводах и проанализировать все нештатные ситуации за весь период эксплуатации вантового моста.

5. Полученные выводы дают возможность уменьшить количество ложных срабатываний и оценить текущее состояние вантового моста. Для этого авторами разработана методика оценки работоспособности СММК.

Библиографический список

1. Особенности системы мониторинга вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге / А. А. Махонько [и др.] // Путьевой навигатор. 2023. № 56 (82). С. 68–77. EDN JEYBWL.
2. Опыт эксплуатации системы мониторинга вантового моста через Петровский канал в створе автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» в Санкт-Петербурге / А. А. Махонько [и др.] // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9, № 2. С. 83–96. DOI: 10.17816/transsyst20239283-96. EDN NUIUJE.
3. Лазарев Ю. Г., Ермошин Н. А., Сенцов И. В. Планирование развития дорожной сети с учетом принципов многокритериальной оптимизации // Путьевой навигатор. 2019. № 38 (64). С. 24–31.
4. Интегральный мониторинг моста Александра Невского / А. А. Белый [и др.] // Путьевой навигатор. 2020. № 45 (71). С. 38–45. EDN ZDBIAB.
5. Яшнов А. Н., Баранов Т. М. Некоторые результаты работы системы динамического мониторинга Академического моста через реку Ангару в Иркутске // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1 (60). С. 199–209.
6. Карапетов Э. С., Белый А. А. Мониторинг мостовых сооружений Санкт-Петербурга. История. Назначение. Примеры. Перспективы // Вестник «Зодчий. XXI век». 2008. № 4 (29). С. 80–83.
7. Geoffrey R. Thomas, Akbar A. Khatibi. Durability of structural health monitoring systems under impact loading // Procedia Engineering, 2017. № 188. P. 340–347.
8. Yang Y., Li Q. S., Yan B. W. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China // Advances in Mechanical Engineering, 2017. Vol. 9 (1). P. 1–10. DOI: 10.1177/1687814016684272.
9. Mosbeh R. Kaloop, Jong Wan Hu. Dynamic Performance Analysis of the Towers of a Long-Span Bridge Based on GPS Monitoring Technique // Journal of Sensors Volume 2016 (2016). Article ID 7494817. P. 14. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7494817>.
10. Lienhart W., Ehrhart M. State of the art of geodetic bridge monitoring. Structural Health Monitoring 2015: System Reliability for Verification and Implementation // Proceedings of the 10th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM), 2015. DOI: 10.12783/SHM2015/58.
11. Li J, Hao H. Damage detection of shear connectors under moving loads with relative

displacement measurements // *Mech Syst Signal PR*, 2015. P. 60–61, 124–150.

12. Rucker W., Hille F., Rohrmann R. Guideline for structural health monitoring. Final report // SAMCO, Berlin, 2006. 63 p.

13. Sumitro S., Wang M. L. Structural Health Monitoring System Applications in Japan. In: Ansari F. (eds) *Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring* // Springer, Dordrecht, 2005. P. 495–504. URL: https://doi.org/10.1007/1-4020-3661-2_49.

Дата поступления: 01.06.2024

Решение о публикации: 29.07.2024

Контактная информация:

МАХОНЬКО Андрей Андреевич — начальник отдела дорожного надзора; andrey.makhonko@nch-spb.ru

ЛАЗАРЕВ Юрий Георгиевич — докт. техн. наук, профессор; lazarev_yug@spbstu.ru

АНТОНЮК Анатолий Анатольевич — инженер; aaa.12.03.1992@mail.ru

Structural approach to assessing the performance of the monitoring system of engineering structures of the cable-stayed bridge over the Petrovsky Canal in the construction of the western speed diameter highway in St. Petersburg. Part 2

A. A. Makhonko¹, Y. G. Lazarev², A. A. Antonyuk³

¹ Highway Operator Nord, LLC, per. Volynsky, 3A, lit. A, Saint Petersburg, 191186, Russia

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya, 29, lit. B, Saint Petersburg, 195251, Russia

³ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Makhonko A. A., Lazarev Y. G., Antonyuk A. A. Structural approach to assessing the performance of the monitoring system of engineering structures of the cable-stayed bridge over the Petrovsky Canal in the construction of the western speed diameter highway in St. Petersburg. Part 2 // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 585–597. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-585-597*

Abstract

Purpose: assessing the performance of the monitoring system for engineering structures and assessing the current state of the structures of the cable-stayed bridge across the Petrovsky Canal in the alignment of the Western High-Speed Diameter highway in the city of St. Petersburg due to the occurrence of emergency situations in which accelerometers on the pylons record values exceeding the limit. **Methods:** statistical data from the databases of the existing system of monitoring engineering structures is used to obtain the results. The tasks, set within the framework of the study, are accomplished by applying the theoretical methods of scientific knowledge: the analytical method, the mathematical statistics theory, induction. **Results:** the resulting structural approach to assessing the performance of the monitoring system for engineering structures on cable-stayed bridges makes it possible to reduce the number of false alarms of the system and assess the current state of the bridge structure. Within the framework of the III stage of the structural approach, it is proposed to develop a methodology for assessing the performance of the monitoring system for engineering structures with subsequent assessment of the current state of cable-stayed bridge structures. **Practical significance:** the results of the work are important for construction as they expand the understanding of the features of the mechanism of soil freezing.

Keywords: structural artificial monitoring, technical condition management, transport infrastructure object, cable-stayed bridge, stressed-deformed condition, accelerometer, vibration monitoring

References

1. Osobennosti sistemy monitoringa vantovogo mosta cherez Petrovskij kanal v stvore avtomobil'noj dorogi "Zapadnyj skorostnoj diametr" v Sankt-Peterburge / A. A. Mahon'ko [i dr.] // Putevoj navigator. 2023. № 56 (82). S. 68–77. EDN JEYBWL. (In Russian)
2. Opyt ekspluatatsii sistemy monitoringa vantovogo mosta cherez Petrovskij kanal v stvore avtomobil'noj dorogi "Zapadnyj skorostnoj diametr" v Sankt-Peterburge / A. A. Mahon'ko [i dr.] // Innovacionnye transportnye sistemy i tekhnologii. 2023. T. 9, № 2. S. 83–96. DOI: 10.17816/transsyst20239283-96. EDN NUIUJE. (In Russian)
3. Lazarev Yu. G., Ermoshin N. A., Sencov I. V. Planirovanie razvitiya dorozhnoj seti s uchetom principov mnogokriterial'noj optimizatsii // Putevoj navigator. 2019. № 38 (64). S. 24–31. (In Russian)
4. Integral'nyj monitoring mosta Aleksandra Nevskogo / A. A. Belyj [i dr.] // Putevoj navigator. 2020. № 45 (71). S. 38–45. EDN ZDBIAB. (In Russian)
5. Yashnov A. N., Baranov T. M. Nekotorye rezul'taty raboty sistemy dinamicheskogo monitoringa akademicheskogo mosta cherez reku Angaru v Irkutske // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2017. № 1 (60). S. 199–209. (In Russian)
6. Karapetov E. S., Belyj A. A. Monitoring mostovyh sooruzhenij Sankt-Peterburga. Istoriya. Naznachenie. Primery. Perspektivy // Vestnik "Zodchij. XXI vek". 2008. № 4 (29). S. 80–83. (In Russian)
7. Geoffrey R. Thomas, Akbar A. Khatibi. Durability of structural health monitoring systems under impact loading // Procedia Engineering, 2017. № 188. P. 340–347.
8. Yang Y., Li Q. S., Yan B. W. Specifications and applications of the technical code for monitoring of building and bridge structures in China // Advances in Mechanical Engineering, 2017. Vol. 9 (1). P. 1–10. DOI: 10.1177/1687814016684272.
9. Mosbeh R. Kaloop, Jong Wan Hu. Dynamic Performance Analysis of the Towers of a Long-Span Bridge Based on GPS Monitoring Technique // Journal of Sensors Volume 2016 (2016). Article ID 7494817. P. 14. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7494817>.
10. Lienhart W., Ehrhart M. State of the art of geodetic bridge monitoring. Structural Health Monitoring 2015: System Reliability for Verification and Implementation // Proceedings of the 10th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM), 2015. DOI: 10.12783/SHM2015/58.
11. Li J, Hao H. Damage detection of shear connectors under moving loads with relative displacement measurements // Mech Syst Signal PR, 2015. P. 60–61, 124–150.
12. Rucker W., Hille F., Rohrmann R. Guideline for structural health monitoring. Final report // SAMCO, Berlin, 2006. 63 p.
13. Sumitro S., Wang M. L. Structural Health Monitoring System Applications in Japan. In: Ansari F. (eds) Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring // Springer, Dordrecht, 2005. P. 495–504. URL: https://doi.org/10.1007/1-4020-3661-2_49.

Received: 01.06.2024

Accepted: 29.07.2024

Author's information:

Andrey A. MAKHONKO — Head of construction supervision department; andrey.makhonko@nch-spb.ru

Yurij G. LAZAREV — PhD in Engineering, Professor; lazarev_yug@spbstu.ru

Anatoly A. ANTONYUK — Engineer; aaa.12.03.1992@mail.ru

УДК 629.4.027.3

Анализ применения гидравлических гасителей колебаний в конструкциях рессорного подвешивания подвижного состава железнодорожного транспорта

С. В. Трескин¹, Е. Ю. Дульский¹, В. А. Кручек², П. Ю. Иванов¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, 664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15

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

Для цитирования: Трескин С. В., Дульский Е. Ю., Кручек В. А., Иванов П. Ю. Анализ применения гидравлических гасителей колебаний в конструкциях рессорного подвешивания подвижного состава железнодорожного транспорта // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 598–608. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-598-608

Аннотация

Цель: рассмотрение вопроса применения гидравлических гасителей колебаний в рессорном подвешивании различных видов подвижного состава железнодорожного транспорта. В статье проведен обзор схем расположения гидравлических гасителей колебаний в рессорном подвешивании подвижного состава, приведены их достоинства и недостатки. **Методы:** обзор и анализ конструкций рессорного подвешивания различных типов тягового и нетягового подвижного состава, находящихся в эксплуатации, а также запатентованных конструкций. Анализ схем расположения гидравлических гасителей колебаний в рессорном подвешивании подвижного состава. **Результаты:** основной причиной применения гидравлических гасителей в рессорном подвешивании является неспособность цилиндрических пружин минимизировать влияние колебательных движений подвижного состава, возникающих при его движении. Обоснована необходимость применения гидравлических гасителей колебаний в конструкциях различных видов подвижного состава. Рассмотрены схемы расположения гидравлических гасителей колебаний. Приведены примеры использования гидрогасителей в рессорном подвешивании различных видов подвижного состава. **Практическая значимость:** показана необходимость применения гидравлических гасителей колебаний не только в конструкциях ходовой части пассажирских вагонов и локомотивов, но и в рессорном подвешивании грузовых вагонов. Применение гидравлических гасителей колебаний позволяет минимизировать негативное влияние колебательных движений как на конструкцию подвижного состава, так и на состояние здоровья пассажиров и локомотивных бригад, а также повысить комфорт их пребывания. Использование же гидрогасителей в рессорном подвешивании грузового подвижного состава может позволить повысить скорость его движения путем повышения ходовых качеств грузовых вагонов и степени сохранности перевозимых грузов.

Ключевые слова: подвижной состав, локомотив, электровоз, тепловоз, пассажирский вагон, фитинговая платформа, рессорное подвешивание, колебательное движение, гидравлический гаситель, гидродемпфер

Введение

Гидравлические гасители колебаний появились в конструкции рессорного подвешивания подвижного состава в 50-х годах прошлого века. Принцип их работы заключается в гашении колебаний с помощью силы вязкого трения, образующейся при прохождении рабочей жидкости через калиброванные отверстия [1].

Огромный вклад в разработку этих устройств внесли ученые ЛИИЖТ (нынешний ПГУПС): Челноков И.И., Левит Г.М., Варава В.И., Соколов М.М., Бороненко Ю.П. и многие другие. Существенный вклад внесли и представители других научных организаций.

Первоначально гидрогасители нашли свое применение в рессорном подвешивании тележек пассажирских вагонов. Необходимость применения указанных устройств была вызвана стремлением повысить скорость движения и обеспечить комфортную плавность хода. Применяемые на том этапе развития механической части подвижного состава в рессорном подвешивании цилиндрические пружины сжатия и листовые рессоры не отвечали новым требованиям в достаточной мере.

В результате в 1956 году Калининским вагоностроительным заводом была выпущена тележка, оснащенная гидравлическими гасителями колебаний как в буксовой, так и в центральной ступени подвешивания [2]. На рис. 1 представлен общий вид данной тележки.

Проведенные испытания данной тележки показали улучшение ходовых качеств по сравнению с конструкциями предыдущих тележек, например ЦМВ. Однако в ходе испытаний произошел отказ от гидрогасителей в буксовой ступени подвешивания в пользу фрикционных. Итогом проведенных работ стало появление тележки КВЗ-5, конструкция которой стала основой для тележек КВЗ (ТВЗ)-ЦНИИ различных модификаций.

В дальнейшем гидравлические гасители нашли применение в рессорном подвешивании локомотивов, вагонов метрополитена и трамвайных вагонов.

Схемы установки в рессорном подвешивании подвижного состава гидравлических гасителей колебаний

На сегодняшний день известны две системы расположения гидравлических гасителей

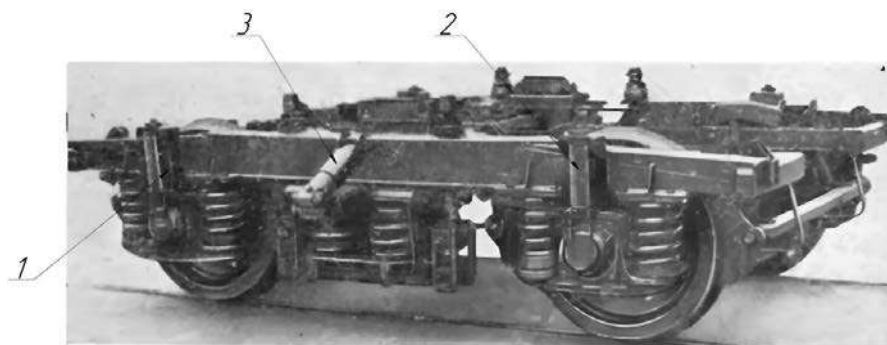


Рис. 1. Одна из первых тележек пассажирских вагонов, оснащенных гидравлическими гасителями колебаний: 1, 2 — гидравлические гасители колебаний в буксовой ступени подвешивания; 3 — гидравлический гаситель колебаний в центральной ступени подвешивания.

Источник: [2]

колебаний в рессорном подвешивании подвижного состава: совместного и раздельного гашения колебаний. В обоих случаях происходит главным образом гашение колебаний кузова единицы подвижного состава.

Суть системы совместного гашения колебаний заключается в установке гидrogасителей под определенным углом. Гидrogасители в условиях совместного гашения колебаний минимизируют влияние как вертикальных, так и горизонтальных колебаний. В системе совместного гашения угол наклона гидrogасителя может варьироваться от 45° до 55° . Однако данная схема нашла свое применение лишь в рессорном подвешивании подвижного состава, обращающимся со скоростями до 160 км/ч . Этой схеме расположения также присущ недостаток, который заключается в повышенном износе элементов гидrogасителя, приводящем к нарушению уплотнений и течи рабочей жидкости. Схема данной системы представлена на рис. 2.

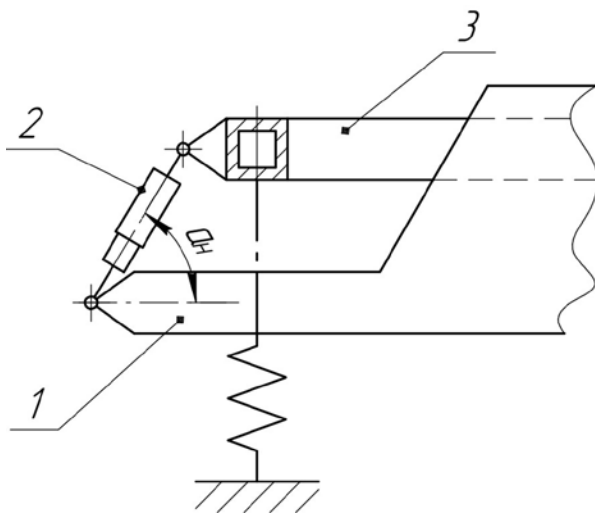


Рис. 2. Схема системы совместного гашения колебаний: 1 — надрессорная балка; 2 — гидравлический гаситель колебаний; 3 — рама тележки подвижного состава; α_n — угол установки гидrogасителя.

Источник: [3]

Для более скоростного подвижного состава применяется схема раздельного гашения колебаний, суть которой заключается в использовании гидrogасителей для гашения колебаний только одного вида. Происходит разделение гидродемпферов для гашения только вертикальных или горизонтальных колебаний. Преимуществом данной системы гашения колебаний является возможность обеспечения более высокого уровня плавности хода при движении со скоростями более 160 км/ч . Однако в последнее время данная схема применяется и в рессорном подвешивании менее скоростного подвижного состава, например, трамвайных вагонов, вагонов метрополитена. Схема системы раздельного гашения колебаний показана на рис. 3.

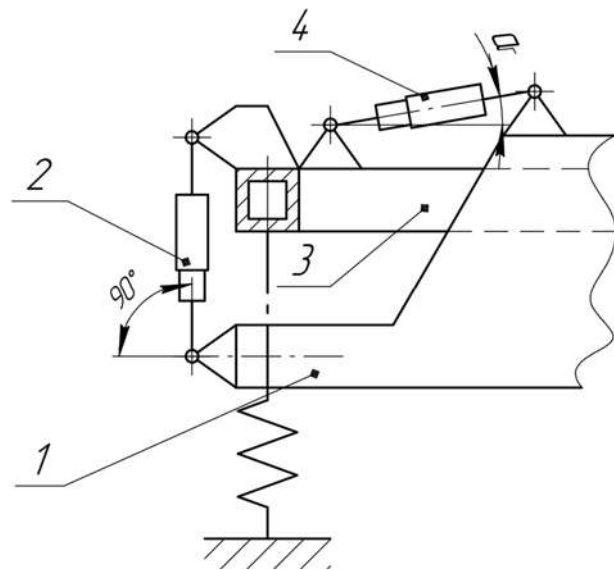


Рис. 3. Схема системы раздельного гашения колебаний: 1 — надрессорная балка; 2 — вертикальный гидравлический гаситель колебаний; 3 — рама тележки подвижного состава; 4 — горизонтальный гидравлический гаситель колебаний; α_g — угол установки горизонтального гидrogасителя.

Источник: [3]

Гидравлические гасители колебаний в рессорном подвешивании локомотивов

В рессорном подвешивании тягового подвижного состава используются телескопические гидравлические гасители колебаний одностороннего или двухстороннего действия. Конструктивное отличие между этими видами гидrogасителей заключается в том, что гидrogаситель одностороннего действия воспринимает нагрузки только на ходе сжатия, а гидrogаситель двухстороннего действия — на ходе сжатия и растяжения.

В [3] описывается, что в ходе эксплуатации гидrogасители одностороннего действия обладают более высоким уровнем надежности. В ходе испытаний гидrogасителей этого типа было обнаружено, что произошло снижение количества неисправностей резьбового соединения верхней проушины и штока. Но при равных усло-

виях эксплуатации оба типа гидrogасителей обеспечивают одинаковый уровень плавности хода. В рессорном подвешивании локомотивов гидrogасители могут быть установлены как в буксовой ступени подвешивания, так и в центральной (люлечной) ступени [4]. На рис. 4 показан пример использования гидrogасителей в первой ступени рессорного подвешивания локомотивов, а на рис. 5 — во второй ступени подвешивания.

Важной проблемой, которую можно решить путем применения гидrogасителей в рессорном подвешивании локомотивов, является снижение уровня вибрации, которому подвергаются локомотивные бригады в ходе движения поезда. Так, в [5] указывается, что постоянное превышение норм вибрации в кабине локомотива может привести к повышенной утомляемости машинистов. Данное явление может привести к увеличению ошибок в управлении локомотивом, что снижает безопасность движения.

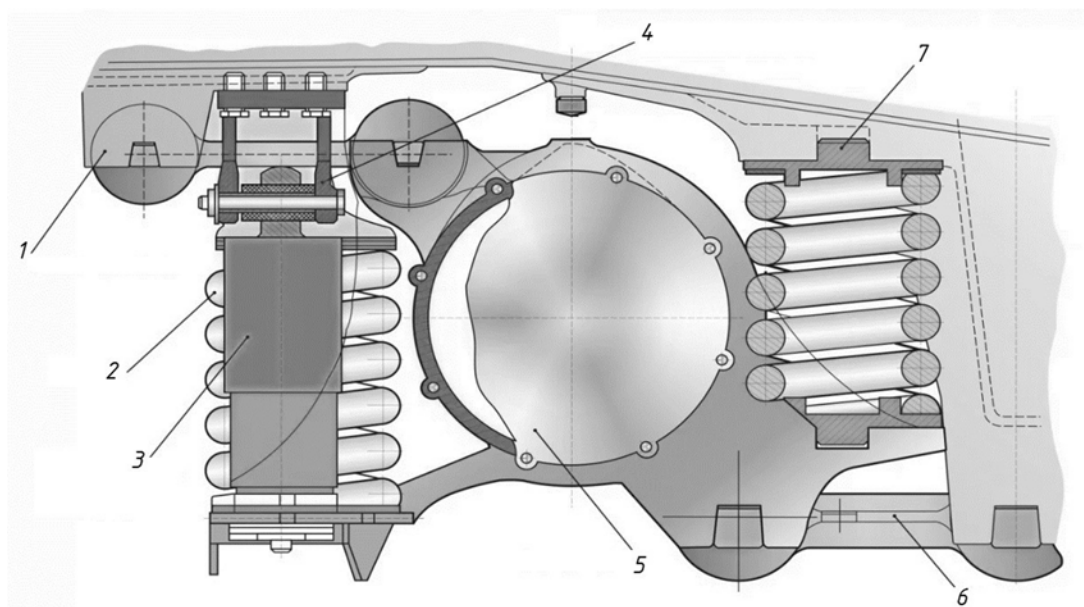


Рис. 4. Буксовая ступень подвешивания электровозов семейства ЭП1, Э5К, 2(3)ЭС5К «Ермак»:

- 1 — кронштейн рамы; 2 — цилиндрическая пружина сжатия;
 3 — телескопический гидrogаситель; 4 — кронштейн крепления гидrogасителя;
 5 — корпус буксы; 6 — поводок, 7 — упорная шайба

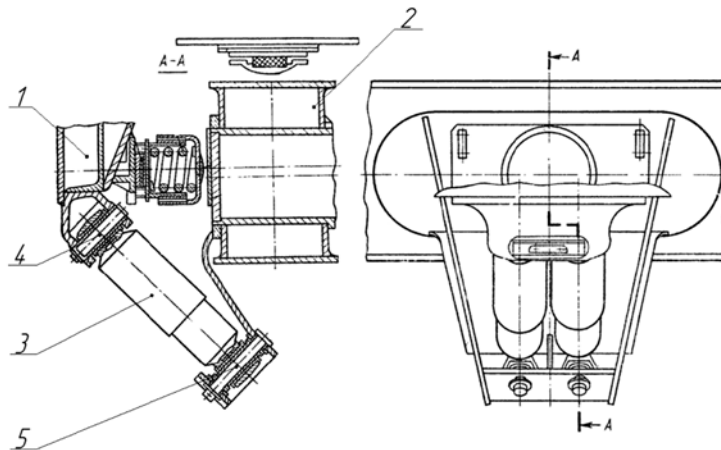


Рис. 5. Установка гидrogасителей во второй ступени подвешивания грузового электровоза ВЛ11: 1 — кузов электровоза; 2 — рама тележки; 3 — гидrogаситель; 4, 5 — места крепления гидrogасителей. Источник: Чиракадзе Г. И., Кикнадзе О. А. Электровоз ВЛ11. Руководство по эксплуатации. М.: Транспорт, 1983. 464 с.

Гидравлические гасители колебаний в рессорном подвешивании нетягового подвижного состава

Среди нетягового подвижного состава гидравлические гасители колебаний получили наибольшее распространение в конструкциях тележек пассажирских вагонов. В конструкции пассажирских вагонов важную роль играет такой показатель, как плавность хода. Оценка данного показателя происходит исходя из условий влияния колебательных движений вагона (амплитуда и частота колебаний) на организм человека. Однако различные частоты оказывают различное влия-

ние на пассажиров в салоне вагона. В [6] указывается, что особенно неблагоприятной для организма человека является величина частот колебаний, находящихся в пределах от 4 до 6 Гц. Поэтому применение гидравлических гасителей колебаний в рессорном подвешивании пассажирских вагонов является особенно важным.

В тележках пассажирских вагонов моделей КВЗ-ЦНИИ (1-й и 2-й вариант), а также ее модернизированного варианта ТВЗ-ЦНИИ-М (рис. 6) гидrogасители применяются в центральной (люлочной) ступени рессорного подвешивания.

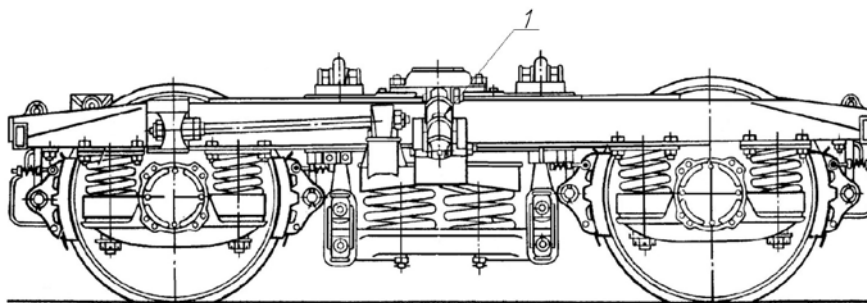


Рис. 6. Тележка пассажирского вагона модели ТВЗ-ЦНИИ-М: 1 — место установки гидrogасителя в люлочном подвешивании

Также в безлюлечных тележках пассажирских вагонов производства ОАО «ТВЗ» моделей 68-4075, 68-4076 гидrogасители устанавливаются в обеих ступенях рессорного подвешивания, так как эти модели тележек могут эксплуатироваться с конструкционной скоростью до 200 км/ч. При движении единицы подвижного состава с подобными скоростями неровности пути оказывают значительное влияние на уровень колебаний ее конструкции.

Гидравлические гасители колебаний постепенно находят свое применение в конструкции тележек грузовых вагонов. Трехэлементные тележки грузовых вагонов с фрикционными гасителями колебаний на сегодняшний день не в полной мере отвечают новым требованиям, например, для осуществления грузовых перевозок со скоростями до 140 км/ч. На данный момент времени максимальная скорость движения грузовых поездов ограничена 90 км/ч [7]. Причинами этого ограничения являются низкие ходовые параметры эксплуатируемых грузовых вагонов, особенно при высокой скорости движения и в порожнем состоянии, а также несовершенство тормозных систем. Существует необходимость повышения конкурентоспособности грузовых железнодорожных перевозок [8].

Проанализировав некоторые научные работы, можно сделать вывод о том, что существует направление совершенствования рессорного подвешивания стандартных трехэлементных тележек путем применения гидравлических гасителей колебаний. Применение гидrogасителей вместо фрикционных гасителей позволит избавиться от некоторых перечисленных выше недостатков, прежде всего относящихся к гасителям сухого трения.

Так, в [9] представлена конструкция платформы, ходовая часть которой представлена двумя трехэлементными тележками. Конструкция данной тележки представлена на рис. 7.

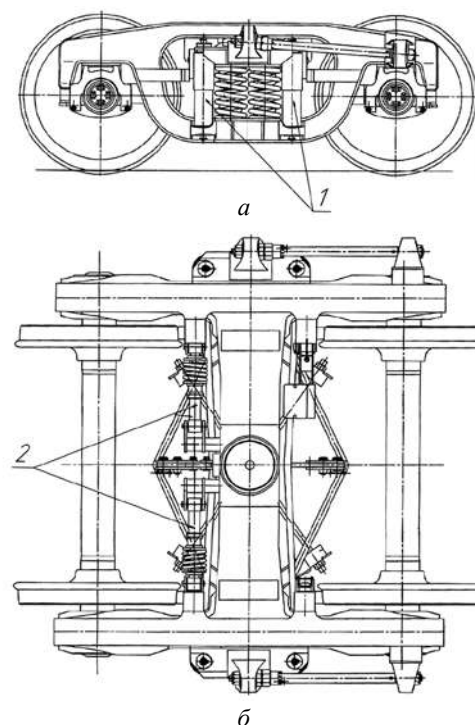


Рис. 7. Трехэлементная тележка железнодорожной платформы: *а* — вид сбоку; 1 — вертикальные гидrogасители; *б* — вид сверху; 2 — горизонтальные гидrogасители.

Источник: [9]

Гашение колебаний обеспечивается гидравлическими гасителями колебаний в рессорном подвешивании данной тележки и происходит отдельно в вертикальном и горизонтальном направлениях. Благодаря этому происходит минимизация воздействия динамических усилий на конструкцию вагона и груз, перевозимый им.

Известны и другие подобные конструкции трехэлементных тележек [10–11].

Применение в рессорном подвешивании гидравлических гасителей колебаний позволит обеспечить процесс гашения колебаний при скоростях движения до 140 км/ч. Обеспечение скоростных грузовых железнодорожных перевозок на сегодняшний день является одним из актуальных направлений развития железнодорожного транспорта в России [12].

Для решения данной задачи предлагаются различные конструкции скоростных фитинговых платформ и тележек, предназначенных для них и разработанных по типу тележек для пассажирских вагонов. На сегодняшний день известно несколько типов скоростных фитинговых платформ, в рессорном подвешивании которых применяются гидравлические гасители колебаний. Так, в серийное производство поступила платформа модели 13-6704 (рис. 8) [13].



Рис. 8. Фитинговая платформа модели 13-6704.
Источник: [13]

Данная платформа была спроектирована в ВНИКТИ (Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава). В качестве ходовой части применяются две трехосные тележки модели 18-6731. В буксовой ступени рессорного подвешивания каждой тележки применяются гидравлические гасители колебаний в количестве шести штук.

Другим представителем скоростных фитинговых платформ является платформа ООО «Комплексные скоростные технологии» модели 13-6954 с тележками 19-6980.

Максимальная скорость разработанной платформы может составлять до 160 км/ч. Тележки, применяемые в конструкции данной фитинговой платформы, являются аналогами тележек немоторных вагонов электропоездов ЭД4 и ЭД9. В центральной ступени подвешивания данных

тележек используются гидравлические гасители колебаний.

Предлагаются и другие конструкции тележек для скоростных грузовых вагонов. Так, в [14] предложена конструкция тележки скоростного грузового вагона модели 18-6981. Ее прототипом послужила тележка для пассажирского вагона. Конструктивной особенностью данной тележки стало применение гидрогасителей в буксовой ступени рессорного подвешивания.

Активные работы, направленные на внедрение в эксплуатацию скоростного грузового подвижного состава, обусловлены прежде всего ускорением времени доставки высокодоходных грузов. Для обеспечения необходимого уровня плавности хода, а также минимизации вибрационных и ударных нагрузок необходимо применение гидравлических гасителей колебаний в рессорном подвешивании рассматриваемых моделей платформ. Применение данных устройств является одним из необходимых условий обеспечения сохранности перевозимых грузов.

Следует отметить, что гидравлические гасители колебаний широко представлены в рессорном подвешивании таких видов рельсового транспорта, как подвижной состав метрополитена и трамвайные вагоны [15].

В тележках указанных видов рельсового транспорта гидравлические гасители колебаний также применяются в различных ступенях рессорного подвешивания. Например, в [16] предлагается конструкция двухосной тележки вагона метрополитена, в рессорном подвешивании которой размещается система гидравлических гасителей колебаний.

Применение системы гидравлических гасителей колебаний обусловлено необходимостью устранения или минимизации амплитуды вертикальных и горизонтальных колебаний вагона метро.

Известны и другие подобные конструкции тележек трамваев и вагонов метро [17–18].

Заключение

По результатам проведенной работы можно сделать вывод, что гидравлические гасители колебаний, их правильный выбор и стабильное функционирование во многом влияют на технические характеристики подвижного состава и тем самым на ходовые качества подвижного состава и в целом на безопасность движения. Применение рессорного подвешивания без гидrogасителей приведет к тому, что единица подвижного состава будет совершать долго незатухающие колебательные движения. При движении вагона с критической скоростью гидравлический гаситель колебаний обеспечивает силу сопротивления для обеспечения устойчивого режима гашения колебаний при резонансном режиме. Поэтому на сегодняшний день гидравлические гасители колебаний широко применяются в рессорном подвешивании как локомотивов, так и пассажирских вагонов, а в последнее время в грузовых вагонах (фитинговых платформах).

Библиографический список

1. Соколов М. М., Варава В. И., Левит Г. М. Гасители колебаний подвижного состава. Справочник. М.: Транспорт, 1985. 216 с.
2. Морозов И. А. Тележки пассажирских вагонов отечественного производства. М.: Машгиз, 1960. 183 с.
3. Челноков И. И. Гидравлические гасители колебаний пассажирских вагонов. М.: Транспорт, 1975. 72 с.
4. Механическая часть тягового подвижного состава / И. В. Бирюков [и др.]; под ред. И. В. Бирюкова. М.: Транспорт, 1992. 439 с.
5. Повышение уровня профессиональной подготовки машинистов и диспетчеров с учетом аспекта опережающего поведения и психологической структуры деятельности / В. Г. Козубенко [и др.] // Труды III научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». М.: МИИТ, 2002. С. 16–19.
6. Волков А. М. Физиолого-гигиеническое обоснование нормирования вибраций подвижного состава железнодорожного транспорта // Гигиена и санитария. 1961. № 2. С. 23–28 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziologo-gigienicheskoe-obosnovanie-normirovaniya-vibratsiy-podvizhnogo-sostava-zheleznodorozhnogo-transporta> (дата обращения: 08.04.2024).
7. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года, утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 19.03.2019 № 466-р [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAga2RXSVoKu.pdf> (дата обращения: 08.04.2024).
8. Нормы допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм, утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 8.11.2016 № 2240р (ред. от 23.08.2018) [Электронный ресурс]. URL: <https://itt-54.ru/wp-content/uploads/2023/12/Нормы-скоростей-движения-подвижного-состава-по-жд-путям-колеи-15201524мм-ОАО-РЖД-№2240р-от-18.11.2016-г.pdf> (дата обращения: 09.04.2024).
9. Скоростная железнодорожная платформа на трехэлементных тележках: патент на полезную модель № 95298 U1 Рос. Федерация, МПК В61D 3/08. № 2010103724/22 / И. В. Козлов [и др.]; заявл. 04.02.2010, опубл. 27.06.2010. Заявитель: открытое акционерное общество «Российские железные дороги».
10. Тележка грузового вагона: патент на полезную модель № 155735 U1 Рос. Федерация, МПК В61F 3/08, В61F 5/02, В61F 5/50. № 2015109323/11 / Ю. П. Бороненко [и др.]; заявл. 17.03.2015, опубл. 20.10.2015. Заявитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

11. Ходовая железнодорожная тележка: патент на полезную модель № 29018 U1 Рос. Федерация, МПК В61F 3/02, В61F 5/10. № 2003100908/20 / А. П. Зыков [и др.]; заявл. 20.01.2003, опубл. 27.04.2003. Заявитель: ЗАО «Техиндустрия СКР».

12. Умные опции для скоростной инновационной платформы / Ю. П. Бороненко [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2021. № 3. С. 44–49.

13. Холдинг «СТМ» презентовал опытный образец скоростной фитинговой платформы // Вагоны и вагонное хозяйство. 2021. № 3 (67). С. 36–37.

14. К вопросу выбора вертикальных и горизонтальных связей в тележке для грузовых вагонов скоростных поездов / Г. И. Гаджиметов [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2020. Т. 79, № 6. С. 351–359.

15. Пономарев А. А., Иеропольский Б. К. Подвижной состав и сооружения городского электротранспорта: учеб. для техникумов городского электротранспорта. М.: Транспорт. 1986. 274 с.

16. Двухосная тележка вагона метрополитена: патент № 2508934 С1 Рос. Федерация, МПК В01F 3/04. № 2012134680/11 / А. А. Андреев [и др.]; заявл. 14.08.2012, опубл. 10.03.2014. Заявитель: открытое акционерное общество «Метровагонмаш».

17. Моторная тележка железнодорожного транспортного средства: патент № 2558420 С1 Рос. Федерация, МПК В61F 3/04, В61С 9/50, В61F 5/14. № 2014110259/11 / А. Ю. Колесин [и др.]; заявл. 19.03.2014, опубл. 10.08.2015. Заявитель: открытое акционерное общество «Метровагонмаш».

18. Трамвайная тележка для вагонов с пониженным уровнем пола: патент на полезную модель № 220051 U1 Рос. Федерация, МПК В61F 3/04, В61С 9/50, В61Н 7/08. № 2023105948 / К. С. Караев; заявл. 14.03.2023, опубл. 22.08.2023. Заявитель: акционерное общество «Усть-Катавский вагоностроительный завод».

Дата поступления: 26.05.2024

Решение о публикации: 16.07.2024

Контактная информация:

ТРЕСКИН Сергей Викторович — аспирант;

sergei.tresckin@yandex.ru

ДУЛЬСКИЙ Евгений Юрьевич — докт. техн. наук,

доцент; e.dulskiy@mail.ru

КРУЧЕК Виктор Александрович — докт. техн.

наук, профессор; victor.kruchek@yandex.ru

ИВАНОВ Павел Юрьевич — канд. техн. наук, до-

цент; savl.ivanov@mail.ru

Analysis of the use of hydraulic vibration dampers in spring suspension structures of railway rolling stock

S. V. Treskin¹, E. Yu. Dul'skij¹, V. A. Kruchek², P. Yu. Ivanov¹

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

² Irkutsk State University Transport, 15, Chernyshevsky str., Irkutsk, 664074, Russia

For citation: Treskin S. V., Dul'skij E. Yu., Kruchek V. A., Ivanov P. Yu. Analysis of the use of hydraulic vibration dampers in spring suspension structures of railway rolling stock // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 598–608. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-598-608

Abstract

Purpose: consideration of the issue of the use of hydraulic vibration dampers in spring suspension of various types of railway rolling stock. The article provides an overview of the layout of hydraulic vibration dampers in the spring suspension of rolling stock, their advantages and disadvantages are given. **Methods:** review and analysis of spring suspension designs of various types of traction and non-traction rolling stock in operation, as well as patented designs. Analysis of the arrangement schemes of hydraulic vibration dampers in the spring suspension of rolling stock. **Results:** the main reason for the use of hydraulic dampers in spring suspension is the inability of cylindrical springs to minimize the influence of oscillatory movements of rolling stock that occur during its movement. The necessity of using hydraulic vibration dampers in structures of various types of rolling stock is substantiated. The arrangement schemes of hydraulic vibration dampers are considered. Examples of the use of hydraulic dampers in spring suspension of various types of rolling stock are given. **Practical significance:** the necessity of using hydraulic vibration dampers is shown not only in the structures of the undercarriage of passenger cars and locomotives, but also in the spring suspension of freight cars. The use of hydraulic vibration dampers makes it possible to minimize the negative impact of oscillatory movements on both the structure of the rolling stock and the health of passengers and locomotive crews, as well as to increase the comfort of their stay. The use of hydraulic dampers in the spring suspension of freight rolling stock can increase the speed of its movement by improving the running qualities of freight cars and the degree of safety of transported goods.

Keywords: rolling stock, locomotive, electric locomotive, diesel locomotive, passenger car, fitting platform, spring suspension, oscillating motion, hydraulic damper, hydraulic damper

References

1. Sokolov M. M., Varava V. I., Levit G. M. Gasiteli kolebanij podvizhnogo sostava. Spravochnik. M.: Transport, 1985. 216 c. (In Russian)
2. Morozov I. A. Telezhki passazhirskih vagonov otechestvennogo proizvodstva. M.: Mashgiz, 1960. 183 c. (In Russian)
3. Chelnokov I. I. Gidravlicheskie gasiteli kolebanij passazhirskih vagonov. M.: Transport, 1975. 72 s. (In Russian)
4. Mekhanicheskaya chast' tyagovogo podvizhnogo sostava / I. V. Biryukov [i dr.]; pod red. I. V. Biryukova. M.: Transport, 1992. 439 s. (In Russian)
5. Povyshenie urovnya professional'noj podgotovki mashinistov i dispetcherov s uchetom aspekta operezhayushchego povedeniya i psihologicheskoy struktury deyatel'nosti / V. G. Kozubenko [i dr.] // Trudy III nauchno-prakticheskoy konferencii "Bezopasnost' dvizheniya poezdov". M.: MIIT, 2002. S. 16–19. (In Russian)
6. Volkov A. M. Fiziologo-gigienicheskoe obosnovanie normirovaniya vibracij podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta // Gigiena i sanitariya. 1961. № 2. S. 23–28 [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziologo-gigienicheskoe-obosnovanie-normirovaniya-vibratsiy-podvizhnogo-sostava-zheleznodorozhnogo-transporta> (data obrashcheniya: 08.04.2024). (In Russian)
7. Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo akcionernogo obshchestva "Rossijskie zheleznye dorogi" do 2025 goda, utv. Rasporyazheniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 19.03.2019 № 466-r [Elektronnyj resurs]. URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAgA2RXSVoKu.pdf> (data obrashcheniya: 08.04.2024). (In Russian)
8. Normy dopuskaemyh skorostej dvizheniya podvizhnogo sostava po zheleznodorozhnym putyam kolei 1520 (1524) mm, utv. Rasporyazheniem OAO "RZHD" ot 8.11.2016 № 2240r (red. ot 23.08.2018) [Elektronnyj resurs]. URL: <https://itt-54.ru/wp-content/uploads/2023/12/Normy-skorostej-dvizheniya-podvizhnogo-sostava-po-zhd-putyam-kolei-15201524mm-OAO-RZHD-№2240r-ot-18.11.2016-g.pdf> (data obrashcheniya: 09.04.2024). (In Russian)

9. Skorostnaya zhelezodorozhnaya platforma na trekhelementnyh telezhkah: patent na poleznuyu model' № 95298 U1 Ros. Federaciya, MPK B61D 3/08. № 2010103724/22 / Kozlov I. V. [i dr.]; zayavl. 04.02.2010, opubl. 27.06.2010. Zayavitel': otkrytoe akcionernoe obshchestvo "Rossijskie zheleznye dorogi". (In Russian)
10. Telezhka gruzovogo vagona: patent na poleznuyu model' № 155735 U1 Ros. Federaciya, MPK B61F 3/08, B61F 5/02, B61F 5/50. № 2015109323/11 / Yu. P. Boronenko [i dr.]; zayavl. 17.03.2015, opubl. 20.10.2015. Zayavitel': federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya "Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I". (In Russian)
11. Hodovaya zhelezodorozhnaya telezhka: patent na poleznuyu model' № 29018 U1 Ros. Federaciya, MPK B61F 3/02, B61F 5/10. № 2003100908/20 / A. P. Zykov [i dr.]; zayavl. 20.01.2003, opubl. 27.04.2003. Zayavitel': ZAO "Tekhindustriya SKR". (In Russian)
12. Umnye opcii dlya skorostnoj innovacionnoj platformy / Yu. P. Boronenko [i dr.] // Zheleznodorozhnyj transport. 2021. № 3. S. 44–49. (In Russian)
13. Holding "STM" prezentoval opytnyj obrazec skorostnoj fitingovoj platformy // Vagony i vagonnoe hozyajstvo. 2021. № 3 (67). S. 36–37. (In Russian)
14. K voprosu vybora vertikal'nyh i gorizontal'nyh svyazej v telezhke dlya gruzovyh vagonov skorostnyh poezdov / G. I. Gadzhimetov [i dr.] // Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. 2020. T. 79, № 6. S. 351–359. (In Russian)
15. Ponomarev A. A., Ieropol'skij B. K. Podvizhnoj sostav i sooruzheniya gorodskogo elektrotransporta: ucheb. dlya tekhnikumov gorodskogo elektrotransporta. M.: Transport. 1986. 274 s. (In Russian)
16. Dvuhosnaya telezhka vagona metropolitena: patent № 2508934 C1 Ros. Federaciya, MPK B01F 3/04. № 2012134680/11 // A. A. Andreev [i dr.]; zayavl. 14.08.2012, opubl. 10.03.2014. Zayavitel': otkrytoe akcionernoe obshchestvo "Metrovagonmash". (In Russian)
17. Motornaya telezhka zheleznodorozhnogo transportnogo sredstva: patent № 2558420 C1 Ros. Federaciya, MPK B61F 3/04, B61C 9/50, B61F 5/14. № 2014110259/11 / A. Yu. Kolesin [i dr.]; zayavl. 19.03.2014, opubl. 10.08.2015. Zayavitel': otkrytoe akcionernoe obshchestvo "Metrovagonmash". (In Russian)
18. Tramvajnaya telezhka dlya vagonov s ponizhennym urovnem pola: patent na poleznuyu model' № 220051 U1 Ros. Federaciya, MPK B61F 3/04, B61C 9/50, B61H 7/08. № 2023105948 / K. S. Karaev; zayavl. 14.03.2023, opubl. 22.08.2023. Zayavitel': akcionernoe obshchestvo "Ust'-Katavskij vagonostroitel'nyj zavod". (In Russian)

Received: 26.05.2024

Accepted: 16.07.2024

Author's information:

Sergej V. TRESKIN — Postgraduate Student;
sergei.tresckin@yandex.ru

Evgenij Yu. DUL'SKIJ — Dr. Sci. in Engineering,
Associate Professor; e.dulskiy@mail.ru

Viktor A. KRUCHEK — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; victor.kruchek@yandex.ru

Pavel Yu. IVANOV — PhD in Engineering, Associate Professor; savl.ivanov@mail.ru

УДК 624.042.12

Выдавливание замкового блока при строительстве транспортных тоннелей большого диаметра

В. Д. Константинов, А. Л. Новиков, А. А. Сокорнов

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

Для цитирования: Константинов В. Д., Новиков А. Л., Сокорнов А. А. Выдавливание замкового блока при строительстве транспортных тоннелей большого диаметра // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 609–621. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-609-621

Аннотация

Цель: рассмотреть проблему выдавливания замкового блока, возникающую при строительстве тоннелей метрополитена в Санкт-Петербурге с использованием сборных высокоточных железобетонных обделок повышенной водонепроницаемости диаметром 10,3 м. Проанализировать возможные процессы, приводящие к этому явлению, и методы решения проблемы в условиях строительства. Определить, к каким последствиям приводят применяемые на данный момент варианты решения проблемы. Разработать аналитическую методику определения величины силы трения, действующей по плоскостям радиальных стыков контактирующих блоков на базе классических методов строительной механики. Провести математическое моделирование процесса выдавливания методом конечных элементов и сравнить его результаты с полученными аналитически. Разработать рекомендации по ликвидации выдавливания блока, которые можно как применить в условиях строительства, так и учесть при проектировании конструкций обделок. Проанализировать эффективность предлагаемых рекомендаций. **Методы:** использовались натурные данные с построенных объектов, аналитические расчеты и математическое моделирование методом конечных элементов. **Результаты:** предложена аналитическая методика определения величины усилия выталкивания замкового блока и силы трения в радиальных стыках смежных и замкового блоков. Результаты математического моделирования показали высокую сходимость результатов, получаемых двумя методами. Разработаны рекомендации по устранению явления выдавливания, оценена их эффективность. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть использованы на этапе проектирования конструкций сборных железобетонных обделок повышенной водонепроницаемости для тоннелей большого диаметра, а также в условиях строительства в момент монтажа замкового и смежных блоков.

Ключевые слова: сборная высокоточная железобетонная обделка повышенной водонепроницаемости, замковый блок, тоннелепроходческие механизированные комплексы, тоннели большого диаметра, математическое моделирование, сила трения

Введение

При проектировании новых линий метрополитена на мелком заложении особенно перспективными являются решения, основанные на применении двухпутных тоннелей большого диаметра (более 10 м). Строительство подобных объектов сопряжено с рядом сложностей [1, 2].

Рассмотрим проблему, возникающую при монтаже колец обделки двухпутных перегонных тоннелей метрополитена в Санкт-Петербурге.

При проходке этих тоннелей наблюдается явление выдавливания замкового блока

из кольца в сторону щита на величину более 10 мм (рис. 1). Данный процесс влечет за собой ряд последствий, оказывающих негативное воздействие как на ведение строительно-монтажных работ, так и на дальнейшую эксплуатацию тоннеля.

Анализ причин возникновения проблемы

Важными этапами в поиске решения данной проблемы являются определение и анализ причин ее возникновения. Рассмотрим, какие в данной обделке предусмотрены типы связей (рис. 2):

– связи типа «гребень-паз» в кольцевых стыках, препятствующие смещению колец

относительно друг друга, представляют собой радиально расставленные с равным шагом трапецевидные выступы и углубления на торцевых поверхностях колец;

– цилиндрические шпонки из полихлорвинила, устанавливающиеся в радиальных стыках и препятствующие появлению клавишного эффекта, то есть они не дают блокам смещаться относительно друг друга внутри кольца в радиальном направлении;

– для предотвращения раскрытия стыков и удержания герметизирующих уплотнителей в упруго-сжатом состоянии используются связи растяжения в виде прямолинейных нарезных шпилек.

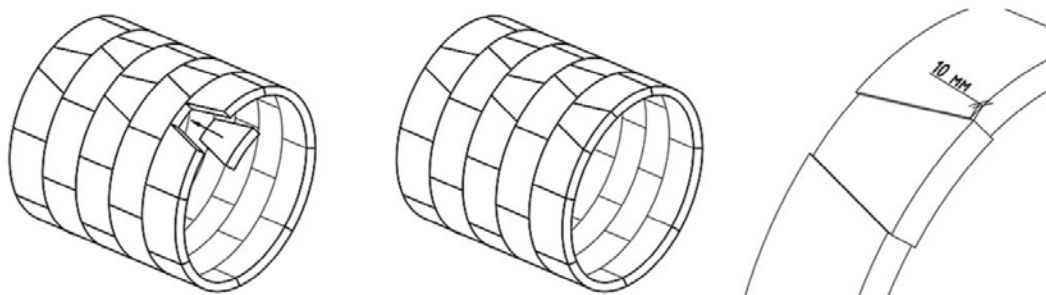


Рис. 1. Схема выдавливания замкового блока после окончания сборки кольца обделки

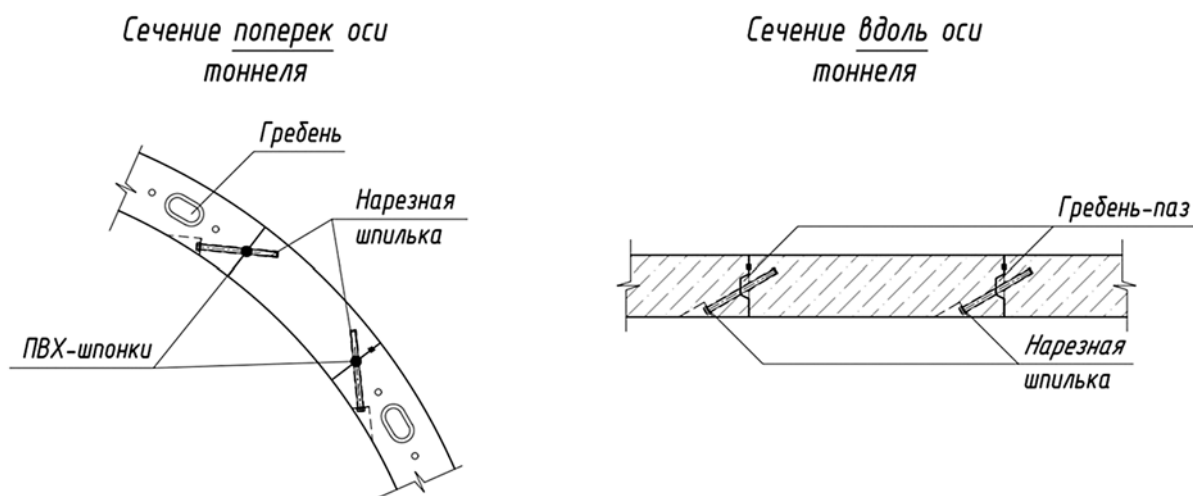


Рис. 2. Схемы расположения связей в стыках обделки

Учитывая это, можно заключить, что в конструкции обделки не предусматриваются связи, препятствующие движению замкового блока в продольном направлении.

Во время проходки при монтаже колец проблема выталкивания замкового блока решается различными способами.

Способ 1. Установка в радиальный стык арматурных стержней большого диаметра (36–40 мм) сразу после монтажа замкового блока (рис. 3). Такое решение позволяет существенно снизить величину выкалывания замка за счет заклинивания блока по торцам в местах установки арматурных стержней. Недостатком такого решения является возникновение значительных усилий в бетоне обделки вокруг стержней — концентрация напряжений (рис. 4), приводящих к сколам бетона и появлению сетки трещин в обделке, что негативно сказывается на дальнейшей эксплуатации, снижая долго-

вечность обделки (доступ воды через трещины к рабочей арматуре / ослабление сечения, снижение несущей способности).

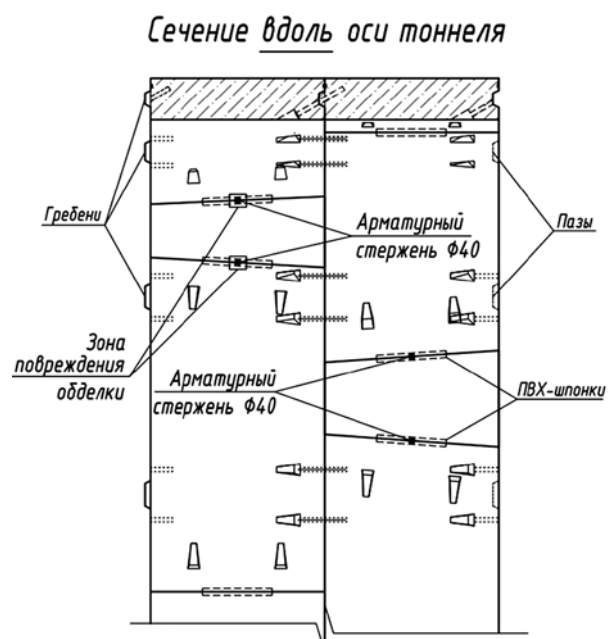


Рис. 3. Места установки арматурных стержней в радиальных стыках



Рис. 4. Разрушение бетона в местах концентрации напряжений в стыке

Способ 2. Заделка в тампонажные отверстия в замковом блоке и блоке предыдущего кольца арматурных анкеров с резьбой с установкой между ними струбины с винтовым домкратом, фиксирующей блок и компенсирующей усилия выталкивания (рис. 5). Такое решение позволяет уменьшить величину выскальзывания замкового блока. Однако его существенным недостатком является развитие продольных трещин как в блоке предыдущего кольца, так и в замковом блоке вновь монтируемого. Они возникают вследствие передачи выталкивающего усилия со струбины на заделанные в отверстия арматурные стержни и далее на бетон, который при этом дополнительно получает местные сминающие деформации, приводящие к сколам защитного слоя бетона (рис. 6). Более того, нередки случаи вырывания анкера при движении ключа, что влечет за собой значительное повышение травматизма (напряжение в струбине в момент срыва может быть близким к пределу прочности стали на растяжение, и процесс отрыва анкера струбины аналогичен разрыву напрягаемой арматуры).

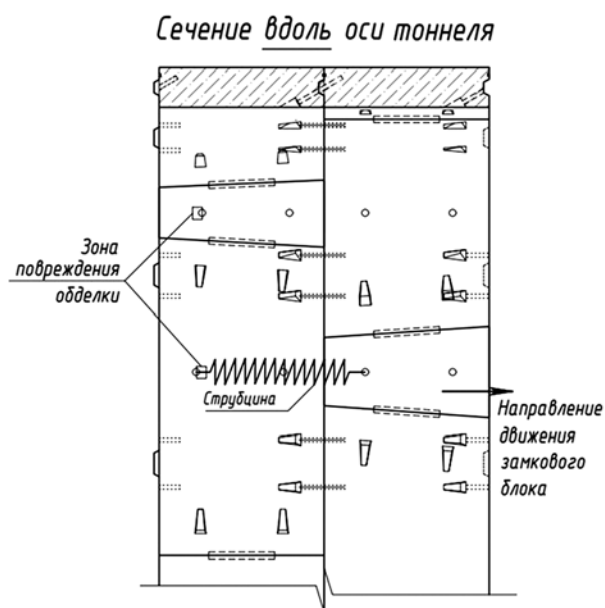


Рис. 5. Места установки струбины на блоках

Способ 3. Этот способ основан на задействовании блока соседнего, ранее смонтированного кольца и заключается в закручивании 4–6 болтов в оба блока и прикреплении к ним пластины, которая должна удерживать замковый блок в проектом положении. Минусы такого решения проблемы аналогичны предыдущим двум, а конкретно можно наблюдать образование трещин в обоих блоках (ключевом и соседнего кольца), сколы бетона обделки, возможность срыва пластины и отсутствие гарантированного удержания замка от выскальзывания (рис. 7).

Учитывая все это, можно сформулировать перечень последствий как самого выскальзывания, так и мероприятий по его устранению:

- выскальзывание замка приводит к необходимости задавливать его обратно, чтобы иметь возможность смонтировать следующее кольцо обделки (такое воздействие может повлечь образование трещин на блоке);
- если закрутить связи растяжения сразу после замыкания кольца, то в процессе движения ключа шпильки срежет и связь не будет выполнять свои функции (это в дальнейшем может привести к раскрытию стыка обделки и возникновению протечек воды через него);
- появление сколов защитного слоя бетона, развитие трещин, снижение несущей способности обделки (рис. 8).

Все это в совокупности свидетельствует, во-первых, о недостаточной проработке конструкции обделки на стадии проекта, во-вторых, об отсутствии эффективных мер по решению этой проблемы на стадии ведения строительно-монтажных работ.

Аналитический метод определения величины выталкивающей силы

Само выдавливание ключевого блока можно объяснить превышением сил трения, действующих в стыке по поверхностям торцов



Рис. 6. Вид струбцины и разрушение бетона в местах концентрации напряжений у тампонажного отверстия



Рис. 7. Сколы бетона в местах установки болтов фиксации пластины

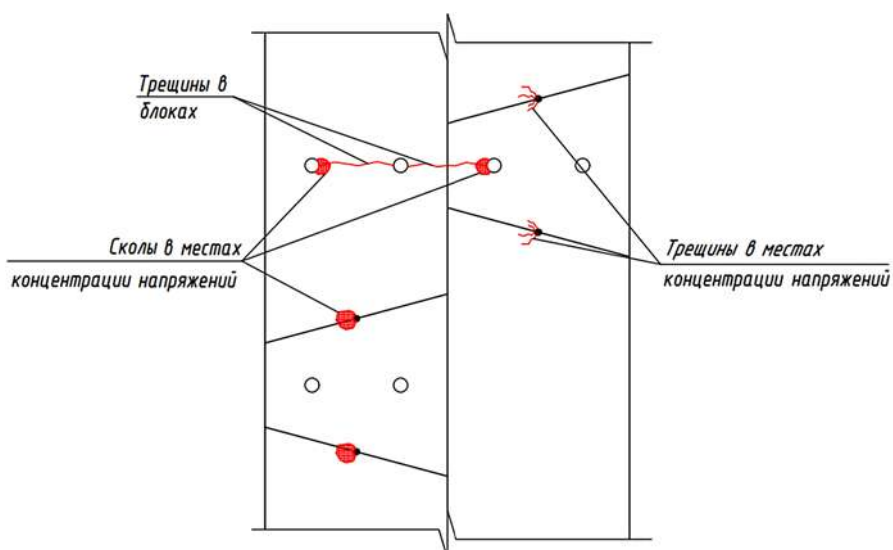


Рис. 8. Схема дефектов обделки тоннеля

смежных и замкового блоков, выталкивающим усилием. На практике на напряженно-деформированное состояние этих блоков оказывает влияние совокупность силовых воздействий. В настоящей статье в качестве силового фактора, который, возможно, приводит к активизации этого процесса, рассмотрим горное давление. Тогда силы выталкивания образуются по причине наличия скошенных граней замка, без которых его монтаж был бы невозможен. Величина этих сил зависит от усилия, действующего в стыке, и угла наклона торцов блока и в первом приближении может определяться так:

$$N_{\text{выт}} = N_{\text{стык}} \tan \alpha. \quad (1)$$

Возьмем для примера обделку двухпутных перегонных тоннелей метрополитена Санкт-Петербурга диаметром 10,3 м. В ней угол наклона торцов блоков $\alpha = 15^\circ$, ширина кольца обделки составляет 1,8 м, а высота блока — 0,45 м (рис. 9). Зная инженерно-геологические условия района расположения тоннеля, характеристики бетона и применяя классические методы строительной механики (метод перемещений), можно получить значение нормальной силы в стыке $N_{\text{стык}} \approx 870$ т. Тогда:

$$N_{\text{выт}} = N_{\text{стык}} \tan \alpha = 870 \cdot \tan(15^\circ) = 233 \text{ т}. \quad (2)$$

При этом сила трения имеет явно меньшие значения:

$$N_{\text{тр}} = N_{\text{стык}} \sin(\alpha) \mu = 870 \cdot \sin(15^\circ) \cdot 0,62 = 140 \text{ т}, \quad (3)$$

где μ — коэффициент трения скольжения бетона по бетону (для класса В50) [3].

Это и объясняет выталкивание блока.

При этом если закрутить связи растяжения (четыре шпильки $\varnothing 25$ мм, по две с каждого смежного блока) сразу после монтажа замкового блока, на них будет передаваться срезающее усилие, равное $N_{\text{выт}} \cos \alpha - N_{\text{тр}}$, которое

вызовет касательные напряжения, превышающие допустимые:

$$R_s = 0,58 R_y = 0,58 \cdot 35500 = 20590 \text{ т/м}^2, \quad (4)$$

$$\tau_{\text{шп}} = \frac{N_{\text{выт}} \cos \alpha - N_{\text{тр}}}{4S} = \frac{233 \cdot \cos 15^\circ - 140}{4 \cdot 0,000491} = 43310 \text{ т/м}^2 > 20590 \text{ т/м}^2, \quad (5)$$

где S — площадь сечения одной шпильки $\varnothing 25$ мм, равная 0,000491 м².

Приведенные ранее формулы и расчеты основываются на простейших законах физики и применении метода перемещений. Он позволил получить порядок значений нормальной силы, действующей в стыке. Однако ввиду наличия ряда допущений и своей специфики метод перемещений не может дать полную картину распределения усилий и значений перемещений замкового блока.

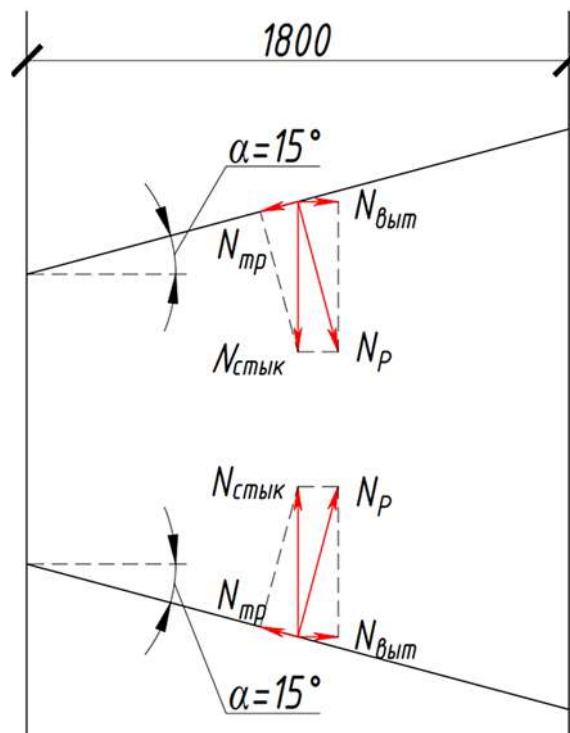


Рис. 9. Схема к определению величины силы выталкивания и силы трения

Применение численных методов для определения силы выталкивания

Для более глубокого анализа явления выталкивания был выполнен расчет в комплексе Midas GTS NX. Данный комплекс широко распространен в научной среде и применяется в расчетах сложных систем, таких как «фундамент-грунт» или «обделка-грунт», причем результаты математического моделирования в ряде исследований имели высокую сходимость с натурой [4–10]. Моделировалось кольцо обделки тоннеля в толще протерозойских глин. Размеры массива назначались из соображений, что на расстоянии двух диаметров в стороны и одного диаметра вверх и вниз от внешней границы выработки ее влияние на напряженно-деформированное состояние грунта несущественно (менее 4%). Были выбраны геологические условия на участке трассы двухпутного тоннеля в зоне, где на обделку оказывается максимальное давление от всей толщи вышележащих грунтов (расчет методом перемещений выполнялся для этих же условий).

Физико-механические свойства конечных элементов, моделирующих грунтовый массив, выражены следующими показателями: линейными (модулем деформации E , коэффициентом поперечной деформации, объемным весом γ) и нелинейными (сцеплением C и углом внутреннего трения φ). Применяемая модель в Midas GTS NX: Мора — Кулона (учитывающая упругопластическую работу массива).

Физико-механические свойства конечных элементов, моделирующих обделку перегонного тоннеля, выражены следующими показателями: модулем упругости E , коэффициентом Пуассона ν и объемным весом γ . В Midas GTS NX применяется модель Elastic, которая учитывает работу бетона в упругой стадии.

Для моделирования стыков обделки использовались плоские интерфейсные элемен-

ты. Они представляют собой разрыв в сетке конечных элементов, заполненный связями между поверхностями граней разрываемых, смежных друг с другом блоков.

Помимо этого, для обеспечения возможности движения замка в направлении проходки в модели была назначена еще одна поверхность, заполненная плоскими интерфейсными элементами — по границе контакта внешней поверхности замкового блока и протерозойских глин. Если этого не сделать, то будет решаться задача с жесткими связями в узлах конечных элементов между блоком и грунтом, что не соответствует действительности.

В качестве граничных условий были заданы запрет вертикальных перемещений по нижней грани массива и запреты перемещений по боковым граням, за исключением торцов кольцевых стыков замкового блока (для обеспечения возможности его выдавливания).

Разбивка на конечные элементы массива выполнена со сгущением сетки вблизи конструкции (размер элементов составляет от 1,0 до 0,15 м). Всего в модели 44 051 узел и 193 688 элементов (рис. 10).

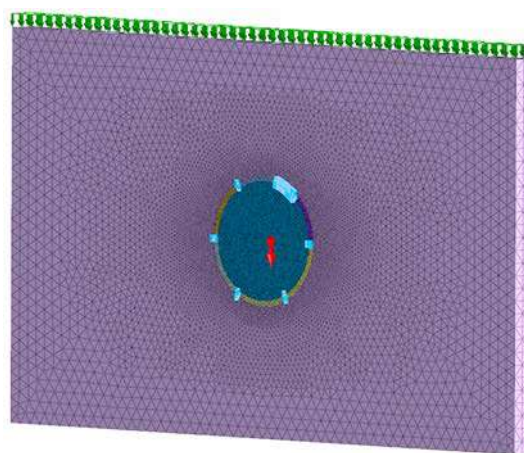


Рис. 10. Вид полученной 3D-модели

Расчет выполнялся в два этапа. На первом создавалось начальное напряженное состояние

грунтового массива. На этом этапе все группы КЭ имели свойства протерозойских глин, что позволило получить поле напряжений, соответствующее состоянию массива до проходки туннеля. В конце этапа расчета полученные перемещения обнулялись. На втором этапе выполнялся монтаж кольца обделки. Здесь группам КЭ-блоков назначались характеристики бетона, в плоскостях стыков и на контакте «замковый блок-грунт» активировались плоские интерфейсные элементы, а часть массива, заключенная во внутренней поверхности кольца обделки, удалялась (рис. 11). При этом происходило снятие ограничения перемещений по кольцевым стыкам замкового блока.

В результате расчета было получено значение перемещения замкового блока в направлении проходки, оно составило 25,9 мм (рис. 12).

При этом были получены значения напряжений в интерфейсных элементах в стыке, по ним и будет оцениваться значение силы трения (рис. 13).

Таким образом, сила трения в стыке:

$$N_{\text{тр}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i A_i \sin \alpha = \frac{A_{\text{стыка}} \sin \alpha}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i =$$

$$= \frac{1,86 \cdot 0,45 \cdot \sin 15^\circ}{72} \cdot 45992,33 = 138,4 \text{ т}, \quad (6)$$

где n — количество интерфейсных элементов в стыке;

σ_i — напряжение в i -м элементе;

A_i — площадь i -го элемента.

Полученное значение близко к результату, определенному аналитически (разница 1,1%), что свидетельствует о корреляции результатов, полученных двумя методами, и возможности применения аналитических расчетов для оценки значения сил трения и выталкивания, возникающих в стыке.

В качестве рекомендаций, внедрение которых может решить проблемы выдавливания, предложим следующие:

1. Установка в радиальный стык дополнительных связей, препятствующих выкалыванию ключа, например дополнительных шпилек. Требуемое количество шпилек будет определяться из условия прочности шпильки на срез. Так, если добавить по одной шпильке с каждой стороны и увеличить их диаметр до 30 мм (шесть шпилек $\varnothing 30$ мм, по три с каждого смежного блока), получим:

$$\tau_{\text{шп}} = \frac{N_{\text{выт}} \cos \alpha - N_{\text{тр}}}{6S} =$$

$$= \frac{233 \cdot \cos 15^\circ - 140}{6 \cdot 0,000707} = 20052 \text{ Т/м}^2 \quad (7)$$

$$20052 \text{ Т/м}^2 < 20590 \text{ Т/м}^2 \text{ (запас 2,6\%)},$$

здесь S — площадь сечения одной шпильки $\varnothing 30$ мм, равная $0,000707 \text{ м}^2$.

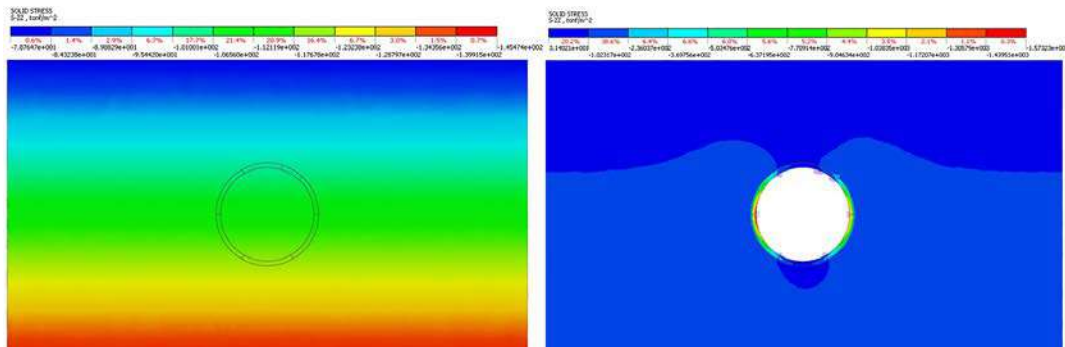


Рис. 11. Изополя напряжений в направлении вертикальной оси (слева — на этапе создания начального напряженного состояния, справа — после монтажа кольца обделки)

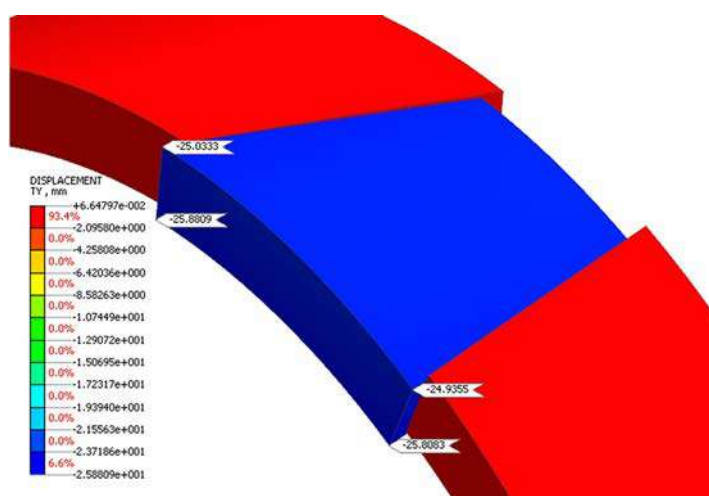


Рис. 12. Деформации вдоль оси тоннеля (для наглядности увеличены в 5 раз)

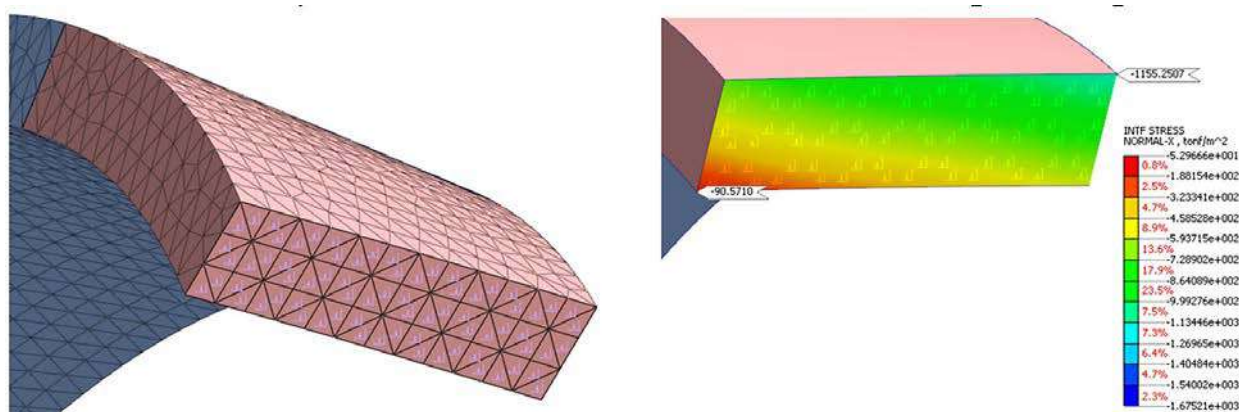


Рис. 13. Сформированные плоские интерфейсные элементы стыка (слева), значение нормальных напряжений в интерфейсных элементах стыка (справа)

2. Решение проблемы на стройке с помощью увеличения сил трения в стыке путем обработки торцевых поверхностей замкового и смежных блоков различными быстротвердеющими составами (например, эпоксидным клеем), что уменьшит или полностью сведет на нет перемещение замка.

3. Уменьшение угла наклона торцов замка, что повлечет за собой снижение выталкивающих усилий. При проектировании обделок рекомендуемые значения угла наклона торцов замкового блока лежат в диапазоне 7–15°. Если принять, к примеру, значение $\alpha = 10^\circ$, то:

$$N_{\text{выт}} = N_{\text{стык}} \tan \alpha = 870 \cdot \tan 10^\circ = 153 \text{ т}, \quad (8)$$

$$N_{\text{тр}} = N_{\text{стык}} \sin(\alpha) \mu = 870 \cdot \sin(10^\circ) \cdot 0,62 = 94 \text{ т}. \quad (9)$$

Для подтверждения корректности полученных значений был выполнен еще один расчет в Midas GTS NX, единственным отличием которого стало значение угла наклона торцов замкового блока $\alpha = 10^\circ$.

В результате расчета было получено значение величины выдавливания замкового блока, равное 20,8 мм (на 19,7 % меньшее по сравнению со случаем для $\alpha = 15^\circ$) (рис. 14).

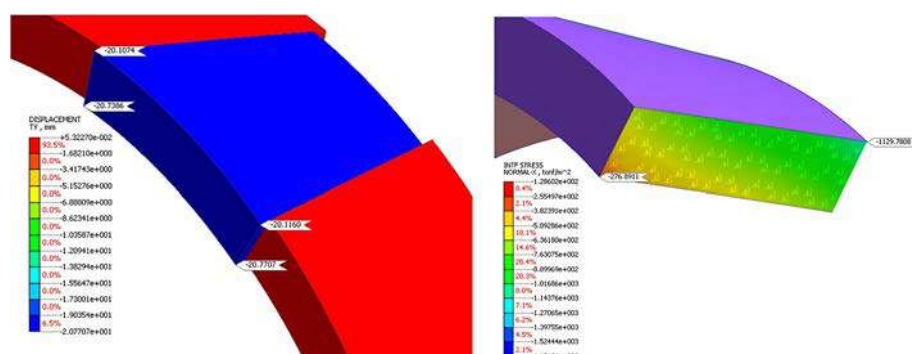


Рис. 14. Слева — картина перемещений вдоль оси тоннеля (для наглядности картина деформации увеличена в 5 раз), справа — распределение нормальных напряжений в интерфейсных элементах стыка

ТАБЛИЦА 1. Сравнение результатов расчетов

Параметр	Метод расчета	Аналитический расчет	Midas GTS NX	Разница, %
Сила трения при $\alpha = 15^\circ$, т		140	138,4	1,1
Сила трения при $\alpha = 10^\circ$, т		94	96	2,1
Выдавливание при $\alpha = 15^\circ$, мм		—	25,9	—
Выдавливание при $\alpha = 10^\circ$, мм		—	20,8	—

При этом сила трения составила 96 т, разница с аналитическим расчетом — 2,1 %, что снова свидетельствует о корреляции значений, получаемых аналитически и по результатам математического моделирования.

В табл. 1 представлено сравнение результатов расчетов, полученных двумя методами.

4. Изменение конструкции замкового и смежных блоков. По сути, это модернизация варианта решения с установкой в стык арматурных стержней, а конкретно предлагается предусмотреть в конструкции блока закладные детали в местах установки арматурных стержней, чтобы оптимально воспринимать и распределять возникающие там высокие напряжения. Это позволит эффективно и относительно недорого решить вопрос возникновения негативных последствий.

Заключение

В результате проведенного исследования была поставлена и проанализирована проблема выдавливания замкового блока при строительстве транспортных тоннелей большого диаметра из сборной высокоточной железобетонной обделки повышенной водонепроницаемости. Также была предложена аналитическая методика определения сил трения, возникающих в радиальных наклонных стыках такой обделки на базе применения классических методов строительной механики. Для подтверждения результатов и более глубокого анализа процесса выдавливания было проведено математическое моделирование с использованием метода конечных элементов, показавшее высокую сходимость получаемых результатов.

Помимо этого, были даны возможные варианты решения проблемы в условиях строительства и на стадии проектирования конструкции обделки.

Библиографический список

1. Крюкова М. С., Новиков А. Л. Автодорожный подводный тоннель под Невой // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 19–26 апреля 2021 года). СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. С. 233–237.

2. Егоров Р. А., Ледяев А. П. Первый опыт использования ТПКМ Ø10,3 м в отечественном метростроении // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 16–23 апреля 2018 года). СПб., 2018. С. 23–27.

3. Влияние сил трения на прочность бетона / В. П. Селяев [и др.] // Региональная архитектура и строительство. 2012. № 3. С. 12–17.

4. Ledyayev A., Kavkazskiy V., Davidenko E. Examination of the stress-strain state of service tunnels at the airport Domodedovo // International scientific siberian transport forum “TransSiberia 2021”. TransSiberia 2021: Lecture Notes in Networks and Systems. Springer Cham, 2022. Vol. 1. P. 28–37.

5. Construction strategies for a NATM tunnel in São Paulo, Brazil, in residual soil / P. M. Osvaldo [et al.] // Underground Space. 2022. Vol. 7, iss. 1. P. 1–18. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.04.002.

6. Shaposhnikov E. A., Frolov Yu. S. Substantiation of rational design factors of a metropolitan rail-

way station without side railway platforms // Russian Journal of Transport Engineering. 2023. Vol. 10. No. 1. URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS123.pdf>. DOI: 10.15862/05SATS123.

7. Numerical simulation of the thermal response of seabed sediments to geothermal cycles in Suvilahti, Finland / Marek Mohyla, et al. // Renewable Energy. 2024. Vol. 221. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119770.

8. Mechanical performances of shield tunnel segments under asymmetric unloading induced by pit excavation / Gang Wei, et al // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023. Vol. 15, iss. 6. P. 1547–1564. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.08.010.

9. Математическое моделирование термодинамических процессов в вентиляционных шахтах метрополитена / А. А. Сокорнов [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2024. Т. 21, вып. 2. С. 457–469. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-457-469.

10. Land Lapse Phenomenon and Surface Subsidence Law of Shield Tunnel Passing Through Rock-Bearing Formation / Y. Guangming [et al.] // Frontiers in Earth Science. 2022. DOI: 10.3389/feart.2022.934360.

Дата поступления: 07.05.2024

Решение о публикации: 16.08.2024

Контактная информация:

КОНСТАНТИНОВ Василий Денисович — лаборант; vasyakonst213@gmail.com

НОВИКОВ Анатолий Леонидович — старший преподаватель; snoval@pgupstm.ru

СОКОРНОВ Антон Александрович — старший преподаватель; scarlunch@mail.ru

The key-segment extrusion during the construction of large-diameter transport tunnels

V. D. Konstantinov, A. L. Novikov, A. A. Sokornov

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

For citation: *Konstantinov V. D., Novikov A. L., Sokornov A. A. The key-segment extrusion during the construction of large-diameter transport tunnels // Proceedings of Petersburg Transport University, 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 609–621. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-609-621*

Abstract

Purpose: to consider the problem of the key-segment extrusion that occurs during the construction of subway tunnels in St. Petersburg using prefabricated high-precision reinforced concrete linings with increased water resistance with a diameter of 10.3 m. To analyze the possible processes leading to this phenomenon and methods of solving the problem in construction conditions. To determine the consequences of the currently used solutions to the problem. To develop an analytical methodology for determining the magnitude of the friction force acting on the radial joints planes of contacting segments based on classical structural mechanics methods (displacement method). To carry out mathematical modeling of the extrusion process by the finite element method and compare its results with those obtained analytically. To develop recommendations for the elimination of block extrusion, which can be both applied in construction conditions and taken into account when designing lining structures. To analyze the effectiveness of the proposed recommendations. **Methods:** full-scale data from constructed objects, analytical calculations and mathematical modeling by the finite element method were used. **Results:** an analytical method is proposed for determining the magnitude of the pushing force of the key-segment and the friction force in the radial segment joints. The results of mathematical modeling showed high convergence of the results obtained by the two methods. Recommendations have been developed to eliminate the phenomenon of extrusion, and their effectiveness has been evaluated. **Practical importance:** the results of the study can be used at the design stage of prefabricated reinforced concrete linings with increased water resistance for large-diameter tunnels, as well as in construction conditions at the time of installation of the key segment.

Keywords: refabricated high-precision reinforced concrete lining with increased water resistance, key-segment, tunnel boring machine, large-diameter tunnels, mathematical modeling, friction force

References

1. Kryukova M. S., Novikov A. L. Avtodorozhny`j podvodny`j tonnel` pod Nevoj // *Transport: problemy`, idei, perspektivy`*: sbornik trudov LXXXI Vserossijskoj nauchno-texnicheskoj konferencii studentov, aspirantov i molody`x ucheny`x (Sankt-Peterburg, 19–26 aprelya 2021 goda). SPb.: FGBOU VO PGUPS, 2021. S. 233–237. (In Russian)
2. Egorov R. A., Ledyayev A. P. Pervy`j opy`t ispol`zovaniya TPMK Ø10,3 m v otechestvennom metrostroenii // *Transport: problemy`, idei, pers-*

pektivy`: sbornik trudov LXXVIII Vserossijskoj nauchno-texnicheskoj konferencii studentov, aspirantov i molody`x ucheny`x (Sankt-Peterburg, 16–23 aprelya 2018 goda). SPb., 2018. S. 23–27. (In Russian)

3. Vliyanie sil treniya na prochnost` betona / V. P. Selyayev [i dr.] // *Regional`naya arxitektura i stroitel`stvo*. 2012. № 3. S. 12–17. (In Russian)

4. Ledyayev A., Kavkazskiy V., Davidenko E. Examination of the stress-strain state of service tunnels at the airport Domodedovo // *International scientific*

siberian transport forum “TransSiberia 2021”. TransSiberia 2021: Lecture Notes in Networks and Systems. Springer Cham, 2022. Vol. 1. P. 28–37.

5. Construction strategies for a NATM tunnel in São Paulo, Brazil, in residual soil / P.M. Osvaldo [et al.] // *Underground Space*. 2022. Vol. 7, iss. 1. P. 1–18. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.04.002.

6. Shaposhnikov E. A., Frolov Yu. S. Substantiation of rational design factors of a metropolitan railway station without side railway platforms // *Russian Journal of Transport Engineering*. 2023. Vol. 10. No. 1. URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS123.pdf>. DOI: 10.15862/05SATS123.

7. Numerical simulation of the thermal response of seabed sediments to geothermal cycles in Suvilahti, Finland / Marek Mohyla [et al.] // *Renewable Energy*. 2024. Vol. 221. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119770.

8. Mechanical performances of shield tunnel segments under asymmetric unloading induced by pit excavation / Gang Wei, et al // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023. Vol. 15, iss. 6. P. 1547–1564. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.08.010.

9. Matematicheskoe modelirovanie termodinamicheskix processov v ventilyacionny`x shaxtax metropolitena / A.A. Sokornov [i dr.] // *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshheniya*, 2024. T. 21. Vy`p. 2. S. 457–469. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-02-457-469. (In Russian)

10. Land Lapse Phenomenon and Surface Subsidence Law of Shield Tunnel Passing Through Rock-Bearing Formation / Y. Guangming [et al.] // *Frontiers in Earth Science*. 2022. DOI: 10.3389/feart.2022.934360.

Received: 07.05.2024

Accepted: 16.08.2024

Author’s information:

Vasilii D. KONSTANTINOV — Laboratory assistant; vasyakonst213@gmail.com

Anton A. SOKORNOV — Senior lecturer; scarlunch@mail.ru

Anatolii L. NOVIKOV — Senior lecturer; snoval@yandex.ru

УДК 624.21.014.2

Методическое обоснование расчета холодногну­тых стальных тонкостенных профилей в мостовых конструкциях на этапе проекта

Н. А. Соловьев, С. В. Чижов, Ю. В. Авдей

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

Для цитирования: Соловьев Н. А., Чижов С. В., Авдей Ю. В. Методическое обоснование расчета холодногну­тых стальных тонкостенных профилей в мостовых конструкциях на этапе проекта // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 622–637. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-622-637

Аннотация

Цель: выполнить сравнительный анализ особенностей существующих теорий расчета холодногну­тых стальных тонкостенных профилей, рассмотреть вопрос о необходимости разработки методики расчета и обоснование критериев применимости холодногну­тых стальных тонкостенных профилей в основных конструкциях мостовых сооружений, обосновать целесообразность применения конструкций из тонкостенных холодногну­тых профилей применительно к мостостроению с целью снижения металлоемкости и повышения экономической эффективности. **Методы:** сравнение существующих теорий расчета холодногну­тых стальных тонкостенных профилей на данный момент, обзор существующей практики применения и технико-экономических показателей тонкостенных профилей в области промышленного и гражданского строительства. **Результаты:** выполнен сравнительный анализ особенностей, достоинств и недостатков отдельных теорий расчета холодногну­тых стальных тонкостенных профилей, установлены критерии выбора теории расчета в зависимости от характера их работы. Приведены некоторые технико-экономические показатели сходных конструкций из холодногну­тых стальных тонкостенных профилей в конструкциях зданий промышленного, гражданского, сельскохозяйственного и иного назначения. Анализ показал, что данные конструкции имеют меньшую металлоемкость по сравнению с обычными стальными конструкциями. **Практическая значимость:** обозначена необходимость в разработке методики расчета конструкций из холодногну­тых стальных тонкостенных профилей применительно к мостостроению. Данная методика имеет практическую значимость для внедрения тонкостенных профилей в основных конструкциях мостов. Приведен ряд факторов, которые могут оказаться решающими в пользу выбора холодногну­тых стальных тонкостенных профилей в составе несущих конструкций главных балок мостов при соответствующем технико-экономическом обосновании в определенных условиях с учетом их особенностей, достоинств и недостатков.

Ключевые слова: холодногну­тый стальной тонкостенный профиль, ЛСТК, теория Власова, теория критической несущей способности, коробление, бимомент, местная устойчивость, пешеходный мост

Введение

Постоянно возрастающая потребность в строительстве мостовых сооружений на территории нашей страны для пересечения различных преград, а также непрерывное увеличение стоимости строительных материалов требуют находить новые, более экономичные решения конструкций пролетных строений, надежно выполняющих

свои эксплуатационные показатели в течение полного срока службы.

Одним из решений данной задачи может послужить использование холодногнутой стальной тонкостенной профили в несущих конструкциях мостовых сооружений. Различные преимущества холоднодеформированной стали вызывают растущий интерес в исследовательской сфере, особенно в промышленно развитых странах.

Технология строительства из тонкостенных профилей появилась в Канаде и нашла массовое применение для строительства жилых зданий в 50-х годах прошлого столетия на территории Северной Америки, а затем и в Европе. Использование этих профилей в несущих конструкциях зданий сельскохозяйственного, промышленного, гражданского и других назначений на сегодняшний день является ключевым направлением в эффективном строительстве и получило широкое распространение в России и других странах [1]. Стропильные фермы из тонкостенных профилей уже успешно применяют в зданиях с пролетами до 100 м [2].

Тонкостенный профиль является наиболее современным и оптимальным типом конструкционных материалов, которые позволяют достичь наименьшего веса при максимальной жесткости [3].

Тонкостенные стальные холодногнутые профили изготавливают путем холодного пластического формообразования из стальных штрипсов (в большинстве случаев с цинковым покрытием), скрученных в бухты длиной до 900 м, методом холодной прокатки на прокатных многовалковых станах или методом штамповки на гибочных прессах. Метод холодной прокатки отличается более высокой производительностью, что важно при производстве профилей в большом объеме. Метод

штамповки на гибочных прессах оправдан при небольших партиях или при работе с более толстым металлом. Метод штамповки также позволяет получать гибы меньшего радиуса, что положительно сказывается на прочностных качествах получаемого профиля, однако существует ограничение по длине, обусловленное длиной рабочей части станков. Толщина тонкостенных профилей не превышает 4 мм [4].

К известным типам соединений в конструкциях из стальных тонкостенных холодногнутой профилей можно отнести механические, сварные и клеевые. Наиболее часто используемые механические соединения выполняются при помощи болтов с гайками размерами М5–М16, самосверлящих винтов и вытяжных заклепок. Сварные соединения выполняют такими методами сварки, как дуговая в защитных газах, ручная дуговая, неплавящимся электродом и плазменная. После выполнения сварных соединений необходимо восстановление защитного покрытия скрепляемых профилей. С этой точки зрения применение сварных соединений для профилей, имеющих защитное покрытие, часто оказывается неоправданным. Клеевые составы (эпоксидные или акриловые) обычно используют совместно с механическими соединениями для повышения их прочности. Применение клея также позволяет более равномерно распределять нагрузку, приходящуюся на соединение.

В стропильных фермах в диапазоне пролетов от 6 до 15 м использование холодногнутой тонкостенной профили позволяет получить наименьший расход стали. Снижение металлоемкости по сравнению с конструкциями со сплошной стенкой и решетчатыми конструкциями из горячекатаных профилей достигает 60 % и 40 % соответственно.

Однако проведенные в СССР исследования технико-экономических показателей стропильных ферм из тонкостенных профилей при пролетах 18–30 м выявили их экономическую эффективность до пролетов величиной 24 м [4].

Помимо более низкого расхода металла, при выполнении расчетов технико-экономических показателей необходимо учитывать повышенную стоимость тонкостенных стальных профилей по отношению к прокатным профилям в перерасчете на 1 т стали.

Конструкции из холодногнутого тонкостенных профилей являются конструкциями высокой степени заводской готовности, способствующей росту производительности труда. Они могут доставляться на объект в виде готового для сборки комплекта из нарезанных на нужную длину элементов с необходимыми отверстиями для соединений. Элементы изготавливаются на поточных линиях, что существенно ускоряет темп производства работ и облегчает сборку. Малая металлоемкость выгодна не только с точки зрения экономии металла, но и с точки зрения уменьшения собственного веса самих конструкций, что позволит снизить стоимость транспортировки и отказаться от кранов и другого тяжелого подъемного оборудования, что особенно важно в труднодоступных местах, где нет возможности подъезда для крупногабаритной строительной техники. Меньшая постоянная нагрузка от конструкций также выгодна с точки зрения работы фундаментов, так как позволяет применять более экономичные и простые решения. Все работы по монтажу возможно вести при помощи самого распространенного строительного оборудования, имеющегося на балансе практически в каждой подрядной организации. Вместе

с этим необходимо осторожное обращение с данными конструкциями при погрузке, разгрузке и монтаже ввиду их тонкостенности. Полученные в ходе неаккуратного обращения деформации могут существенно сказаться на несущей способности.

Использование штрипсов с цинковым покрытием при производстве профилей позволяет сократить затраты на окраску и текущее содержание конструкций, что в итоге скажется на снижении полной стоимости жизненного цикла конструкции. Цинковое покрытие выполняет как барьерную функцию по защите стали от возникновения очагов коррозии, так и электрохимическую, образуя катодно-анодную пару с защищаемой сталью. Цинк, являясь более активным металлом, при повреждении покрытия первым вступает в реакцию коррозии, оставляя защищаемую сталь практически без повреждений. Однако большая чувствительность тонких стенок рассматриваемых профилей к коррозии с точки зрения прочностных качеств обуславливает их рациональное применение без опасений только в неагрессивных и слабоагрессивных средах по отношению к стали. Потеря цинка в зависимости от времени носит линейный характер, что позволяет с достаточной точностью назначать величину защитного покрытия в зависимости от степени агрессивности среды и требуемого срока службы конструкции.

Несмотря на такие преимущества, как сниженные расходы на производство, транспортировку, рабочую силу и более высокое соотношение прочности к весу, холодногнутые стальные тонкостенные профили характеризуются сложным поведением под внешней нагрузкой и сложными проблемами, связанными с устойчивостью. Для изучения этих свойств и поиска соответствующих

изменений в расчетных моделях и нормативных документах было проведено множество исследований.

Отсутствие технико-конструктивных решений по применению холодногнутого стальных тонкостенных профилей в мостовых конструкциях на территории Российской Федерации объясняется пробелами в методической и нормативной базах по их расчету для объектов транспортного строительства, а не недостаточной несущей способностью самих профилей или их нерешаемыми недостатками. Они успешно зарекомендовали себя в других областях строительства при решении оптимизационной задачи по снижению металлоемкости. Для внедрения холодногнутого стальных тонкостенных профилей в несущих конструкциях в области мостостроения необходимо преодолеть разрыв между существующими нормативными документами по расчету тонкостенных конструкций и нормативными документами в области транспортного строительства в отношении расчета и проектирования мостовых конструкций с учетом их особенностей и предъявляемых требований.

Отличительные особенности работы холодногнутого стальных тонкостенных профилей

Прочностные качества стали зависят от ее химического состава и способа производства. К характерным особенностям профилей, связанным со спецификой их изготовления, которые оказывают влияние на напряженно-деформируемое состояние, относят: существенное увеличение предела текучести и временного сопротивления стали в местахгиба при их производстве; остаточные деформации и геометрические несовершенства формы. Деформационное упрочнение явля-

ется одним из видов упрочнения стали за счет перестройки кристаллической решетки в результате пластической деформации. Также существенные отличия в работе рассматриваемых профилей в сравнении со стержнями сплошного сечения обусловлены наличием тонких стенок. При расчетах необходимо учитывать проблемы устойчивости, часто не имеющие приемлемых аналитических решений. Для этих целей выводились полуэмпирические формулы, основанные на масштабных экспериментальных испытаниях [4].

Для холодногнутого профилей характерны следующие формы потери устойчивости:

- местная, или локальная;
- общая (изгибная, крутильная, изгибно-крутильная);
- потеря формы сечения (искажение) [5].

Применение методов из инженерной теории пластичности при анализе работы тонкостенных профилей может привести к грубой ошибке, так как в большинстве случаев изменение формы профиля или потеря местной устойчивости ограничивает возникновение пластических шарниров [4].

При расчетах конструкций из холодногнутого стальных тонкостенных профилей с защитным покрытием необходимо учитывать его величину. Толщину профилей указывают с учетом толщины покрытия, выраженной в массе покрытия с двух сторон листа на квадратный метр. Для определения толщины стального ядра, способного воспринимать внешнюю нагрузку, необходимо знать плотность защитного покрытия.

Конструкции из холодногнутого стальных тонкостенных профилей целесообразно применять при постоянных нагрузках и переменных нагрузках статического характера. Применение холодногнутого профилей в элементах конструкций, воспринимающих

удары или местное давление, нежелательно из-за опасности местных деформаций, способных вызвать потерю местной устойчивости [4].

Методы расчета холодногнутого стальных тонкостенных профилей

В рамках данной статьи будут рассмотрены основные аналитические и полуаналитические методы расчета холодногнутого стальных тонкостенных профилей и их главные положения. Численные (метод конечных элементов) и эмпирические (испытания образцов) методы не будут затронуты.

Для расчета холодногнутого тонкостенных профилей, за исключением случая работы профиля на осевое растяжение, существуют две фундаментальные теории, основанные на абсолютно разных принципах: теория тонкостенного стержня В. З. Власова и теория закрытой несущей способности. Каждая из этих двух теорий расчета дополняется частными решениями отдельных проблем (несущая способность стенки от влияния внешних сосредоточенных нагрузок, изменение кривизны профиля и т. д.), способных оказать при расчете тонкостенных профилей существенное влияние на несущую способность и обычно не рассматриваемых в классических стальных конструкциях [4]. Только в частном случае, при работе холодногнутого профиля на осевое растяжение, будет справедливо применять теорию призматического стержня сплошного сечения.

По теории тонкостенного стержня В. З. Власова, к тонкостенным стержням относятся тонкостенные пространственные системы типа оболочки, для которых длина, ширина и толщина определены величинами разных порядков. Этим условиям отвечают все холодногнутые профили открытого профиля [4, 3].

Особенностью работы тонкостенного стержня, по теории В. З. Власова, является искривление плоского поперечного сечения вдоль стержня, вызванное продольным перемещением точек сечения из его плоскости во время кручения. Данное нарушение плоскостности называют депланацией, или короблением. Нормальные напряжения, возникающие пропорционально этой деформации по закону Гука, имеют значительную величину и долго уменьшаются вдоль стержня по мере удаления от места приложения нагрузки [4]. Эта особенность в поведении тонкостенных стержней под нагрузкой, вызывающей кручение, не позволяет использовать принцип Сен-Венана к их расчету [3, 6]. Гипотеза плоских сечений справедлива только в частном случае приложения внешней поперечной нагрузки через так называемый центр изгиба [7].

В основе теории В. З. Власова лежат две геометрические гипотезы:

- а) недеформируемый контур в плоскости поперечного сечения;
- б) отсутствие деформации сдвига срединной поверхности [3].

При расчете по теории В. З. Власова тонкостенный стержень открытого профиля представляют в виде стержневого элемента с дополнительной степенью свободы, разрешающей возникновение депланации, с соответствующим силовым фактором под названием бимомент [7].

Вследствие депланации (коробления) поперечного сечения стержня возникают дополнительные секториальные нормальные напряжения σ_{ω} :

$$\sigma_{\omega} = \frac{B_{\omega}}{W_{\omega}}. \quad (1)$$

Секториальные нормальные напряжения σ_{ω} образуют систему внутренних усилий,

статический эквивалент которых равен нулю, и распределяются по сечению по закону секториальной координаты ω (рис. 1):

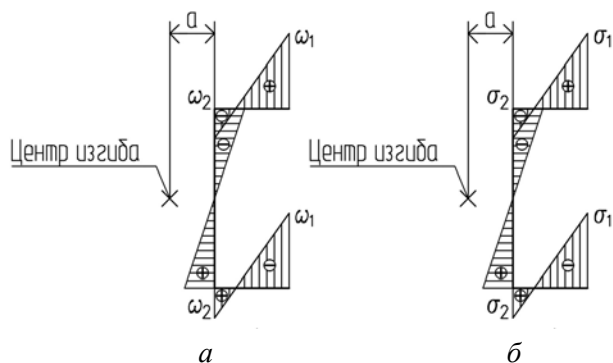


Рис. 1. Эпюры: *a* — эпюра секториальных координат в с-образном профиле; *б* — эпюра распределения секториальных нормальных напряжений в с-образном профиле

В отличие от формулы «классической» строительной механики при расчете нормальных напряжений в случае сложного сопротивления добавляется компонент дополнительных секториальных напряжений от бимоента B_ω / W_ω , вызванного короблением поперечного сечения [7].

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} + \frac{B_\omega}{W_\omega}, \quad (2)$$

где N — продольная сила;

A — площадь сечения;

M_x, M_y — изгибающие моменты относительно осей $x-x$ и $y-y$ соответственно;

W_x, W_y — моменты сопротивления сечения относительно осей $x-x$ и $y-y$ соответственно;

B_ω — бимомент;

W_ω — секториальный момент сопротивления.

Данная формула в преобразованном виде предлагается для проверки прочности элементов, достигающих предельного состояния

в упругопластической стадии в своде правил СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» [8] (неравенство 3), являющихся актуализированной редакцией старых норм СНИП П-23–81* «Стальные конструкции» [9], в которых учет бимоента не предполагался (неравенство 4). Как видно из неравенств, при совершенствовании норм по расчету и проектированию стальных конструкций потребовалось введение дополнительных секториальных напряжений, возникающих в результате деформации поперечного сечения и способных оказать существенный вклад при оценке несущей способности. Однако стоит отметить, что вышеуказанный свод правил не распространяет свое действие на проектирование стальных конструкций мостов. В своде правил СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» до сих пор нет никаких рекомендаций по расчету на прочность с учетом деформации (неравенство 5).

$$\left(\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \right)^n + \frac{M_x}{c_x W_{xn, min} R_y \gamma_c} + \frac{M_y}{c_y W_{yn, min} R_y \gamma_c} + \frac{B}{W_{\omega n, min} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (3)$$

$$\left(\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \right)^n + \frac{M_x}{c_x W_{xn, min} R_y \gamma_c} + \frac{M_y}{c_y W_{yn, min} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (4)$$

$$\frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{\chi_x I_{xn}} y \pm \frac{M_y}{\chi_y I_{yn}} x \leq R_y m. \quad (5)$$

Теорию В. З. Власова развивали и дополняли такие исследователи, как В. Г. Александров, А. П. Анучкин, Е. А. Бейлин, Г. И. Белый, Д. В. Бычков, Б. Н. Горбунов, Г. Ю. Джанелидзе, Н. А. Кузьмин, П. А. Лукаш, И. Е. Милейковский, А. К. Мроцинский, Я. Г. Пановко, С. Н. Пичугин, В. А. Постнов,

П. А. Пяткин, Н. Н. Родиков, С. Н. Сергеев, Н. Г. Сотников, А. И. Стрельбицкая, А. А. Уманский, И. Я. Хархурим и др. Изучению вопросов устойчивости пластин посвятили себя такие ученые, как Б. М. Броуде, Е. В. Борисов, Ф. Блейх, Я. Брудка, А. С. Вольмир, И. Б. Ефимов, Э. Стоуэл и др. [7].

Наилучшее соответствие теории В. З. Владова практике было получено при исследовании общей устойчивости тонкостенных стержней в случае обеспечения устойчивости формы контура, то есть при соблюдении гипотезы жесткого контура, лежащей в основе данной теории. При расчетах необходима дополнительная проверка на местную устойчивость. Потеря местной устойчивости при тонких стенках может оказывать влияние на несущую способность даже больше, чем напряжения, возникающие вследствие деформации сечения [4].

Теория заkritической несущей способности опирается на диаметрально противоположное: на ранних этапах нагружения, после превышения критического напряжения и потери местной устойчивости в средней части, стенка способна к дальнейшему восприятию нарастающей внешней нагрузки, если соблюдается условие прямолинейности одной или нескольких граней профиля, что объясняется возможностью работы тонких пластин в заkritической стадии. Прогиб части стенки обычно выше ее толщины, устойчивость новой формы обеспечивается за счет возникающих нормальных напряжений, действующих перпендикулярно нагрузке. Заkritическая несущая способность профиля не лимитируется потерей местной устойчивости в стенках и может быть кратно выше критической нагрузки, вызывающей потерю местной устойчивости [4, 10].

Основоположником теории заkritической несущей способности пластин принято считать Т. Кармана. Также большой вклад внесли такие ученые, как Г. Бак, А. С. Вольмир, Л. Доннел, Э. Шехлер, Л. Шуман и др. Проблемы заkritической несущей способности тонкостенных опор и балок рассматривались Я. Брудкой, Дж. Винтером, Р. Нидхемом, З. Терешковским, Дж. Хеймерлем, А. Чилвером и др. [4]. Среди ученых следует особо отметить Дж. Винтера, который внес огромный вклад в развитие теории заkritической несущей способности в ходе подготовки первых нормативных документов по расчету стальных холодногнутых тонкостенных профилей по заказу Американского института железа и стали (AISI), опираясь на масштабные экспериментальные исследования, проведенные в Cornell University. Под его руководством был издан первый нормативный документ по расчету тонкостенных холодногнутых конструкций «Specification for the Design of Light Gage Steel Structural Members», ставший основой при разработке нормативных документов в других странах.

Уравнение для нахождения критического напряжения в пластине имеет следующий вид [11]:

$$f_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(w/t)^2}, \quad (6)$$

где E — модуль упругости стали;

ν — коэффициент Пуассона;

k — коэффициент местной устойчивости пластин, который зависит от условий закрепления пластины;

w — ширина пластины;

t — толщина пластины.

После превышения критической нагрузки, приложенной на пластину, в ней начинают развиваться деформации, namного

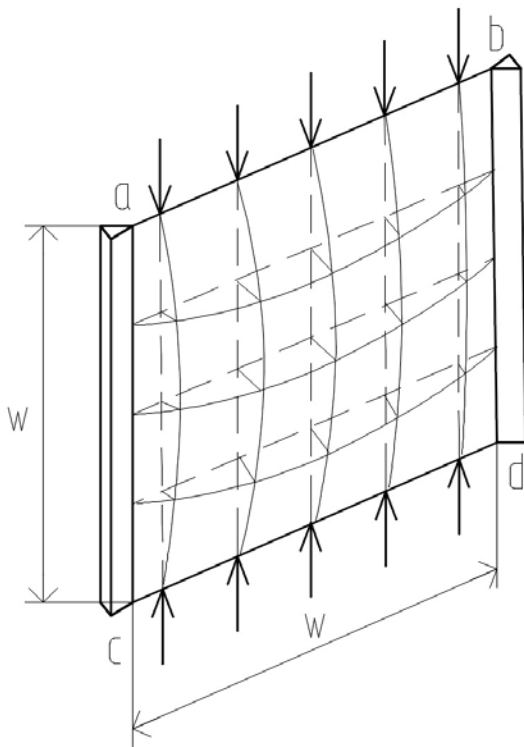


Рис. 2. Работа шарнирно опертой по двум
граням квадратной пластины в закритической
стадии

превосходящие ее толщину (рис. 2), напряжения начинают распределяться нелинейно.

Характер распределения напряжений на трех разных стадиях нагружения подкрепленной по двум граням пластины показан на рис. 3. Напряжения, не достигшие критиче-

ского значения, распределяются равномерно (рис. 3, а). После превышения критической нагрузки эпюра напряжений приобретает нелинейный вид: наибольшие напряжения наблюдаются в местах закрепления пластины, а в центре оказываются значительно меньшими (рис. 3, б). Дальнейший рост напряжений на краях происходит до достижения предела текучести стали (рис. 3, в) [12].

Впервые метод расчета тонких пластин при их работе в закритической стадии предложил Т. Карман в своей работе «The Strength of Thin Plates in Compression» [13]. По этому методу истинное распределение напряжений от внешней нагрузки по ширине w представляют в виде эквивалентных равномерно распределенных напряжений, приходящихся на участки равной ширины $b/2$, прилегающих к граням опирания пластины. Напряжения в средней части, наиболее подверженной потере местной устойчивости, принимают равными нулю и исключают из работы на внешнюю нагрузку. Результатом этих допущений является условная модель пластины, в которой на уменьшенную ширину, называемую совместно работающей, действуют равномерно распределенные нормальные напряжения величиной, равной пределу текучести для стали (рис. 4) [4, 7, 12, 14].

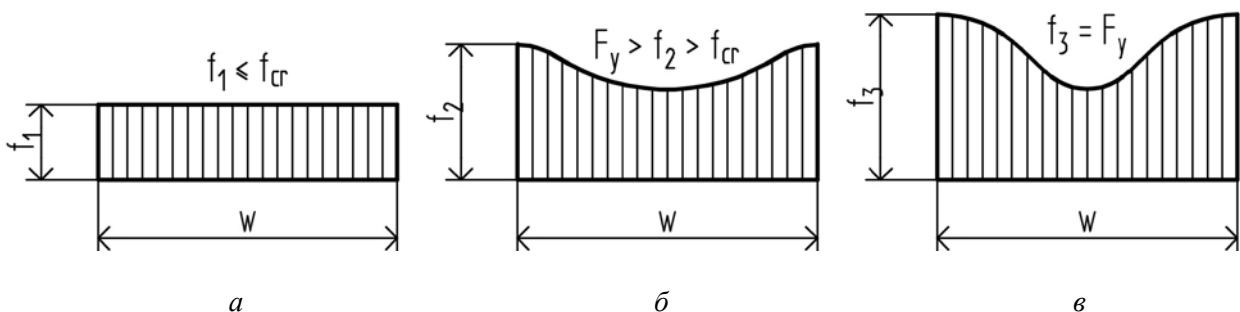


Рис. 3. Характер распределения напряжений в пластине с закрепленными полками
на трех разных стадиях нагружения

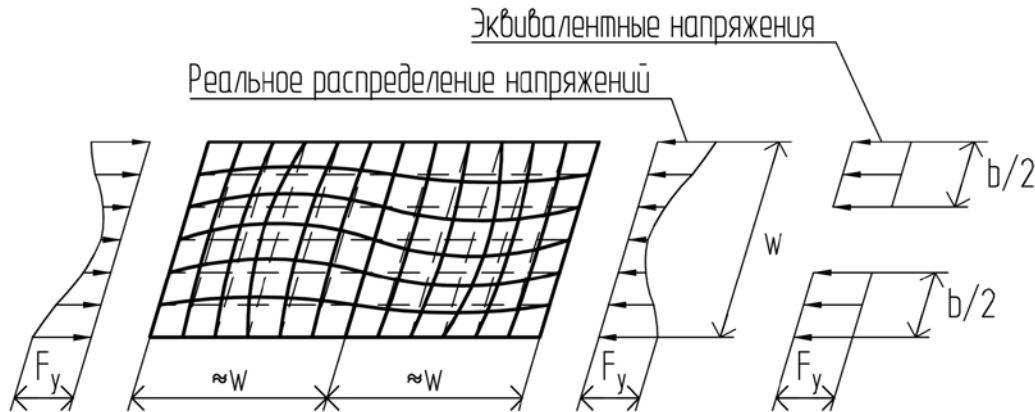


Рис. 4. Концепция эффективной ширины применительно к пластике

Предложенная Т. Карманом формула для закрепленной с двух сторон пластины имеет следующий вид [12]:

$$f_{cr} = F_y = \frac{\pi^2 E}{3(1-\nu^2)(b/t)^2}, \quad (7)$$

$$b = Ct \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,9t \sqrt{\frac{E}{F_y}}, \quad (8)$$

где

$$C = \frac{\pi}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} = 1,9; \quad \nu = 0,3. \quad (9)$$

При $w > b$

$$f_{cr} = \frac{\pi^2 E}{3(1-\nu^2)(w/t)^2}, \quad (10)$$

$$w = Ct \sqrt{\frac{E}{F_y}}. \quad (11)$$

Из уравнений (8) и (11) следует, что

$$\frac{b}{w} = \sqrt{\frac{f_{cr}}{F_y}}. \quad (12)$$

В дальнейшем Дж. Винтер, основываясь на масштабных исследованиях, в ходе подготовки первой редакции американских

норм AISI по расчету холодногнутых тонкостенных элементов внес свое исправление в формулу (12), и она приобрела следующий вид (13):

$$\frac{b}{w} = \sqrt{\frac{f_{cr}}{f_{max}}} \left(1 - 0,25 \sqrt{\frac{f_{cr}}{f_{max}}} \right). \quad (13)$$

В следующей редакции американских норм AISI формула (13) была уточнена. Она приобрела вид, который сейчас имеет в современных европейских нормах Eurocode EN 1993-1-3 (14):

$$\frac{b}{w} = \sqrt{\frac{f_{cr}}{f_{max}}} \left(1 - 0,22 \sqrt{\frac{f_{cr}}{f_{max}}} \right). \quad (14)$$

Эффективная (приведенная) ширина пластины может быть определена по формуле:

$$b = \rho w, \quad (15)$$

где:

$$\rho = \frac{1 - 0,22 / \sqrt{f_{max} / f_{cr}}}{\sqrt{f_{max} / f_{cr}}} = \frac{1 - 0,22 / \lambda}{\lambda} \leq 1. \quad (16)$$

В формуле (17) λ — условная гибкость, которая определяется как:

$$\lambda = \sqrt{\frac{f_{cr}}{f_{max}}} = \sqrt{\frac{f_{cr} [12(1-\nu^2)(w/t)^2]}{k\pi^2 E}} = \left(\frac{1,052}{\sqrt{k}}\right) \left(\frac{w}{t}\right) \sqrt{\frac{f_{max}}{E}}. \quad (17)$$

В теории закритической несущей способности для тонкостенных холодногнутых стальных профилей различают следующие геометрические характеристики:

- характеристики сечения брутто;
- характеристики эффективного (редуцированного, приведенного) сечения [14].

При расчете тонкостенный профиль принимают состоящим из длинных пластин с жестким соединением в местахгиба. Принимается, что гибкость пластин достаточно большая, локальная потеря устойчивости происходит в стадии упругой работы материала [14].

Эффективное (редуцированное) сечение получают путем исключения из расчета неэффективных участков стенок профиля, теряющих локальную устойчивость при работе на внешнюю нагрузку. Геометрические характеристики редуцированного сечения, состоящего из отдельных эффективных участков плоских стенок профиля, определяются обычным способом и применяются при оценке несущей способности в зависимости от характера работы (сжатие, изгиб и т. д.). При определении несущей способности в случае сложного сопротивления эффективные характеристики необходимо определять для каждого силового фактора по отдельности и затем складывать полученные по отдельности напряжения. Редуцированное сечение используется также для учета потери устойчивости формы сечения [14, 16].

Использование эффективного сечения при расчетах приводит к изменению зна-

чальных геометрических характеристик и возникновению дополнительных напряжений, учитываемых путем ввода дополнительных понижающих коэффициентов к геометрическим характеристикам редуцированного сечения [14].

По теории закритической несущей способности, помимо возможности потери местной устойчивости, для тонкостенных холодногнутых конструкций допускается также потеря устойчивости формы, получаемая в результате поворота составных частей профиля в виде длинных плоских полос относительно мест их пересечения (местгиба). Потерю устойчивости формы также необходимо учитывать при выполнении расчетов [12].

Вопросы прочности и устойчивости в холодногнутых тонкостенных профилях решались при помощи экспериментальных исследований с выводом на их основе полуэмпирических формул. Отсутствие единообразия этих полуэмпирических формул для нахождения эффективных геометрических характеристик и сравнение получаемых результатов заставляют сделать вывод лишь о приближенности этих решений по отношению к реальной работе стенок профилей. Данные стенки являются упругозакрепленными пластинами со степенью закрепления, зависящей от геометрических характеристик профиля [4]. Поэтому для применения теории закритической несущей способности следует руководствоваться геометрическими соотношениями параметров поперечных сечений, для которых накоплен достаточный практический опыт.

Теория закритической несущей способности не является общим методом расчета, она справедлива для профилей, состоящих из плоских полос, соединенных под углом, близким к 90°. Однако этим условиям

удовлетворяет большинство профилей, широко применяемых в строительстве. При выполнении расчетов также необходима проверка бокового выпучивания (потери плоской формы изгиба) по теории В. З. Власова [4].

Сравнительный анализ методов расчета холодногнутых стальных тонкостенных профилей и области их применения

Можно выделить три следующих метода для расчета холодногнутых стальных тонкостенных профилей:

- теория призматического стержня;
- теория тонкостенного стержня В. З. Власова;
- теория закритической несущей способности.

По теории призматического стержня сплошного сечения расчет возможен только для тонкостенных профилей, работа которых носит характер осевого растяжения [4]. Только в этом частном случае характер работы тонкостенного профиля можно оценить с использованием гипотезы плоских сечений в соответствии с принципом Сен-Венана.

По теории тонкостенного стержня В. З. Власова расчет возможен для тонкостен-

ных профилей при таком характере работы, как внецентренное растяжение, внецентренное сжатие в двух плоскостях, изгиб в одной или двух плоскостях, потеря плоской формы при изгибе в одной плоскости, а также изгибное кручение. Выполняя расчеты по данной теории, необходимо проверять потерю местной устойчивости в стенках. При потере местной устойчивости применение гипотезы жесткого контура как единственного критерия работы будет некорректно, необходим также учет деформаций стенок, способных оказать существенное влияние на несущую способность [4].

По теории закритической несущей способности рассчитываются тонкостенные профили с такими характерами работы, как осевое/внецентренное сжатие и изгиб в одной из плоскостей. Необходимо также проверить отсутствие бокового выпучивания (потери плоской формы изгиба) [4].

На основании вышеизложенного критерии выбора теории расчета в зависимости от характера работы холодногнутых стальных тонкостенных профилей, а также необходимые проверки, не входящие в эти теории, сведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Область применения отдельных методов расчета холодногнутых стальных тонкостенных профилей в зависимости от характера работы

№ п/п	Название теории расчета	Характер работы профиля	Дополнительные проверки, не входящие в теорию
1	Теория призматического стержня	– осевое растяжение	—————
2	Теория тонкостенного стержня В. З. Власова	– внецентренное растяжение; – внецентренное сжатие в одной/ двух плоскостях; – изгиб в одной/двух плоскостях; – боковое выпучивание при изгибе в одной плоскости; – кручение с изгибом	– проверка потери местной устойчивости
3	Теория закритической несущей способности	– осевое/внецентренное сжатие; – изгиб в одной плоскости	– проверка потери плоской формы изгиба

Невзирая на абсолютное различие в подходах при расчете по теории тонкостенного стержня В. З. Власова и по теории закритической несущей способности, на практике прослеживается достаточное сходство в результатах оценки несущей способности при расчете холодногнутых стальных тонкостенных профилей на осевое и внецентренное сжатие в одной из плоскостей [4].

На практике широкое распространение получила прежде всего теория закритической несущей способности, которая легла в основу существующих нормативных документов по расчету холодногнутых стальных тонкостенных профилей. Уточнения полуэмпирических формул, вносимые на основе проводимых испытаний тонкостенных профилей, прослеживались в разных редакциях нормативных документов. При соблюдении соотношений геометрических параметров профилей, для которых накоплен опыт проектирования и расчета, существующие методики позволяют с достаточной точностью оценивать напряженно-деформируемое состояние. Простота используемых формул по сравнению с расчетами по В. З. Власову, требующими хорошего знания теории прочности и выполнения громоздких расчетов, снижает возможность допущения ошибки ввиду неучтенных особенностей работы профилей.

Заключение

Подобные конструкции в строительстве являются инновационными; как следствие, имеются пробелы в нормативной и методической базах по их расчету. До того как были введены российские нормы проектирования СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутого оцинкованного профиля и гофрированных листов. Правила проектирования», область приме-

нения холодногнутого профиля в России ограничивалась сооружениями, проектная документация которых не требовала прохождения обязательной государственной экспертизы. Данное ограничение во многом было связано с отсутствием действующих нормативных документов на территории Российской Федерации и общепринятых методик расчета, а не с прочностными качествами самих профилей [15]. Проектирование вели с использованием иностранных нормативных документов и соответствующего опыта применения подобных конструкций.

В основе многих разделов СП 260.1325800.2016 лежат европейские нормы проектирования Eurocode EN 1993-1-3, опирающиеся на теорию закритической несущей способности. Предлагаемые методики, основанные на приближенных полуэмпирических формулах для расчета холодногнутого профиля, полученных в результате экспериментальных исследований, не соответствуют некоторым принципам строительной механики. Данное обстоятельство может привести к ошибкам при оценке несущей способности [16]. Стоит упомянуть, что данный свод правил, как и СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции», не распространяет свое действие на конструкции мостов. Мосты необходимо проектировать исходя из требований СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы», в котором в списке применяемых материалов тонкостенные стальные холодногнутые открытые профили отсутствуют, как и методика по их расчету [17]. Также необходим пересмотр требований, предъявляемых к минимальной толщине металла с точки зрения как толщины самих профилей, так и толщины крепежных фасонки, оказывающейся значительно завышенной для конструкций из тонкостенных профилей. Новые технологии

зачастую приходят в область мостостроения после наработки успешного опыта в других областях строительства ввиду повышенной ответственности и повышенных требований к мостовым сооружениям.

Вышеперечисленные факторы значительно затрудняют проектирование и ограничивают применение холодногнутого тонкостенных стальных профилей в мостовых конструкциях. На сегодняшний день до сих пор не разработаны технико-конструктивные решения несущих конструкций мостовых сооружений с использованием холодногнутого тонкостенных профилей. Данные конструкции уже успешно себя зарекомендовали и доказали свою эффективность в области сельскохозяйственного, промышленного, гражданского и других сфер строительства. Они могут стать альтернативой широко применяемым и распространенным конструкциям в мостостроении (деревянными, железобетонными, классическим стальными конструкциям, конструкциям из композитных материалов) и оптимальным решением при технико-экономическом обосновании в определенных условиях с учетом их особенностей, достоинств и недостатков.

Считается, что данные конструкции не предназначены для конструкций с ярко выраженными динамическими нагрузками [4]. Поэтому на первых этапах применения холодногнутого профилей в мостовых конструкциях будет целесообразно рассмотреть пешеходную нагрузку в качестве временной. Успешная апробация применения тонкостенных холодногнутого стальных профилей в основных конструкциях пешеходных мостов позволит рассмотреть использование данных конструкций под нагрузки от транспортных средств, при воздействиях которых необходимо учитывать усталостную долговечность.

Для успешного внедрения подобных конструкций в качестве несущих при строительстве мостовых сооружений необходимо разработать общепринятую методику по расчету подобных конструкций применительно к мостостроению. Ввиду сложности работы данных конструкций на внешнюю нагрузку, которую необходимо учитывать при их расчете и проектировании, целесообразно разработать ряд типовых решений для стандартных пролетов, позволяющих перекрывать наиболее распространенные преграды и транспортные пересечения, что значительно снизит затраты на проектирование и поспособствует широкому применению холодногнутого стальных тонкостенных профилей в несущих конструкциях мостовых сооружений.

Библиографический список

1. Тухарели В. Д., Тухарели А. В., Чередниченко Т. Ф. Строительство зданий с использованием легких металлических конструкций: учеб. пособие. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2018. 132 с.
2. Ведяков И. И., Одесский П. Д. Современные отечественные стандарты и вопросы расширения применения металлических конструкций в строительстве // Вестник НИЦ «Строительство», 2019. № 3 (22). С. 42–53.
3. Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни. М.: Физматгиз, 1959. 568 с.
4. Брудка Я., Лубиньски М. Легкие стальные конструкции. Изд. 2-е, доп. / пер. с польск.; под ред. С. С. Кармилова. М.: Стройиздат, 1974. 342 с.
5. Пособие по проектированию строительных конструкций малоэтажных зданий из стальных холодногнутого оцинкованных профилей (ЛСТК) [Электронный ресурс] / под ред. Т. В. Назмеевой. Санкт-Петербург: Первый ИПХ, 2021. 238 с.

6. Зеньков Е.В. Особенности работы стоечного профиля из легких стальных тонкостенных конструкций на устойчивость // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 3-1 (105). С. 54–59.
 7. Рыбаков В. А. Основы строительной механики легких стальных тонкостенных конструкций. СПб: СПбГПУ, 2015. 207 с.
 8. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81*. М., 2017. 140 с.
 9. СНиП II-23–81*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. 96 с.
 10. Нехаев Г.А. Легкие металлические конструкции. Тула: Издатель ООО «ПрофСтальПрокат», 2012. 93 с.
 11. Yu W.-W., LaBoube R.A. Cold-formed steel design: fourth edition. New York: John Wiley & Sons Inc., 2010. 491 p.
 12. Семко В.А. Расчет несущих и ограждающих конструкций из стальных холодноформованных профилей в соответствии с Еврокодом 3. Киев: Украинский Центр Стального Строительства (УЦСС), 2015. 143 с.
 13. Karman T. von, Sechler E.E., Donnell L.H. The Strength of Thin Plates in Compression // Transactions, Applied Mechanics Division. 1932. P. 53–57.
 14. Расчет элементов из стальных холодноформованных профилей в соответствии с Еврокодом 3 / Э. Уэй и др. // Украинский Центр Стального Строительства, 2015. 102 с.
 15. Ватин Н.И., Синельников А.С. Большепролетные надземные пешеходные переходы из легкого холодногнутого стального профиля // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. № 1. С. 47–52.
 16. Смирнов М.О. Прочность и устойчивость стержневых элементов конструкций из холодногнутого профиля с фактически редуцированным сечением: дисс. ... канд. техн. наук: 2.1.1. СПб.: СПбГАСУ, 2021. 157 с.
 17. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84*. М., 2011. 341 с.
- Дата поступления: 25.05.2024
Решение о публикации: 09.07.2024

Контактная информация:

СОЛОВЬЕВ Николай Андреевич — аспирант;

nikolai_solovev@yahoo.com

ЧИЖОВ Сергей Владимирович — канд. техн.

наук, доцент; sergchizh@yandex.ru

АВДЕЙ Юлия Владимировна — канд. пед. наук,

доцент; avdej_yuliya@yandex.ru

Methodological justification for the calculation of cold-formed steel thin-walled profiles in bridge structures at the project stage

N. A. Solovev, S. V. Chizhov, Yu. V. Avdey

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

For citation: Solovev N. A., Chizhov S. V., Avdey Yu. V. Methodological justification for the calculation of cold-formed steel thin-walled profiles in bridge structures at the project stage // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 622–637. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-622–637

Abstract

Objective: perform a comparative analysis of the features of existing theories for calculating cold-formed steel thin-walled profiles, consider the need to develop a calculation methodology and justify the criteria for the applicability of cold-formed steel thin-walled profiles in the main structures of bridge structures, justify the feasibility of using structures from thin-walled cold-formed profiles in relation to bridge construction in order to reduce metal consumption and increase economic efficiency. **Methods:** a comparison of existing theories for calculating cold-formed steel thin-walled profiles at the moment, a review of the existing practice of application and technical and economic indicators of thin-walled profiles in the field of industrial and civil construction. **Results:** a comparative analysis of the features, advantages and disadvantages of individual theories for calculating cold-formed steel thin-walled profiles has been carried out, criteria for choosing a calculation theory depending on the nature of their work have been established. Some technical and economic indicators of similar structures made of cold-formed steel thin-walled profiles in the structures of buildings for industrial, civil, agricultural and other purposes are presented. The analysis showed that these structures have lower metal consumption compared to conventional steel structures. **Practical importance:** the need to develop a methodology for calculating structures made of cold-formed steel thin-walled profiles in relation to bridge construction is identified. This technique has practical significance for the implementation of thin-walled profiles in the main structures of bridges. A number of factors are given that may be decisive in favor of choosing cold-formed steel thin-walled profiles as part of the load-bearing structures of the main beams of bridges with an appropriate feasibility study in certain conditions, taking into account their features, advantages and disadvantages.

Keywords: cold-formed thin-walled steel profile, LGSF, Vlasov theory, theory of supercritical load-bearing capacity, buckling, bimoment, local stability, pedestrian bridge

References

1. Tuhareli V.D., Tuhareli A.V., Cherednichenko T.F. Stroitel'stvo zdaniy s ispol'zovaniem legkih metallicheskiy konstrukcij: ucheb. posobie. Volgograd: Volgogradskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2018. 132 s. (In Russian)
2. Vedyakov I.I., Odesskij P.D. Sovremennye otechestvennye standarty i voprosy rasshireniya primeneniya metallicheskih konstrukcij v stroitel'stve // Vestnik NIC "Stroitel'stvo". 2019. № 3 (22). S. 42–53. (In Russian)
3. Vlasov V.Z. Tonkostennye uprugie sterzhni. M.: Fizmatgiz, 1959. 568 s. (In Russian)
4. Brudka Ya., Lubin'ski M. Legkie stal'nye konstrukcii. Izd. 2-e, dop. / per. s pol'sk.; pod red. S.S. Karmilova. M.: Strojizdat, 1974. 342 s. (In Russian)
5. Posobie po proektirovaniyu stroitel'nyh konstrukcij maloetazhnyh zdaniy iz stal'nyh holodnog-nutyh ocinkovannyh profilej (LSTK) [Elektronnyj resurs] / pod. red. T.V. Nazmeevoj. Sankt-Peterburg: Pervyj IPH, 2021. 238 s. (In Russian)
6. Zen'kov E.V. Osobennosti raboty stoechnogo profilya iz lyogkih stal'nyh tonkostennyh konstrukcij na ustojchivost' // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2021. № 3-1 (105). S. 54–59. (In Russian)
7. Rybakov V.A. Osnovy stroitel'noj mekhaniki legkih stal'nyh tonkostennyh konstrukcij. SPb: SPbG-PU, 2015. 207 s. (In Russian)
8. SP 16.13330.2017. Stal'nye konstrukcii. Aktualizirovannaya redakcija SNiP II-23–81*. M., 2017. 140 s. (In Russian)
9. SNiP II-23–81*. Stal'nye konstrukcii / Gosstroj SSSR. M.: CИTP Gosstroya SSSR, 1990. 96 s. (In Russian)
10. Nekhaev G.A. Legkie metallicheskie konstrukcii. Tula: Izdatel' OOO "ProfStal'Prokat", 2012. 93 s. (In Russian)
11. Yu W.-W., LaBoube R.A. Cold-formed steel design: fourth edition. New York: John Wiley & Sons Inc., 2010. 491 p.
12. Semko V.A. Raschet nesushchih i ograzhdayushchih konstrukcij iz stal'nyh holodnoformovannyh

profilej v sootvetstvii s Evrokodom 3. Kiev: Ukrainskij Centr Stal'nogo Stroitel'stva (UCSS), 2015. 143 s. (In Russian)

13. Karman T. von, Sechler E. E., Donnell L. H. The Strength of Thin Plates in Compression // Transactions, Applied Mechanics Division. 1932. P. 53–57.

14. Raschet elementov iz stal'nyh holodnoformovannyh profilej v sootvetstvii s Evrokodom 3 / E. Uej i dr. // Ukrainskij Centr Stal'nogo Stroitel'stva, 2015. 102 s. (In Russian)

15. Vatin N. I., Sinel'nikov A. S. Bol'sheproletnye nadzemnye peshekhodnye perekhody iz legkogo holodnognutogo stal'nogo profilya // Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij. 2012. № 1. S. 47–52. (In Russian)

16. Smirnov M. O. Prochnost' i ustojchivost' sterzhnevyyh elementov konstrukcij iz holodnognutyyh pro-

filej s fakticheski reducirovannym secheniem: diss. ... kand. tekhn. nauk: 2.1.1. SPb.: SPbGASU, 2021. 157 s. (In Russian)

17. SP 35.13330.2011. Mosty i truby. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.05.03–84*. M., 2011. 341 s. (In Russian)

Received: 25.05.2024

Accepted: 09.07.2024

Author's information:

Nikolai A. SOLOVEV — Postgraduate Student;
nikolai_solovev@yahoo.com

Sergey V. CHIZHOV — PhD in Engineering,
Associate Professor; sergchizh@yandex.ru

Yuliya V. AVDEY — PhD in Pedagogy, Associate
Professor; avdej_yuliya@yandex.ru

УДК 625.033.34

Оценка предложений по формированию сети альтернативных маршрутов следования коридора «Север — Юг»

Е. В. Рязанова, С. М. Наурузбаев, А. О. Куделина

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

Для цитирования: *Рязанова Е. В., Наурузбаев С. М., Куделина А. О.* Оценка предложений по формированию сети альтернативных маршрутов следования коридора «Север — Юг» // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения им. Александра I. СПб.: ПГУПС. 2024. Т. 21, вып. 3. С. 638–651. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-638-651

Аннотация

Цель: разработать предложения по освоению ожидаемого роста объемов перевозок по транспортному коридору «Север — Юг». Провести оценку пропускной способности участка Верхний Баскунчак — Астрахань — порт Оля как самого грузонапряженного, на котором происходит слияние грузопотока с нескольких направлений. Показать необходимость разгрузки основного направления коридора «Север — Юг» и формирования сети альтернативных маршрутов следования в транспортном коридоре для обеспечения гарантии перевозок на случай форс-мажорных обстоятельств. Рассмотреть возможность привлечения параллельных маршрутов следования через Северо-Кавказскую железную дорогу (СКЖД). **Методы:** расчет пропускной способности проведен с использованием методики, применяемой в ОАО «РЖД», и авторских предложений, учитывающих дополнительные резервы пропускной способности. Использованы общелогические методы — количественный и качественный анализ и синтез, индукция и дедукция, аналогии, классификации, сочетание исторического и логического анализа. Предложенный универсальный алгоритм, позволяющий оценивать возможность выбора параллельных ходов, может быть рекомендован к практическому использованию. **Результаты:** установлено максимальное количество поездов, которое можно перенаправить на параллельные маршруты с учетом имеющихся пропускных способностей и их загруженности экспортным грузопотоком в направлении портов Азово-Черноморского бассейна. Показана актуальность направления развития тяжеловесного движения, направленного на уменьшение потребной пропускной способности, и сокращение межпоездных интервалов для увеличения наличной пропускной способности. Сформирован универсальный алгоритм, позволяющий оценивать возможность выбора параллельных ходов. **Практическая значимость:** показана необходимость освоения ожидаемого грузопотока и недопущения его ухода на конкурирующие направления, например через Суэцкий канал. В сложившихся политических и экономических условиях международный транспортный коридор (МТК) «Север — Юг» изменяет свой статус: из альтернативы Суэцкому каналу превращается в один из приоритетных маршрутов следования российского экспортного грузопотока.

Ключевые слова: транспортный коридор, грузопоток, участок, пропускная способность, мероприятие, параллельный маршрут следования, алгоритм

Введение

Актуальность темы подтверждается наблюдаемым увеличением объемов грузопотоков через составляющие элементы инфраструктуры МТК «Север — Юг», переориентацией экономических связей России и необходимостью изменения технологии

работы ключевых транспортных узлов на этом направлении для выполнения новых функций.

Значимость темы исследования заключается в освоении ожидаемого грузопотока и недопущении его ухода на конкурирующие направления, например через Суэцкий канал [1–3].

Раньше в связи со второстепенностью роли данного маршрута постоянно откладывалось развитие транспортной инфраструктуры коридора, связывающего север страны с югом по маршруту Санкт-Петербург — Москва — Рязань — Мичуринск — Ртищево — Саратов — Волгоград / Урбах — Верхний Баскунчак — Астрахань, разветвляющегося в южной части на три направления, самое короткое из которых Транскаспийское с использованием российских морских портов Астрахань и Оля. Сегодня эта задача актуализирована для улучшения связи со странами Персидского залива и Южной Азии и обеспечения перевозок прогнозируемых объемов грузов, оценка которых проводилась в [4], помимо тех, которые уже перевозятся на данном направлении. Поскольку развитие железнодорожной инфраструктуры является длительным процессом, для освоения ожидаемого роста грузопотока сегодня особый интерес представляют технологические решения, к которым относятся организация тяжеловесного движения поездов и сокращение межпоездного интервала.

При этом в случае форс-мажорных обстоятельств для обеспечения гарантии пропуска грузопотоков в этом направлении необходимо наличие альтернативных параллельных железнодорожных маршрутов следования, в качестве которых предлагается использовать маршрут, проходящий через СКЖД

и выходящий к портам Каспийского моря и западному ответвлению коридора «Север — Юг». Учитывая загруженность отдельных участков СКЖД, развитие тяжеловесного движения и сокращение интервала между поездами на этом направлении также является актуальным направлением.

Это обеспечит эффективное использование железнодорожной инфраструктуры и сокращение транспортных расходов [5–7]. В связи с этим продукция российского производства станет конкурентоспособной, что позволит повысить доходы государства.

Основная часть

Приволжская железная дорога играет ключевую роль в обеспечении перевозок экспортно-импортных грузов в южной части коридора. На ее территории располагаются два крупных порта — Оля и Астрахань, которые входят в Транскаспийское направление и обеспечивают перевозки морским транспортом со странами Южной Азии. Именно на этом направлении происходит слияние маршрутов по станции Верхний Баскунчак. В связи с этим участок от Верхнего Баскунчака до Астрахани-II является самым загруженным. Безусловно, выбор того или иного мероприятия по повышению пропускной способности зависит от предстоящего объема перевозок и достигаемых технико-экономических показателей [8]. Если учесть прогнозируемый рост грузопотоков в соответствии с [9] до 27,9 млн т в год, загруженность железнодорожной линии увеличится [10]. Методические подходы оценки потенциала грузопотоков транспортного коридора являются приоритетными в исследованиях [11–13].

В связи с этим необходимо оценить пропускную способность участка Верхний Баскунчак — порт Оля.

В работе [4] была исследована пропускная способность, установлено, что ее будет не хватать, и были рассмотрены предложения по ее увеличению.

Расчет наличной пропускной способности выполнялся по существующей методике, утвержденной приказом Минтранса России от 18.07.2018 № 266, по формуле (1) для двухпутного участка и по формуле (2) для однопутного:

$$N_{\text{н}}^{\text{чет}} = \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot \alpha_{\text{н}}}{I}, \text{ поездов/сут.}, \quad (1)$$

где $t_{\text{тех}}$ — продолжительность времени, необходимая для выполнения работ по содержанию технических устройств, ($t_{\text{тех}} = 75$ мин.);

$\alpha_{\text{н}}$ — коэффициент, учитывающий отказы в работе технических средств, ($\alpha_{\text{н}} = 0,9-0,96$);

I — расчетный интервал времени между поездами попутного направления ($I = 8$ мин.).

$$N_{\text{н}}^{\text{чет}} = \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot \alpha_{\text{н}}}{T_{\text{пер}}}, \text{ поездов/сут.}, \quad (2)$$

где $T_{\text{пер}}$ — период графика движения поездов на ограничивающем перегоне, мин.

Участки Верхний Баскунчак — Аксарайская и Аксарайская — Астрахань-II двухпутные, участок Астрахань-II — Яндыки однопутный с двухпутными вставками и участок Яндыки — Порт Оля однопутный с одним перегонем.

Для участка Астрахань-II — Яндыки ограничивающим перегонем является Трусово-Ильменный со временем хода 17 мин., а время хода на единственном перегоне на участке Яндыки — Порт Оля — 60 мин. (рис. 1). Период графика для этих участков рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{пер}} = t'_x + t''_x + \sum \tau_{\text{ст}} + \sum \tau_{\text{р.з.}}, \text{ мин.}, \quad (3)$$

где t'_x, t''_x — время движения между отдельными пунктами четных и нечетных поездов, мин.;

$\tau_{\text{ст}}$ — станционные интервалы времени, мин.;

$\sum \tau_{\text{р.з.}}$ — суммарное время движения пары поездов по ограничивающему перегону с учетом их разгонов и замедлений, мин.

Расчет потребной пропускной способности участков с учетом существующего пассажирского и пригородного движения производился по формуле:

$$N_{\text{потр}} = [N_{\text{гр}} + N_{\text{пс}} + N_{\text{сб}}(\epsilon_{\text{сб}} - 1)] \cdot \beta_{\text{рез}}, \quad (4)$$

поездов/сут.,

где $N_{\text{гр}}, N_{\text{пс}}, N_{\text{сб}}$ — число грузовых, пассажирских и сборных поездов;

$\beta_{\text{рез}}$ — резерв пропускной способности участка, ($\beta_{\text{рез}} = 1,1-1,15$).

Средний коэффициент съема грузовых поездов пассажирскими согласно [14] выполняется по формуле:

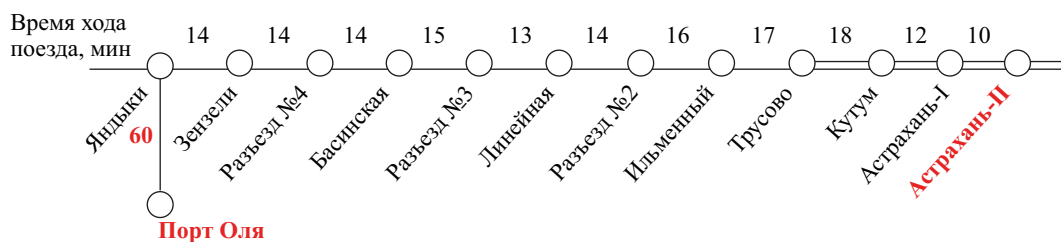


Рис. 1. Схема участка Астрахань-II — порт Оля

$$\varepsilon_{\text{пс}} = \frac{t_{\text{гр}}(1-\Delta) \cdot (0,8 - 0,005 \cdot n_{\text{пасс}})}{I} + 1,3, \quad (5)$$

где $t_{\text{гр}}$ — время движения грузового поезда по ограничивающему перегону ($t_{\text{гр}} = 70$ мин.);

Δ — соотношение суммарного времени хода пассажирских поездов к суммарному времени хода грузовых поездов ($\Delta = 0,62$);

$n_{\text{пасс}}$ — общее количество пассажирских поездов на участке ($n_{\text{пасс}} = 0,62$).

Если учесть, что для направлений, на которых ведутся работы по развитию инфраструктуры, сегодня согласовывается новая методика расчета пропускной способности, согласно которой предусматривается учет коэффициента надежности транспортного обслуживания и определение суточной продолжительности времени, необходимого для выполнения работ по строительству новых объектов, дефицит пропускной способности еще больше увеличится. В формуле (6) в $t_{\text{тех}}$, кроме продолжительности времени, необходимого для выполнения работ по содержанию технических устройств, учитывается время на плановые виды ремонта устройств и строительство новых объектов, а коэффициент $\alpha_{\text{ТО}}$, кроме коэффициента надежности $\alpha_{\text{н}}$, учитывает $\alpha_{\text{ТН}}$ — коэффициент технологических нарушений:

$$N_{\text{нал}} = \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot \alpha_{\text{ТО}}}{T_{\text{пер}}}. \quad (6)$$

Для однопутного участка $t_{\text{тех}}$ составит:

$$t_{\text{тех}} = 75 + t_{\text{стр}}, \text{ мин.}$$

Для двухпутного участка:

$$t_{\text{тех}} = 150 + t_{\text{стр}}, \text{ мин.},$$

где $t_{\text{стр}}$ — потребное время в среднем в сутки в годовом разрезе, необходимое для строительства новых или реконструкции существующих объектов, мин.

Расчет максимального количества грузовых поездов, которое можно пропустить на участках при существующих размерах пассажирского движения и местных поездов, производился по формуле:

$$N_{\text{гр}} = \frac{N_{\text{нал}}}{\beta_{\text{рез}}} - (N_{\text{пс}} \cdot \varepsilon_{\text{пс}} - N_{\text{сб}} \cdot (\varepsilon_{\text{сб}} - 1)), \quad (7)$$

поездов,

где $N_{\text{нал}}$ — наличная пропускная способность; $\beta_{\text{рез}}$, $N_{\text{сб}}$ принимаем как в формуле (4); $N_{\text{пс}}$ — число пассажирских поездов ($N_{\text{пс}} = 12$).

Расчет пропускной способности основного участка Приволжской железной дороги Верхний Баскунчак — Порт Оля при существующей технологии и прогнозируемом объеме грузопотока выполнялся по формулам (1)–(5), результаты расчета сведены в табл. 1.

Согласно полученным результатам, резервов пропускной способности не хватает. В связи с этим необходимы меры по освоению прогнозируемого грузопотока.

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчета пропускной способности по участкам

Участки	Верхний Баскунчак — Аксарайская	Аксарайская — Астрахань-II	Астрахань-II — Яндыки	Яндыки — Порт Оля
$T_{\text{пер}}$, мин.	—	—	40	126
$N_{\text{н}}^{\text{ч.п.}}$, поездов/сут.	154	154	32	11
$\varepsilon_{\text{пс}}$	3,61	3,08	—	—
$N_{\text{потр}}$, поездов/сут.	174	134	28	28

В качестве мероприятий по повышению пропускной способности исследуемого участка рассматриваются:

- сокращение межпоездных интервалов за счет оборудования поездов локомотивной сигнализацией с подвижными блок-участками (АЛСО), что позволяет увеличить наличную пропускную способность [15];
- внедрение частично-пакетного графика, позволяющее снизить коэффициент сѐма.

В результате внедрения этих мероприятия на участке Верхний Баскунчак — Аксарайская по-прежнему будет наблюдаться дефицит пропускной способности. Поэтому дополнительно рассматривается организация тяжеловесного движения поездов [16, 17]. Результаты оценки пропускной способности участков после внедрения предлагаемых мероприятий представлены на рис. 2.

Согласно полученным результатам, для участков Верхний Баскунчак — Аксарайская и Аксарайская — Астрахань-II мера по развитию тяжеловесного движения является достаточной для освоения всего прогнозируемого грузопотока на данном направлении. Однако на участке Яндыки — Порт Оля данное мероприятие не позволяет освоить весь объем ожидаемого грузопотока. Для однопутного перегона Яндыки — Порт Оля требуется развитие инфраструктуры в виде укладки разъезда для сокращения периода графика.

Еще одним организационным мероприятием может стать перераспределение вагонпотоков по альтернативным маршрутам следования, одним из которых является маршрут через СКЖД. Необходимость развития альтернативных маршрутов в транспортном коридоре подтверждает ситуация, возникшая летом 2022 и 2023 годов на Суэцком канале, который является основным

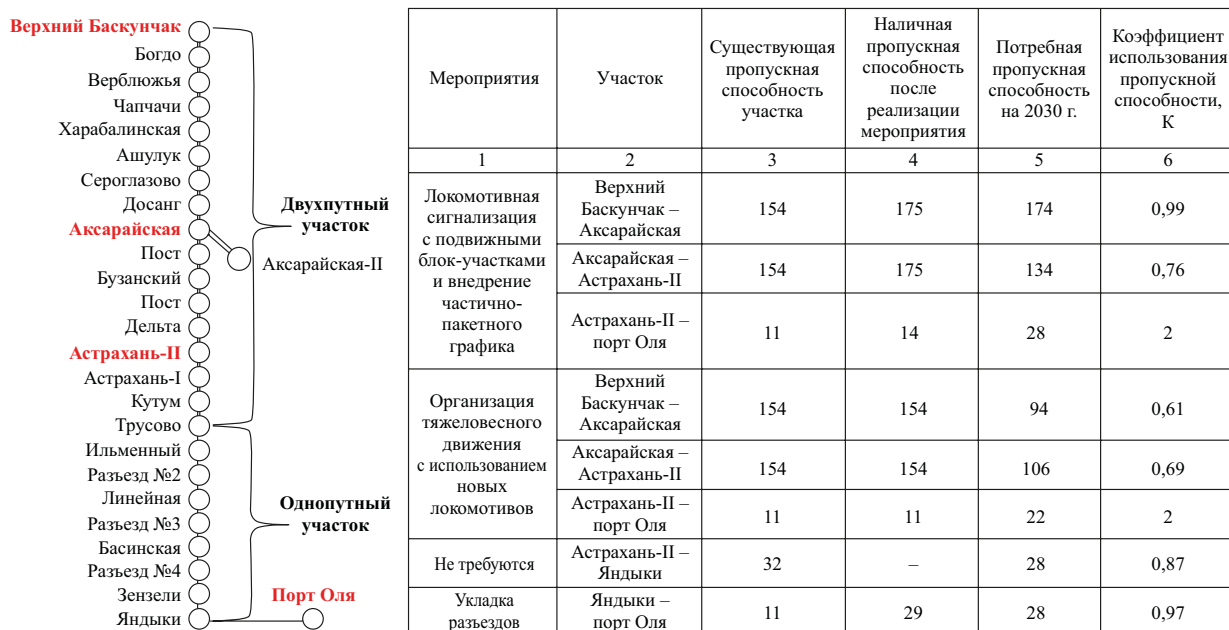


Рис. 2. Оценка повышения пропускной способности в зависимости от реализованного мероприятия

инфраструктурным элементом транспортного коридора, конкурирующего с рассматриваемым в работе коридором «Север — Юг». Канал был длительное время закрыт по причине обмеления, в связи с чем были задержаны суда и грузовладельцы понесли значительные потери.

Для предотвращения потерь грузовладельцев на направлении «Север — Юг» должен формироваться новый подход к организации следования поездов в одном направлении с привлечением параллельных маршрутов следования.

С этой целью установлено максимальное количество поездов, которое можно перенаправить на параллельные маршруты с учетом имеющихся пропускных способностей и их загруженности экспортным грузопотоком в направлении портов Азово-Черноморского бассейна.

При разработке предложений в исследовании учтены особенности организации движения поездов в российских условиях. В отличие от зарубежного опыта, где характерной особенностью тяжеловесного движения является специализация отдельных линий железных дорог, тяжеловесное движение в России совмещается с движением пассажирских поездов, а также организуется на маршрутах со значительной протяженностью и разнообразием климатических условий.

При рассмотрении технологии виртуальной автосцепки (ВСЦ), мероприятий по сокращению межпоездных интервалов, в отличие от зарубежного опыта, где эта технология рассматривается для пассажирского движения, в России технология рассматривается на участках с грузовым движением.

Основное направление через СКЖД, которое будет наиболее перспективно для грузового движения, входящее в коридор

«Север — Юг», — это Котельниково — Тихорецкая и Тихорецкая — Самур. Но при этом, если учитывать расстояния по основному маршруту следования, длина которого составляет 3011 км, при альтернативном маршруте следования через СКЖД по данному участку расстояние маршрута до Самура составит 3320 км, что на 309 км больше основного маршрута следования.

Основными участками, входящими в маршрут Котельниково — Тихорецкая, являются Котельниково — Куберле — Сальск — Тихорецкая протяженностью 345 км. В сторону пограничного перехода Самура (Россия) / Ялма (Азербайджан) с Тихорецкой рассмотрим маршрут Тихорецкая — Самур, включающий в себя следующие участки: Тихорецкая — Кавказская — Армавир-Ростовский — Невинномысская — Минеральные Воды — Прохладная — Стодеревская — Гудермес — Хасав-Юрт — Махачкала — Дербент — Самур, протяженностью 879 км. Таким образом, общая протяженность всего маршрута составит 1224 км.

Данный маршрут является преимущественно двухпутным, кроме однопутного участка Прохладная — Стодеревская. Направление не полностью электрифицировано, участок от станции Стодеревской до станции Хасав-Юрт не электрифицирован, участки от Тихорецкой до Стодеревской, Хасав-Юрт — Дербент электрифицированы переменным током 25 000 В, участок Дербент — Самур электрифицирован постоянным током 3000 В. На электрифицированных участках обращаются локомотивы серий ВЛ80С, К, Т, 1,5ВЛ80С, на неэлектрифицированных — тепловозы серий 2ТЭ10в/и, 2ТЭ116в/и, на участке Дербент — Самур — локомотивы серии 2ЭС4К, весовые нормы на данных участках — от 3500 до 4500 т.

Расчет ведется по стандартным методическим указаниям, в соответствии с которыми интервал между поездами на двухпутном участке принят равным $I = 8$ мин., а для расчета периода графика на однопутном участке Прохладная — Стодеревская установлен ограничивающий перегон Черноярская — Луковская с временем хода 17 мин., который определил размер периода графика, равный 39 мин. При этом для однопутного участка в условиях недостаточной надежности путевого хозяйства, приводящей к невыполнению перегонных времен хода, для обеспечения достаточного резерва пропускной способности предлагается организовать частично-пакетный график пропуска поездов.

На основании полученных значений пропускной способности по формуле (7) устанавливается максимальное количество грузовых поездов, которое можно пропустить на участках при существующих размерах пассажирского движения и местных поездов. На основании этого устанавливается резерв пропускной способности, который можно использовать для пропуска допол-

нительных поездов, следующих в рамках коридора «Север — Юг».

Расчет наличной пропускной способности участков рассматриваемого направления, коэффициентов съема пропускной способности поездами различных категорий, максимального количества грузовых поездов, которое можно пропустить по участку, и резерва пропускной способности выполнялся по формулам (1)–(5), (7) и представлен в табл. 2.

Согласно полученным результатам, при существующих объемах работы количество поездов, следующих по маршруту коридора «Север — Юг», которое можно пустить по альтернативному маршруту следования через СКЖД с учетом ограничивающего однопутного участка, составляет 10 единиц.

Еще одним альтернативным маршрутом следования грузов по коридору «Север — Юг» на перспективу может стать маршрут через порт Усть-Донецк, обслуживаемый СКЖД. Данный маршрут позволяет организовать мультимодальные перевозки с привлечением железнодорожного транспорта от

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета пропускной способности участков Котельниково — Тихорецкая, Тихорецкая — Самур и резерва пропускной способности

Участок	Котельниково — Тихорецкая (двухпутный)	Прохладная — Стодеревская (однопутный) на Тихорецкая — Самур
Наличная пропускная способность, поезда/сут.	154	35
Потребная пропускная способность грузовых поездов	94	25
Размеры грузового движения, поезда	57	16
Размеры пассажирского движения, поезда	12	3
Размеры движения местных поездов, поезда	1	1
Коэффициент съема пассажирскими поездами	1,68	1,8
Коэффициент съема сборными поездами	5	1,14
Максимальное количество грузовых поездов, поезда	117	26
Резерв пропускной способности	60	10

пункта погрузки до стыка СКЖД Сохрановка и далее до порта Усть-Донецк, где осуществляется перевалка на суда «река — море» и дальнейшее следование груза по Волго-Донскому каналу с выходом в Каспийское море. Привлекательность данного маршрута обеспечивается сокращением расстояния следования грузов. Расстояние следования по основному маршруту коридора «Север — Юг» от Санкт-Петербурга до порта Астрахань составляет 3339,5 км. Суммарное расстояние следования по предлагаемому маршруту, включающему железнодорожные перевозки от станции Бусловской Октябрьской железной дороги (ОЖД) до Усть-Донецкой СКЖД, а затем речные перевозки по Волго-Донскому каналу до Астрахани, составляет 2909 км, что намного меньше основного маршрута.

Особенностью данного маршрута является то, что железнодорожный участок от Сохрановки до Лесостепи, откуда происходит ответвление на порт Усть-Донецк, является самым напряженным на СКЖД в связи с пропуском значительного количества пассажирских поездов, и резерв его пропускной

способности полностью исчерпан. Однако от станции Сохрановка до станции Лихая уже внедрили систему интервального регулирования движения поездов АЛСО, позволившую сократить интервал следования поездов до 6 мин.

Исходя из того, что ожидаемый эффект повышения пропускной способности возникнет только в случае оборудования всего участка системой АЛСО, предположим, что на всем участке от Сохрановки до Лесостепи будет обеспечена наличная пропускная способность в размере 211 пар поездов. С учетом этого оценивается наличие резерва пропускной способности на двухпутном участке.

Участок Лесостепь — Усть-Донецкая является однопутным с ограничивающим перегоном Кадамовка — Усть-Донецкая, период графика на котором составляет 138 мин. В связи с этим резерв пропускной способности участка незначительный. Результаты расчета пропускной способности и ее резерва для пропуска дополнительных поездов представлены в табл. 3.

Согласно полученным результатам, максимальное количество грузовых поездов,

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчета пропускной способности участков Сохрановка — Лесостепь, Лесостепь — Усть-Донецк и резерва пропускной способности

Участок	Сохрановка — Лесостепь (двухпутный)	Лесостепь — Усть- Донецк (однопутный)
Наличная пропускная способность, поезда/сут.	211	10
Потребная пропускная способность грузовых поездов	207	7
Размеры грузового движения, поезда	66	1
Размеры пассажирского движения, поезда	72	1
Размеры движения местных поездов, поезда	0	0
Коэффициент съема пассажирскими поездами	1,57	4,6
Коэффициент съема сборными поездами	0	0
Максимальное количество грузовых поездов, поезда	70	4
Резерв пропускной способности	4	3

которое можно перенаправить с основного маршрута следования коридора «Север — Юг» на альтернативный при условии оборудования всего участка системой АЛСО и сохранения существующих размеров движения составит три поезда.

В результате расчетов пропускной способности основного направления и альтернативного ответвления на СКЖД можно утверждать, что при загрузке основного маршрута СКЖД может принять на себя лишь небольшую часть поездов с Приволжской доро-

ги — 10 поездов на направление Котельниково — Самур и три поезда по участку Сохрановка — Усть-Донецкая. В случае привлечения 10 поездов на альтернативные маршруты СКЖД на основном ходе коридора «Север — Юг» сокращается требуемое количество поездов. В этом случае достаточно для внедрения одного мероприятия по повышению пропускной способности на направлении Верхний Баскунчак — Астрахань. В связи с чем затраты на развитие коридора можно сократить.

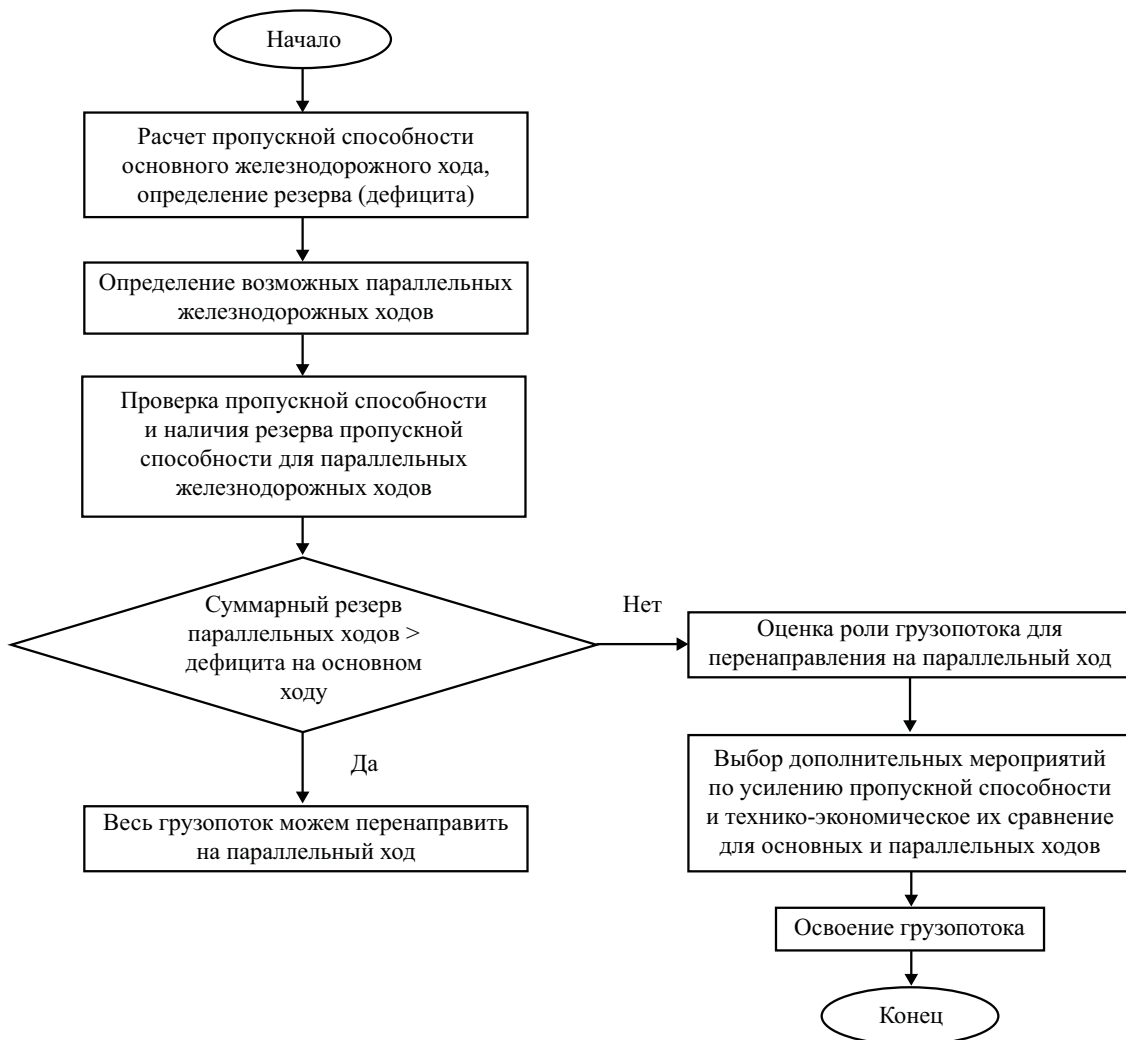


Рис. 3. Фрагмент алгоритма оценки возможности перераспределения грузопотоков на параллельные ходы в системе МТК с учетом пропускной способности направлений

На основании выполненного исследования сформирован универсальный алгоритм, позволяющий оценивать возможность выбора параллельных ходов (рис. 3).

Заключение

В результате оценки пропускной способности основного направления коридора «Север — Юг» и альтернативного ответвления на СКЖД можно утверждать, что при загрузке основного маршрута коридора «Север — Юг» СКЖД по грузовому ходу Котельниково — Тихорецкая и далее по участку Тихорецкая — Самур может принять на себя лишь небольшую часть грузопотока с Приволжской дороги — семь поездов. По пассажирскому ходу в направлении порта Усть-Донецк ввиду большой загрузки при существующем техническом оснащении не имеется возможностей освоить дополнительный грузопоток с Приволжской дороги. Однако ввиду дальнейшей реализации мероприятий по развитию организации тяжеловесного движения и внедрения системы АЛСО, позволяющей в перспективе уменьшить интервалы между поездами до 4 мин., появится возможность пропускать дополнительные поезда, в том числе в порт Усть-Донецк для организации доставки части грузопотока коридора «Север — Юг» с привлечением внутренних водных путей Волго-Донского канала. В случае привлечения части поездов на СКЖД на основном направлении коридора «Север — Юг» сокращается потребность в пропускной способности. В этом случае необходимость повышения пропускной способности на направлении Верхний Баскунчак — Аксарайская — Астрахань — Порт Оля будет наблюдаться только на однопутном участке Яндыки — Порт Оля.

Для эффективного использования полученных мощностей необходимо оптималь-

ное распределение грузопотока между ними. Для дальнейшей оценки перераспределения грузов по альтернативным маршрутам следования сформулированы основные критерии оптимизации:

1. Сроки доставки ($F_1 \rightarrow \min$), которые включают расчетные значения, рассчитываемые по правилам исчисления сроков доставки грузов.

2. Транспортные затраты ($F_2 \rightarrow \min$), которые включают в себя расчет железнодорожного тарифа, осуществляемый по прейскуранту № 10-01 «Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые Российскими железными дорогами», расчет морского тарифа и тарифа на перевалку для маршрутов с интермодальными перевозками грузов.

3. Надежность доставки, которая определяется насыщенностью полигона продвижения транспортными единицами ($F_3 \rightarrow \min$), влияющая на скорость и время доставки с учетом фактических задержек в пути следования.

4. Сохранность, определяемая минимизацией потерь при перегрузке груза с одного вида транспорта на другой ($F_4 \rightarrow \min$), которые присутствуют при интермодальных перевозках, а при прямых железнодорожных перевозках стремятся к нулю.

С использованием этих критериев планируется решить оптимизационную задачу по пропуску грузопотока с учетом затрат на развитие рассматриваемого направления и расходов на перевозку.

Библиографический список

1. Mathematical modelling of the railway station's technological parameters in transport corridor system of export traffic increasing volumes / E. V. Ryazanova [et al.] // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 431. P. 13. DOI: 10.1051/e3sconf/202343108014.

2. Zhuravleva N., Gulyi I. Economic assessment of the cost of reducing the delivery time for cargo owners when sending goods through the international transport corridor “North — South” // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 460. P. 7. DOI: 10.1051/e3s-conf/202346003014.
3. Kazanskaya L., Chetchuev M. Assessment of development prospects, economic effects and return on investment in the infrastructure of the international transport corridor “North — South” // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 460. P. 7. DOI: 10.1051/e3s-conf/202346003015.
4. Меры по согласованному развитию инфраструктуры на подходах к порту Оля в условиях прогнозируемого роста грузопотоков по транспортному коридору «Север — Юг» / В. Н. Зубков [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1. С. 63–75. DOI: 10.46973/0201–727X_2023_1_63.
5. Перспективы исследований транспортно-технологических параметров узловых пунктов концентрации и распределения припортовых вагонопотоков / В. И. Задорожний [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (85). С. 72–81. DOI: 10.46973/0201–727X_2022_1_72.
6. Числов О. Н., Безусов Д. С., Заяц С. Г. Вариант оценки этапности развития припортовых станций на направлениях южнороссийских транспортных коридоров // Труды РГУПС. 2014. № 2. С. 153–163.
7. Числов О. Н., Безусов Д. С. Методы выбора и оценки технико-технологических параметров припортовых грузовых станций // Транспорт: наука, образование, производство: сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Транспорт-2019». Ростов н/Д.: РГУПС, 2019. Т. 1: Технические науки. С. 76–80.
8. Чеботарева Е. А. Анализ мероприятий по повышению пропускной способности участков Северо-Кавказской железной дороги // Транспорт: наука, техника, управление. 2022. № 1. С. 29–34.
9. Международный транспортный коридор «Север — Юг»: создание транспортного каркаса Евразии: доклад 21/5 / Е. Винокуров [и др.]. Алматы; М.: Евразийский банк развития. 2021. С. 124.
10. Зубков В. Н., Рязанова Е. В., Наурузбаев С. М. Совершенствование работы станции Астрахань-II в системе международного транспортного коридора «Север — Юг» в условиях ожидаемого роста грузопотока // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2022. № 4. С. 118–127. DOI: 10.46973/0201–727X_2022_4_118.
11. Верескун В. Д., Мамаев Э. А., Сорокин Д. В. Оценка перспектив роста грузооборота международного транспортного коридора «Север — Юг» в современных условиях // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 3. С. 45–56. DOI: 10.46973/0201–727X_2023_3_45.
12. Мамаев Э. А., Сорокин Д. В., Долгий И. Д. К оценке потенциала развития международного транспортного коридора: теоретические аспекты // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2020. № 4. С. 89–101. DOI: 10.46973/0201–727X_2020_4_89.
13. Мамаев Э. А., Сорокин Д. В. К оценке потенциала развития международного транспортного коридора «Север — Юг» // Известия Транссиба. 2020. № 3 (43). С. 86–96.
14. Левин Д. Ю. Диспетчерские центры и технология управления перевозочным процессом: учебное пособие. М.: Маршрут, 2005. 760 с.
15. Воронин В. А., Воробьев В. В., Есырев С. Н. АЛСО с подвижными блок-участками // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 6. С. 44–45.
16. Мугинштейн Л. А., Шенфельд К. П. Опыт внедрения тяжеловесного движения на железных дорогах // Железнодорожный транспорт. 2016. № 3. С. 35–41.
17. Дмитренко А. В., Ларченко Е. А., Еременко А. А. Эффективные пути повышения

среднего веса грузовых поездов // Вестник сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 4. С. 69–74. DOI: 10.52170/1815-9265_2021_59_69.

Дата поступления: 25.05.2024

Решение о публикации: 01.08.2024

Контактная информация:

РЯЗАНОВА Екатерина Владимировна — канд. техн. наук, доцент; ekaryazanova@gmail.com

НАУРУЗБАЕВ Сабир Мансурович — аспирант; sabir.nauruzbayev@mail.ru

КУДЕЛИНА Ангелина Олеговна — аспирант;

PoluninaAngelina@mail.ru

Evaluation of proposals for the formation of a network of alternative routes for the “North-South” corridor

E. V. Ryazanova, S. M. Nauruzbaev, A. O. Kudelina

Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia

For citation: *Ryazanova E. V., Nauruzbaev S. M., Kudelina A. O.* Evaluation of proposals for the formation of a network of alternative routes for the “North–South” corridor // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 638–651. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-638-651

Abstract

Purpose: to develop proposals for the development of the expected growth in traffic volumes along the North–South transport corridor. To assess the capacity of the Upper Baskunchak — Astrakhan — Olya port section as the most heavily loaded, where cargo flows from several directions merge. To show the need to unload the main direction of the North-South corridor and form a network of alternative routes in the transport corridor to ensure transportation guarantees in case of force majeure. Consider the possibility of attracting parallel routes through the North Caucasus Railway (SKZHD). **Methods:** the calculation of throughput was carried out using the methodology used in JSC “Russian Railways” and the author’s proposals, taking into account additional reserves of throughput. General logical methods were used — quantitative and qualitative analysis and synthesis, induction and deduction, analogies, classifications, a combination of historical and logical analyses. The proposed universal algorithm, which makes it possible to evaluate the possibility of choosing parallel moves, can be recommended for practical use. **Results:** the maximum number of trains that can be redirected to parallel routes has been established, taking into account the available capacity and their workload with export cargo traffic in the direction of the ports of the Azov-Black Sea basin. The relevance of the direction of development of heavy traffic aimed at reducing the required capacity and reducing inter-train intervals to increase the available capacity is shown. A universal algorithm has been formed that allows evaluating the possibility of choosing parallel moves. **Practical significance:** the necessity of mastering the expected cargo flow and preventing its departure to competing destinations, for example, through the Suez Canal, is shown. In the current political and economic conditions, the North — South International Transport Corridor (ITC) is changing its status: from an alternative to the Suez Canal, it is becoming one of the priority routes for Russian export cargo traffic.

Keywords: transport corridor, cargo flow, section, capacity, event, parallel route, algorithm

References

1. Mathematical modelling of the railway station's technological parameters in transport corridor system of export traffic increasing volumes / E. V. Ryazanova [et al.] // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 431. P. 13. DOI: 10.1051/e3sconf/202343108014.
2. Zhuravleva N., Gulyi I. Economic assessment of the cost of reducing the delivery time for cargo owners when sending goods through the international transport corridor "North — South" // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 460. P. 7. DOI: 10.1051/e3sconf/202346003014.
3. Kazanskaya L., Chetchuev M. Assessment of development prospects, economic effects and return on investment in the infrastructure of the international transport corridor "North — South" // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 460. P. 7. DOI: 10.1051/e3sconf/202346003015.
4. Mery po soglasovannomu razvitiyu infrastruktury na podhodah k portu Olya v usloviyah prognoziruемого роста грузопотоков по транспортному коридору «Север — Юг» / V. N. Zubkov [i dr.] // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya*. 2023. № 1. S. 63–75. DOI: 10.46973/0201-727X_2023_1_63. (In Russian)
5. Perspektivy issledovaniy transportno-technologicheskikh parametrov uzlovykh punktov koncentracii i raspredeleniya priportovykh vagonopotokov / V. I. Zadorozhnyj [i dr.] // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya*. 2022. № 1 (85). S. 72–81. DOI: 10.46973/0201-727X_2022_1_72. (In Russian)
6. Chislov O. N., Bezuov D. S., Zayacz S. G. Variant ocenki etapnosti razvitiya priportovykh stancij na napravleniyah yuzhnorossijskikh transportnykh koridorov // *Trudy RGUPS*. 2014. № 2. S. 153–163. (In Russian)
7. Chislov O. N., Bezuov D. S. Metody vybora i ocenki tehniko-technologicheskikh parametrov priportovykh gruzovykh stancij // *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo: sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Transport-2019»*. Rostov n/D.: RGUPS, 2019. T. 1: *Tekhnicheskie nauki*. S. 76–80. (In Russian)
8. Chebotareva E. A. Analiz meropriyatij po povysheniyu propusknoy sposobnosti uchastkov Severo-Kavkazskoj zheleznoj dorogi // *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*. 2022. № 1. S. 29–34. (In Russian)
9. Mezhdunarodnyj transportnyj koridor «Sever — Yug»: sozдание transportnogo karkasa Evrazii: doklad 21/5 / E. Vinokurov [i dr.]. Almaty; M.: Evrazijskij bank razvitiya. 2021. S. 124. (In Russian)
10. Zubkov V. N., Ryazanova E. V., Nauruzbaev S. M. Sovershenstvovanie raboty stancii Astrahan'-II v sisteme mezhdunarodnogo transportnogo koridora «Sever — Yug» v usloviyah ozhidaемого роста грузопотока // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya*. 2022. № 4. S. 118–127. DOI: 10.46973/0201-727X_2022_4_118. (In Russian)
11. Vereskun V. D., Mamaev E. A., Sorokin D. V. Ocenka perspektiv rosta gruzooborota mezhdunarodnogo transportnogo koridora «Sever — Yug» v sovremennykh usloviyah // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya*. 2023. № 3. S. 45–56. DOI: 10.46973/0201-727X_2023_3_45. (In Russian)
12. Mamaev E. A., Sorokin D. V., Dolgij I. D. K ocenke potenciala razvitiya mezhdunarodnogo transportnogo koridora: teoreticheskie aspekty // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya*. 2020. № 4. S. 89–101. DOI: 10.46973/0201-727X_2020_4_89. (In Russian)
13. Mamaev E. A., Sorokin D. V. K ocenke potenciala razvitiya mezhdunarodnogo transportnogo koridora «Sever — Yug» // *Izvestiya Transsiba*. 2020. № 3 (43). C. 86–96. (In Russian)
14. Levin D. Yu. Dispetcherskie centry i tekhnologiya upravleniya perevozochnym processom: uchebnoe posobie. M.: Marshrut, 2005. 760 s. (In Russian)
15. Voronin V. A., Vorob'ev V. V., Esyrev S. N. ALSO s podvizhnymi blok-uchastkami // *Avtomatika, svyaz', informatika*. 2011. № 6. S. 44–45. (In Russian)

16. Muginshtejn L. A., Shenfel'd K. P. Opyt vnedreniya tyazhelovesnogo dvizheniya na zheleznih dorogax // Zheleznodorozhnyj transport. 2016. № 3. S. 35–41. (In Russian)

17. Dmitrenko A. V., Larchenko E. A., Eremenko A. A. Effektivnye puti povysheniya srednego vesa gruzovyh poezdov // Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya. 2021. № 4. S. 69–74. DOI: 10.52170/1815-9265_2021_59_69. (In Russian)

Received: 25.05.2024

Accepted: 01.08.2024

Author's information:

Ekaterina V. RYAZANOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; ekaryazanova@gmail.com

Sabir M. NAURUZBAEV — Postgraduate Student; sabir.nauruzbayev@mail.ru

Angelina O. KUDELINA — Postgraduate Student; PoluninaAngelina@mail.ru

УДК 504.055

Оценка уровней шума в Санкт-Петербургском метрополитене

М. А. Андронов, Е. В. Басак, А. К. Шахрай, О. К. Суворова

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

Для цитирования: Андронов М. А., Басак Е. В., Шахрай А. К., Суворова О. К. Оценка уровней шума в Санкт-Петербургском метрополитене // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 652–660. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-652-660

Аннотация

Цель: оценка воздействия уровня шума в вагонах Санкт-Петербургского метрополитена. Определить, какие типы вагонов подвижного состава и с каким сроком эксплуатации используются в метрополитене. Провести оценку того, какие типы вагонов используются на различных линиях метрополитена, а также есть ли зависимость между сроком эксплуатации вагонов и уровнем шума в вагоне. Установить, насколько срок эксплуатации вагонов влияет на уровень шума в вагоне. Провести замеры уровней шума внутри вагонов подвижных составов разного типа на различных ветках метрополитена. Соотнести полученные значения с установленными требованиями СП 2.5.3650-20 «Санитарные правила эксплуатации метрополитенов» значениями предельно допустимых уровней шума в вагонах. Провести анализ уровня шумового воздействия на человека в метрополитене и определить возможные мероприятия по снижению уровня шума в метрополитене. **Методы:** измерения уровня шума на различных станциях и поездах производились специальным инструментальным методом, с использованием цифрового интегрирующего измерителя и анализатора звукового спектра «Октава 110А» 1-го класса точности по ГОСТ Р 53188.1. **Результаты:** выполнены замеры уровней шума в различных типах вагонов на различных ветках Санкт-Петербургского метро. Проведенный анализ результатов натурных замеров уровней шума по эквивалентным и максимальным уровням в метрополитене свидетельствует о превышениях допустимых уровней шума в вагоне «Балтиец» на красной линии метро, в вагоне 81-717/714 на синей линии метро; в вагоне 81-717/714 на фиолетовой линии метро; в вагоне 81-556.2/557.2/558.2 «Нева» на зеленой линии метро. **Практическая значимость:** результаты выполненных акустических замеров могут быть использованы для принятия мер по снижению шума в метрополитене, включая замену старых поездов на более новые.

Ключевые слова: метрополитен, уровень шума, вибрация, воздействие, подвижной состав

Метрополитен входит в число основных источников шума и вибрации в больших городах.

Наземные линии метро оказывают сильное шумовое воздействие на ближайшую жилую застройку на территории городов и могут являться источником постоянных жалоб населения. Кроме того, значительному шумовому воздействию подверга-

ются пассажиры метро при движении состава в перегоне между станциями и на самой станции. Огромное количество людей в мире находятся в зоне сверхнормативного уровня шума в метро в среднем от получаса до двух часов и более [1, 3, 10].

Линии метрополитена мелкого заложения являются источником повышенной вибрации, которая распространяется по грунту

и передается на фундаменты зданий, расположенных в технической зоне метрополитена, по результатам различных исследований на расстояние не менее 70 м от стенки туннеля [12].

Источниками шума в вагоне метро являются: работающие двигатели поезда; пара «колесо — рельс», удары колес на стыках рельсов; движение воздуха, выдавливаемого из тоннеля при движении поезда.

Повышенный уровень шума при движении вагона поезда метро при взаимодействии колес с рельсами увеличивается в местах стыков рельс и при наличии неровностей и дефектов. Уровень шума от вагонов метро при их движении зависит в основном от скорости движения поезда.

Максимальный уровень шума возникает в области контакта рельсов и колес вагона. Под пассажирским вагоном, движущимся со скоростью 120 км/ч, уровень шума может достигать значений от 110 до 115 дБА.

Санитарно-гигиеническими требованиями (табл. 54. СП 2.5.3650–20 «Санитарных правил эксплуатации метрополитенов») установлена величина предельно допустимого уровня шума в пассажирских помещениях метрополитена, которая составляет не более 60 дБА

по эквивалентному уровню, а по максимальному уровню — не более 75 дБА [2].

По результатам выполненных ранее исследований установлено, что акустическое воздействие на людей, которые пользуются метрополитеном в течение 30 минут с уровнем шума в 90 дБА, может быть сравнимо с восьмичасовым шумовым воздействием с уровнем шума 70–80 дБА. У человека, который подвергается воздействию шума с уровнем 70–80 дБА 30 минут в течение рабочей недели, может произойти снижение качества слуха, потеря слуха может составить в среднем 4 дБА на частоте 4 кГц [9].

Снижение уровня шума в метрополитене возможно и осуществляется за счет проведения таких мероприятий, как:

- использование современных шумопоглощающих и виброгасящих материалов;
- проведение своевременного техобслуживания поездов метро;
- замена старых вагонов на более новые с более низкими шумовыми характеристиками [4–8].

В число приоритетных мероприятий для снижения шума в метро в России входят:

1. Виброизоляция верхнего строения пути, в том числе использование прогрессивной

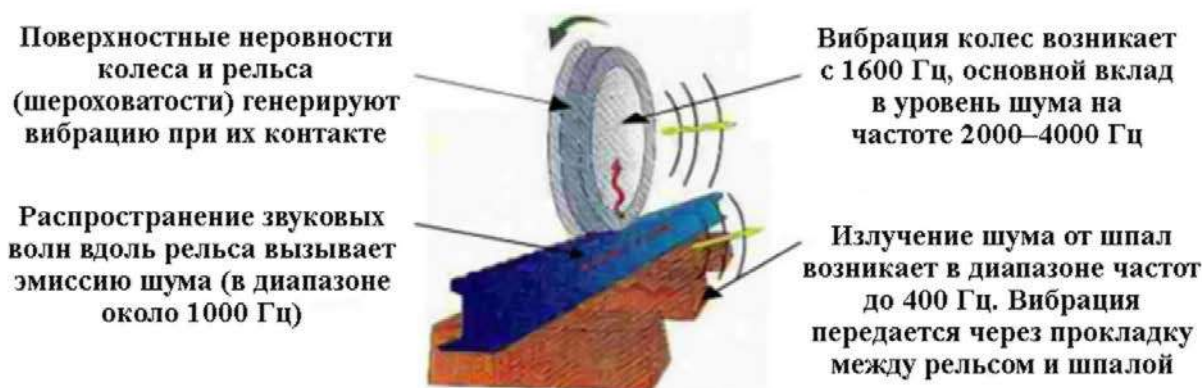


Рис. 1. Источники шумового воздействия при движении вагона метро [6]

технологии LVT — Low Vibration Track, при которой применяются виброгасящие скрепления, бетонные блоки при этом помещаются в резиновый чехол и укладываются в монолитный неармированный бетон.

2. Использование колесных тележек с шумопоглотителями.

3. Использование виброгасящих материалов для пола вагонов, позволяющих снизить уровень шума.

4. Использование специальных шумозащитных окон в вагонах метро.

5. Использование пневматических подвесок на резиновых подушках в новых поездах московского метрополитена вместо ранее применявшихся пружинных подвесок на рессорах.

В 2022 году протяженность пяти линий Петербургского метрополитена составляла 124,8 км. Согласно данным комитета по транспорту администрации Санкт-Петербурга, общественным транспортом за 2022 год ежедневно пользовалось около 4,3 млн человек.

В 2021 году численность парка Санкт-Петербургского метрополитена составляла 1925 вагонов, при этом продолжительность срока службы вагонов в среднем составила 22,4 года, а нормативная продолжительность срока службы вагонов составляет 31 год. В целом изношенность парка подвижного состава составляет 57%, большая часть таких вагонов эксплуатируется на 1-й и 2-й линиях. Высокий процент изношенности вагонов метро влияет на уровень шума при движении составов как на перегонах между станциями, так и на станциях.

На линиях Петербургского метро эксплуатируются следующие типы вагонов подвижного состава:

1. Кировско-Выборгская линия — вагоны типа Ем, 81-722.1/723.1/724.1. С сентября

2022 года в обслуживающее ее электродепо ТЧ-1 «Автово» начались поставки поездов проекта «Балтиец» (81-725.1/726.1/727.1) в 8-вагонном исполнении.

2. Московско-Петроградская линия — вагоны типов 81-717/714, 81-717.5/714.5, 81-717.5П/714.5П, 81541, 81-540.1/541.1, 81-540.9/541.9 и 81-722/723/724 «Юбилейные». К 2026 году в обслуживающее ее электродепо ТЧ-6 «Выборгское» ожидаются поставки поездов проекта «Балтиец» (81-725/726/727) в 6-вагонном исполнении.

3. Невско-Василеостровская линия — вагоны типов 81-556/557/558, 81-556.1/557.1/558.1, 81-556.2/557.2/558.2, 81-722/723/724 и 81-722.3/723.3/724.3.

4. Правобережная линия — вагоны типов 81-717/714, 81-714.5, 81-717.5П/714.5П, 81-540/541, 81-541.5 и 541.8 в составе 7-вагонных поездов.

5. Фрунзенско-Приморская линия — вагоны типов 81-714, 81-717.5/714.5, 81-717.5П/714.5П, 81-540/541, 81-540.2/541.2, 81-540.5/541.5 и 81-540.7/541.7. К 2025 году в обслуживающее ее электродепо ТЧ-7 «Южное» ожидается первая поставка поезда проекта «Балтиец» (81-725/726/727).

6. Красносельско-Калининская линия — планируется эксплуатация вагонов моделей 81-725/726/727 «Балтиец»; после ввода в эксплуатацию электродепо ТЧ-8 «Красносельское» для «полноценного» обслуживания линии — 81-717/714.

Ранее были проведены натурные замеры уровней шума в петербургском метрополитене. Контрольные замеры уровней шума выполнены специалистами аккредитованной лаборатории ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии по г. Санкт-Петербургу». Акустические замеры проводились в вагонах типа

«Ем» (бортовые номера 3734 и 3844, 1967 и 1970 годов выпуска).

По результатам выполненных замеров установлено, что уровни шума в вагонах при движении от станции «Перспект Ветеранов» до станции «Девяткино» составили 82–87 дБА по эквивалентному уровню, что не соответствует требованиям гигиенических нормативов.

Как уже говорилось выше, замена изношенного подвижного состава на новый является одним из мероприятий по снижению шума как в вагонах метро, так и на станциях.

В настоящее время ГУП «Петербургский метрополитен» проводит крупное обновление подвижного на красной линии (Кировско-Выборгской). Обновление подвижного состава повлечет за собой серьезную реконструкцию обслуживающей поезда метро инфраструктуры. Предусматривается замена устаревшего электрооборудования на совмещенных тягово-понижительных подстанциях: СТП-2 станции «Кировский завод», СТП-12 станции «Лесная», СТП-16 станции «Гражданский проспект»

и кабельно-проводниковой продукции в перегонных тоннелях. В ходе реконструкции предусматривается перевод всего электрооборудования с действующего в СТП напряжения 110 В на 220 В.

ГУП «Петербургский метрополитен» в 2024 году введет в эксплуатацию 54 новых вагонов класса «Нева», появятся девять новых электропоездов с низкими уровнями шума.

В настоящей работе были проведены замеры уровней шума в пассажирских помещениях вагонов на различных ветках Санкт-Петербургского метрополитена при движении в тоннеле, проведена оценка соответствия полученных результатов акустических замеров нормативным требованиям.

В ходе исследований были проведены замеры шума по эквивалентному и максимальному уровням — L (Аэкв.) и L (Амакс.) в соответствии с ГОСТ 23337.

Измерения уровня шума производились инструментальным методом с использованием цифрового интегрирующего измерителя и анализатора спектра «Октава 110А» 1-го класса точности по ГОСТ Р 53188.1.

ТАБЛИЦА 1. Результаты проведенных замеров уровней шума

Линии и вагоны метро	Результаты замеров шума, эквивалентный уровень, дБА	Результаты замеров шума, максимальный уровень, дБА	Нормативный уровень шума, дБА, эквивалентный уровень	Нормативный уровень шума, дБА, максимальный уровень
Красная линия метро:			60	75
Вагон «Балтиец»	70,7	83,1		
Вагон Ем-501 6257	68,7	82,7		
Синяя линия метро				
Вагон 81-717/714	82,2	93,2		
Фиолетовая линия метро				
Вагон 81-717/714	80,7	86,1		
Оранжевая линия метро				
Вагон 81-717/714	67,9	80,6		
Зеленая линия метро				
81-556.2/557.2/558.2 «Нева»	73,2	90,1		

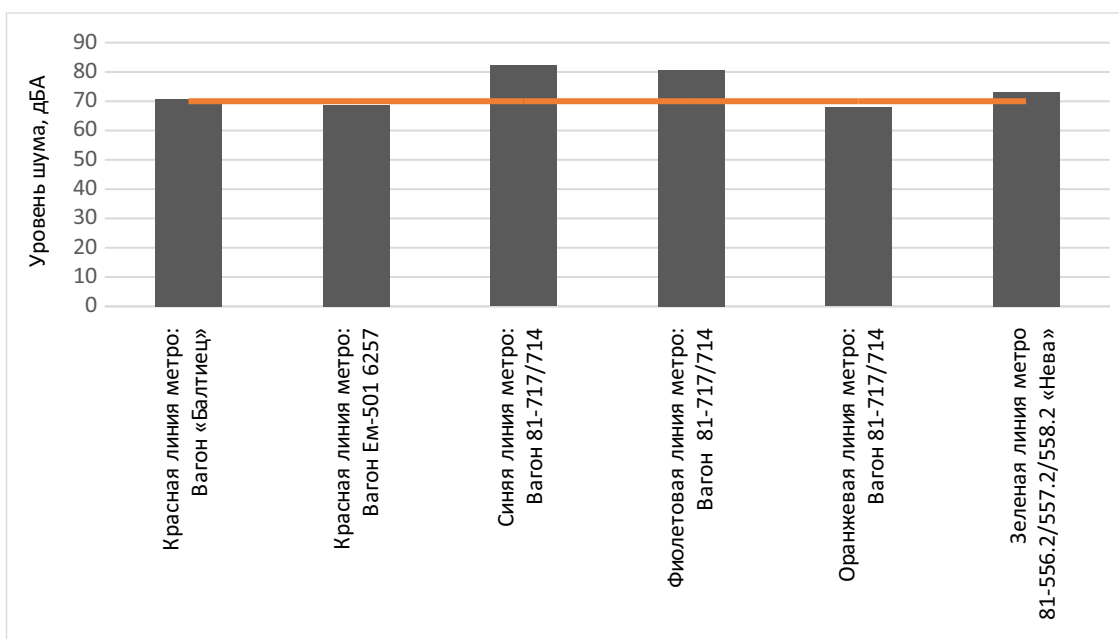


Рис 2. Диаграмма эквивалентных уровней шума (дБА) в вагонах на различных линиях петербургского метро

Акустические замеры были проведены на следующих линиях метро:

1. Красная линия метро.

Были проведены замеры эквивалентных уровней шума для двух видов вагонов: нового («Балтиец» — 70,7 дБА) и старого (EM-501 6257–68,7 дБА), что не соответствует требованиям СП 2.5.3650-20.



Рис. 3. Вагон «Балтиец» [11]



Рис. 4. Вагон EM-501 6257 [11]

2. Синяя линия метро.

Были проведены замеры эквивалентных уровней шума в вагоне 81-717/714 на перегоне со станции «Сенная Площадь» — 82,2 дБА, что не соответствует требованиям СП 2.5.3650-20.



Рис. 5. Вагон 81-717/714 [11]



Рис. 6. Вагон 81-556 «Нева» [11]

Многие пассажиры жаловались на повышенный шум перед станцией «Московская», однако состав, приближаясь к этому участку, входит в поворот, и поезд замедляется, ощущения у пассажиров оказываются ложными.

3. Фиолетовая линия метро.

Были проведены замеры эквивалентных уровней шума на перегоне со станции «Садовая» (вагон 81-717/714), был получен результат 80,7 дБА, что не соответствует требованиям СП 2.5.3650–20.

4. Оранжевая линия метро.

Замеры проводились на перегоне со станции «Спасская» (вагон 81–717/714). Был получен самый тихий результат среди всех веток метро — 67,9 дБА, что не соответствует требованиям СП 2.5.3650-20.

5. Зеленая линия метро.

Замеры проводились на перегоне со станции «Беговая» в новом вагоне «Нева» третьей серии (81-556.2/557.2/558.2). По результатам замеров уровень шума составил 73,2 дБА, что не соответствует требованиям СП 2.5.3650-20.



Рис. 7. 81–556.2/557.2/558.2 «Нева» [11]

По результатам замеров установлено, что в пассажирских салонах вагонов метро на всех исследованных отрезках выявлены превышения предельно допустимых уровней шума (СП 2.5.3650-20 «Санитарные правила эксплуатации метрополитенов»), в том числе: на красной линии метро — вагон «Балтиец»; на синей линии метро — вагон 81-717/714; на фиолетовой линии метро — вагон 81-717/714; на зеленой линии метро — вагон 81-717/714.

Таким образом, по результатам проведенных замеров можно сделать вывод о необходимости дополнительных шумо- и виброзащитных мероприятий в метро.

Для снижения уровня акустического воздействия на пассажиров, пользующихся поездами метро, в качестве личных средств индивидуальной защиты органов слуха можно рекомендовать использовать наушники с шумоподавлением, новые комфортные модели берушей.

Библиографический список

1. Васильева В. В. Автотранспортный шум в городах и его влияние на окружающую среду // Мир транспорта и технологических машин. 2010. № 3. С. 101–108.
2. СП 2.5.3650-20. Санитарные правила эксплуатации метрополитенов.
3. Проблема снижения шума и вибрации поездов: сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита населения от повышенного шумового воздействия» (Санкт-Петербург, 17–19 марта 2009 года). СПб., 2009. С. 9–35.
4. Превентивное шлифование рельсов для снижения уровня шума // Железные дороги мира. 2011. № 12. С. 63–66.
5. ГОСТ Р 54931–2012. Экраны акустические для железнодорожного транспорта. Технические требования.
6. Шум метро // АкустикДом [Электронный ресурс]. URL: <https://acousticdom.ru/poleznoe/shum-metro>.
7. СП 353.1325800.2017. Защита от шума объектов метрополитена. Правила проектирования, строительства и эксплуатации.
8. Исаков А. Л., Смолин Ю. П. Сравнительная оценка уровня виброколебаний путевого бетона в метро с различными типами подрельсовых оснований // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 4 (43). С. 40–44.
9. Новиков А. В., Родионов А. В., Сумарукова О. В. Оценка шумового воздействия на Северном участке Московского Центрального кольца // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 5 (95). Ч. 1. С. 97–100.
10. Андрущенко А. К. Оценка и снижение шума на станции метрополитена открытого типа // NOISE Theory and Practice. 2017. Т. 3, № 2. С. 25–37.
11. Какие вагоны можно встретить в метро Петербурга? // Приложение transportSpb [Электронный ресурс]. URL: <https://transportspb.com/kakie-vagoni-mogno-vstretit-v-metro-peterburga>.
12. Цукерников И. Е., Смирнов В. А. Измерения и анализ вибрации, вызванной движением поездов метрополитена на близлежащие здания, и разработка мероприятий по их снижению // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2017. № 5.

Дата поступления: 06.05.2024

Решение о публикации: 14.06.2024

Контактная информация:

СУВОРОВА Ольга Константиновна — канд.

ф.-м. наук, доцент; suolko@gmail.com

АНДРОНОВ Матвей Андреевич — студент;

matveyka20003@mail.com

БАСАК Екатерина Валерьевна — студент;

katerina.bs003@yandex.ru

ШАХРАЙ Алина Константиновна — студент;

alina.kholod00@mail.ru

Assessment of noise levels in the St. Petersburg metro

M. A. Andronov, E. V. Basak, A. K. Shakhrai, O. K. Suvorova

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

For citation: *Andronov M. A., Basak E. V., Shakhrai A. K., Suvorova O. K.* Assessment of noise levels in the St. Petersburg metro // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 652–660. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-652-660

Abstract

Purpose: to assess the impact of noise levels in St. Petersburg metro cars. Identify what types of cars used on various metro lines. Determine what types of rolling stock cars used in the metro. Determine how much the service life of the cars affects the noise level in the car. Conduct measurements of noise levels inside the carriages of rolling stock of various types on various metro lines. Correlate the obtained values with the established requirements of SP 2.5.3650–20 “Sanitary rules for the operation of subways” with the values of maximum permissible noise levels in cars. Conduct an analysis of the level of noise impact on humans in the metro and identify possible measures to reduce the noise level in the metro. **Methods:** measurements of noise levels at various stations and trains were carried out by a special instrumental method, using a digital integrating meter and an Octave 110A sound spectrum analyzer of 1st accuracy class according to GOST R 53188.1. **Results:** measurements of noise levels carried out in various types of cars on various branches of the St. Petersburg metro. An analysis of the results of field measurements of noise levels for equivalent and maximum levels in the metro shows that permissible noise levels are exceeded in the “Baltiets” car on the red metro line, in car 81-717/714 on the blue metro line; in car 81-717/714 on the purple metro line; in car 81-556.2/557.2/558.2 “Neva” on the green metro line. **Practical significance:** identification of the obtained data show necessary measures to reduce noise in the metro. Installation of sound-absorbing materials at stations and on trains. Replacing old trains with newer ones.

Keywords: metro, noise level, vibration, impact, rolling stock

References

1. Vasil'eva V. V. Avtotransportnyj shum v gorodah i ego vliyanie na okruzhayushchuyu sredu // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2010. № 3. S. 101–108. (In Russian)
2. SP 2.5.3650-20. Sanitarnye pravila ekspluatscii metropolitenov. (In Russian)
3. Problema snizheniya shuma i vibracii poezdov: sbornik trudov II Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem “Zashchita naseleniya ot povyshennogo shumovogo vozdejstviya” (Sankt-Peterburg, 17–19 marta 2009 goda). SPb., 2009. S. 9–35. (In Russian)
4. Preventivnoe shlifovanie rel'sov dlya snizheniya urovnya shuma // Zheleznye dorogi mira. 2011. № 12. S. 63–66. (In Russian)
5. GOST R 54931-2012. Ekrany akusticheskie dlya zheleznodorozhnogo transporta. Tekhnicheskie trebovaniya. (In Russian)
6. Shum metro // AkustikDom [Elektronnyj resurs]. URL: <https://acousticdom.ru/poleznoe/shum-metro>. (In Russian)
7. SP 353.1325800.2017. Zashchita ot shuma ob'ektov metropolitena. Pravila proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatscii. (In Russian)
8. Isakov A. L., Smolin Yu. P. Sravnitel'naya ocenka urovnya vibrokolebanij putevogo betona v metro

s različnymi tipami podrel'sovyh osnovanij // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2017. № 4 (43). S.40–44. (In Russian)

9. Novikov A. V., Rodionov A. V., Sumarukova O. V. Ocenka shumovogo vozdejstviya na Severnom uchastke Moskovskogo Central'nogo kol'ca // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2020. № 5 (95). Ch. 1. S. 97–100. (In Russian)

10. Andryushchenko A. K. Ocenka i snizhenie shuma na stancii metropolitena otkrytogo tipa // NOISE Theory and Practice. 2017. T. 3, № 2. S. 25–37. (In Russian)

11. Kakie vagony mozžno vstretit' v metro Peterburga? // Prilozhenie transportSpb [Elektronnyj resurs]. URL: <https://transportspb.com/kakie-vagoni-mogno-vstretit-v-metro-peterburga>. (In Russian)

12. Cukernikov I. E., Smirnov V. A. Izmereniya i analiz vibracii, vyzvannoj dvizheniem poezdov

metropolitena na blizlezhashchie zdaniya, i razrabotka meropriyatij po ih snizheniyu // Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo Universiteta. 2017. № 5. (In Russian)

Received: 06.05.2024

Accepted: 14.06.2024

Author's information:

Olga K. SUVOROVA — PhD, Associate Professor;
e-mail: suolko@gmail.com

Matvej A. ANDRONOV — Student;
matveyka20003@mail.com

Ekaterina V. BASAK — Student;
katerina.bs003@yandex.ru

Alina K. SHAKHRAY — Student;
alina.kholod00@mail.ru

УДК 621.433

Способ подачи топлива в газовый двигатель внутреннего сгорания

А. А. Воробьев¹, А. Л. Пенкин², Д. Р. Ведерникова²

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

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Для цитирования: Воробьев А. А., Пенкин А. Л., Ведерникова Д. Р. Способ подачи топлива в газовый двигатель внутреннего сгорания // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 661–669. DOI 10.20295/1815-588X-2024-03-661-669

Аннотация

Цель: разработка нового способа подачи топлива, так как наиболее часто реализуемые способы топливоподачи в газовых двигателях имеют существенные недостатки. **Методы:** на основе распределенной и непосредственной подачи топлива был разработан комбинированный способ, представляющий собой совокупность данных видов топливоподачи. **Результаты:** такой способ подачи топлива компенсирует недостатки как распределенной подачи (снижение наполнения цилиндров, аккумуляирование топливовоздушной смеси во впускной системе и потери топлива на перекрытии клапанов), так и непосредственной (некачественное смесеобразование в режимах низких и полных нагрузок). На различных режимах работы двигателя задействуются данные виды впрыска топлива в разных сочетаниях, ввиду чего преимущества распределенного и непосредственного впрыска топлива суммируются. В областях низких нагрузок осуществляется распределенный впрыск либо комбинация распределенного и непосредственного. На средних нагрузках возможно использование только непосредственного впрыска. При полной нагрузке возможен впрыск топлива из двух форсунок за один цикл. Предложено усовершенствование распределенной подачи в составе комбинированной с целью исключения аккумуляирования топлива во впускном коллекторе. Такой эффект достигается за счет использования редуктора с электронным управлением, позволяющего подавать топливо с разными величинами давления для создания направленного движения струи газа, что позволяет также улучшить смесеобразование. **Практическая значимость:** предложенный способ подачи природного газа обеспечивает оптимальный состав топливовоздушной смеси при всех режимах работы, повышение коэффициента наполнения, исключение потерь топлива на перекрытии клапанов.

Ключевые слова: газовое топливо, природный газ, подача топлива, коэффициент наполнения, качество смесеобразования, экологичность двигателей

Введение

Известные способы подачи топлива в газовый двигатель внутреннего сгорания — центральная и распределенная подачи — обладают рядом несовершенств, которые снижают как энергоэффективность, так и экологичность двигателя [1]. В связи с этим становятся актуальными поиск и разработка альтернатив наиболее распространенным способам подачи.

Для обоснования нового способа подачи топлива необходимо рассмотреть существующие виды топливоподачи, их преимущества и недостатки. В газовых двигателях могут применяться следующие виды подачи топлива: центральная и распределенная подача, непосредственный впрыск топлива. В газодизельных двигателях подача газа также может осуществляться через двухтопливную форсунку.

Центральная подача

Центральная подача (рис. 1) подразумевает впрыск топлива во впускной трубопровод до впускного коллектора через одну форсунку [2–4]. При внешнем смесеобразовании топливовоздушная смесь имеет тенденцию к аккумулярованию во впускном коллекторе, вследствие чего во время перекрытия клапанов часть топливовоздушной смеси, не сгорев, попадает в выпускной трубопровод. Это вызывает понижение коэффициента наполнения, а также экономичности и экологичности работы двигателя.

Центральная подача топлива имеет следующие преимущества:

- 1) простота конструкции и обслуживания по сравнению с более современными типами топливоподачи;
- 2) более совершенная оптимизация дозирования топлива по сравнению с карбюраторной системой питания;
- 3) высокая надежность ввиду расположения форсунки в потоке охлаждающего воздуха.

К недостаткам следует отнести:

- 1) неравномерность распределения компонентов топливовоздушной смеси по цилиндрам двигателя;
- 2) повышение гидравлического сопротивления во впускном трубопроводе по причине нахождения в нем форсунки;
- 3) потерю топлива во время перекрытия клапанов, а также аккумулярование топлива во впускной системе.

Распределенная подача

Распределенная подача топлива предполагает, что каждый цилиндр обслуживается отдельной форсункой, находящейся во впускном канале, вблизи впускного клапана (рис. 2).

Распределенная подача на данный момент применяется во многих двигателях и обладает следующими преимуществами:

- 1) высокая экологичность и экономичность, обусловленные более равномерным составом топливовоздушной смеси по цилиндрам и более совершенным дозированием топлива;
- 2) высокая динамичность автомобиля;
- 3) высокий коэффициент наполнения;
- 4) большие возможности для применения наддува;
- 5) автоматизация настройки параметров;
- 6) стабильность функционирования системы в различных климатических условиях [2–4].

Несмотря на наличие большого количества преимуществ данной системы по сравнению с более ранними способами топливоподачи, имеются следующие недостатки:

- 1) высокие требования к фракционному составу топлива;
- 2) высокая вероятность возникновения детонации (по сравнению с непосредственным впрыском);
- 3) потери топлива во время перекрытия клапанов.

Подача через двухтопливную форсунку

Двухтопливная форсунка одновременно подает дизельное топливо и природный газ в режиме работы двигателя по газодизельному циклу (рис. 3). При этом через отверстия форсунки подается как дизельное топливо (запальная доза), так и газовое, причем сопловые отверстия для подачи дизельного топлива имеют меньший диаметр, чем способствуют лучшему распылению и самовоспламенению. Горение в данных областях распространяется в полости цилиндра в зоны бедных топливовоздушных смесей [5].

Особым преимуществом двухтопливной форсунки является компактность, что позволяет снизить массогабаритные показатели двигателя.

Недостатками являются сложность конструкции и высокая стоимость.

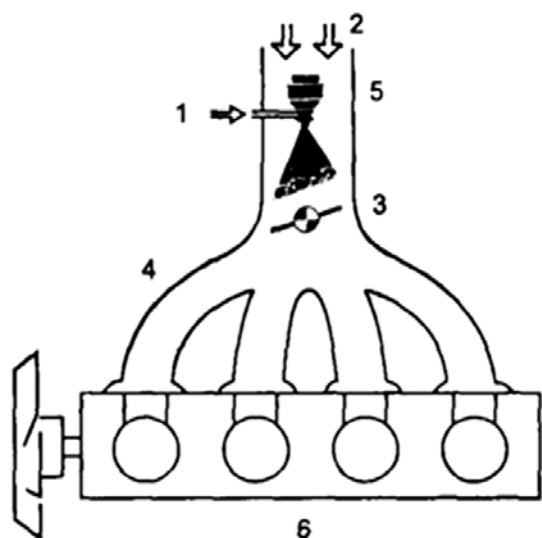


Рис. 1. Схема центральной подачи топлива в газовом двигателе: 1 — подача топлива; 2 — поток воздуха; 3 — дроссельная заслонка; 4 — впускной коллектор; 5 — форсунка; 6 — блок цилиндров двигателя [2]

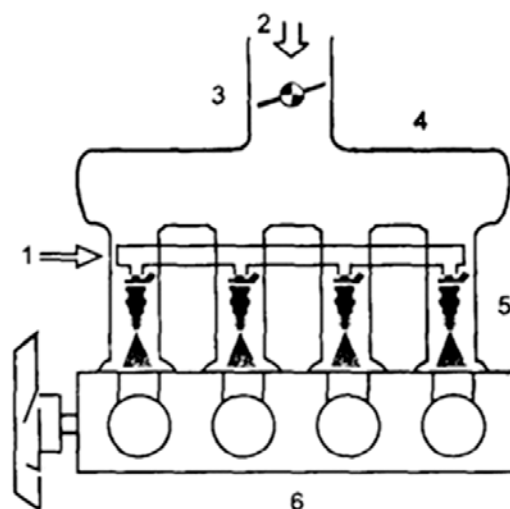


Рис. 2. Схема распределенной подачи топлива в газовом двигателе: 1 — подача топлива; 2 — поток воздуха; 3 — дроссельная заслонка; 4 — впускной коллектор; 5 — топливная рампа и форсунки; 6 — блок цилиндров двигателя [2]

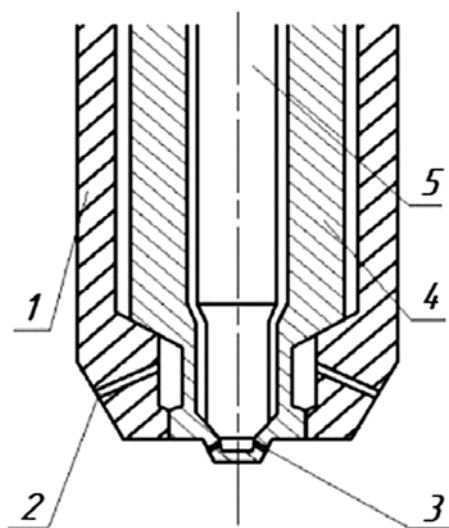


Рис. 3. Схема двухтопливной форсунки: 1 — корпус форсунки; 2 — сопла распыления природного газа; 3 — сопло распыления дизельного топлива; 4 — игла форсунки (природный газ); 5 — игла форсунки (дизельное топливо) [6]

Непосредственный впрыск

При непосредственном впрыске подача топлива осуществляется под высоким давлением, смесеобразование происходит внутри цилиндра (рис. 4, 5).

Двигатели с непосредственным впрыском, использующие природный газ в качестве моторного топлива, имеют потенциал для достижения такого же теплового КПД, как и у дизельных двигателей, сохраняя при этом выбросы NO_x и твердых частиц на более низком уровне [7, 8].

На режимах низких нагрузок непосредственный впрыск производится на такте впуска для улучшения смесеобразования. При низких оборотах двигателя в цилиндре снижена интенсивность вихреобразования, в связи с чем необходимо больше времени для образования смеси.

Послойное смесеобразование обеспечивает повышение эффективных показателей

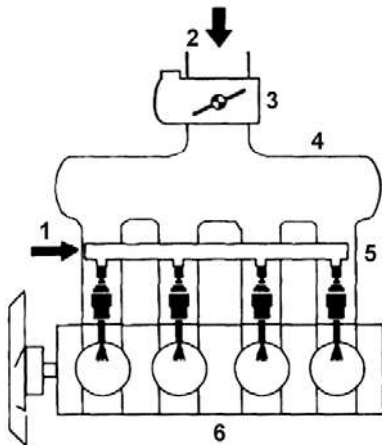


Рис. 4. Схема непосредственного впрыска топлива в газовом двигателе: 1 — подача топлива; 2 — поток воздуха; 3 — дроссельная заслонка с электронным управлением; 4 — впускной коллектор; 5 — топливная рампа и форсунки; 6 — блок цилиндров двигателя [2]

двигателя на режимах средних нагрузок за счет качественного управления. Такой подход подразумевает распределение заряда на горючую и негорючую части, при этом горючая часть заряда должна располагаться на близком расстоянии от свечи зажигания. В зависимости от нагрузки на двигатель соотношение горючей и негорючей частей заряда меняется. Однако между данными частями заряда существует переходная зона, топливовоздушная смесь в которой является переобедненной и не

сгорает. В связи с чем расслоение заряда считается наиболее качественным при сведении к минимуму количества топлива в переходной зоне. Некачественное расслоение заряда приводит к снижению индикаторного КПД и повышению выбросов СН [3]. В режиме послойного сгорания впрыск топлива осуществляется после закрытия впускного клапана.

На режимах высоких нагрузок непосредственный впрыск может увеличить турбулентность в цилиндре из-за потока распыленного топлива, что способствует сокращению времени, требуемого для смешивания топлива с воздухом. Однако относительно небольшие время и путь смешивания могут способствовать получению худшей однородности топливовоздушной смеси по сравнению с распределенной подачей топлива [8].

Также при применении непосредственного впрыска возможно использование двухстадийного впрыскивания. Данный метод смесеобразования позволяет создавать зоны стехиометрической смеси вблизи свечи зажигания при бедном составе смеси в остальной части цилиндра.

Для воспламенения газового топлива требуется высокое напряжение свечи зажигания, что может привести к более интенсивному нагарообразованию на электродах и сокращению срока службы свечи зажигания [10].

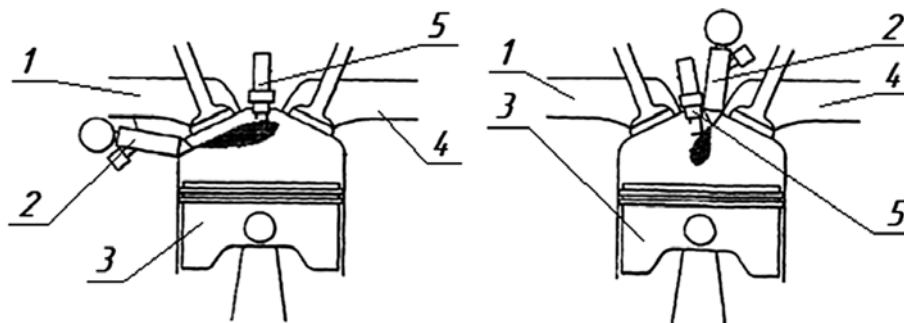


Рис. 5. Варианты осуществления непосредственного впрыска топлива: 1 — впускной канал; 2 — форсунка; 3 — поршень; 4 — выпускной канал; 5 — свеча зажигания [9]

Также среди недостатков непосредственного впрыска топлива можно отметить тяжелые температурные условия работы форсунки, необходимость применения специальных нейтрализаторов отработавших газов. В частности, для непосредственной подачи требуются специальные форсунки, способные создавать большой перепад давления, так как требуется подача большого объема газа для соответствия эффективным показателям, достигаемым при использовании жидких топлив [11].

Комбинированная подача

Комбинированная подача топлива объединяет в себе непосредственный и распределенный впрыск (рис. 6). Топливо поступает в цилиндр через две форсунки, одна из которых впрыскивает топливо во впускной канал, а другая — прямо в цилиндр двигателя. Данный вид топливоподачи на данный момент широко используется на бензиновых двигателях, но не применяется на газовых двигателях.

Данный подход обеспечивает повышение наполнения цилиндра. В связи с этим у двигателей, оснащенных таким видом подачи топлива, есть предпосылки к повышению мощностных показателей. При этом чем большее количество топлива будет подаваться непосредственно

в цилиндр после закрытия впускного клапана, тем выше будут мощностные показатели.

При осуществлении такого вида топливоподачи возможна работа двигателя по следующему алгоритму:

1. В областях низких нагрузок осуществляется распределенный впрыск либо комбинация распределенного и непосредственного. На данном режиме в цилиндр поступает недостаточное количество воздуха ввиду малого открытия дросселя. При этом в цилиндре остается большое количество остаточных газов, из-за чего на данных режимах работы наблюдается низкое качество сгорания. Для повышения качества сгорания производят обогащение смеси. Однако при наличии комбинированной подачи топлива возможен впуск в цилиндр однородной бедной смеси, образованной во впускной системе с помощью форсунки распределенного впрыска. Данная смесь в цилиндре смешивается с остаточными газами. После закрытия впускного клапана форсунка непосредственного впрыска создает рядом со свечой зажигания зону обогащенной смеси, которая является мощным очагом воспламенения. Горение от очага воспламенения распространяется по всему цилиндру и эффективно сжигает бедную смесь.

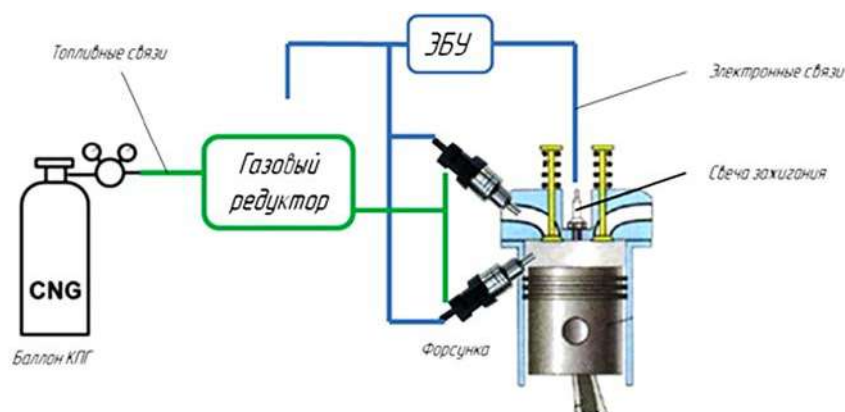


Рис. 6. Схема комбинированной подачи топлива

2. На средних нагрузках возможно использование только непосредственного впрыска. На данных режимах работы повышается коэффициент наполнения за счет введения в цилиндр только воздуха, а не топливоздушнoй смеси.

3. При полной нагрузке возможен впрыск топлива из двух форсунок за один цикл. На такте впуска топливо подается форсункой во впускном канале, а на такте сжатия происходит непосредственный впрыск недостающего количества топлива. Таким образом, в цилиндр вводится такое количество топлива, которое необходимо для текущего режима работы. При этом топливоздушная смесь в объеме цилиндра является однородной благодаря впуску топлива через форсунку во впускном канале, что обеспечивает повышение полноты сгорания и снижение токсичности отработавших газов.

На данный вид топливоподачи теоретически возможно переоборудовать серийный двигатель в эксплуатации. В газовых двигателях это возможно за счет установки дополнительных форсунок во впускных каналах или в головке блока цилиндров. На бензиновых двигателях с комбинированной подачей бензина возможно произвести замену форсунки распределенной подачи на газовую форсунку, а форсунку непосредственного впрыска — на двухтопливную форсунку. Переоборудование дизельного двигателя в газодизель возможно осуществить за счет установки дополнительных форсунок распределенного впрыска во впускные каналы и замены штатной дизельной форсунки на двухтопливную. Однако если размеры головки блока цилиндров двигателя, который конвертируется на комбинированную подачу природного газа, позволяют установить совместно со штатной форсункой дополнительную газовую, то в установке двухтопливной форсунки не будет необходимости.

Из недостатков данного вида топливоподачи можно отметить увеличение количества движущихся элементов, повышение стоимости двигателя, увеличение трудоемкости и затрат на обслуживание. Также для осуществления возможности впрыска газа под высоким давлением необходимо использовать форсунки, обеспечивающие больший перепад давления, чем для двигателей с непосредственным впрыском бензина или дизельного топлива.

Усовершенствование распределенной подачи в составе комбинированной

Как было отмечено ранее, непосредственный впрыск топлива позволяет повысить наполнение цилиндра. В то же время распределенная подача топлива по направляющим газовым трубкам снижает наполнение цилиндра воздухом [1], а также может способствовать потерям топлива во время перекрытия клапанов.

Чтобы исключить данные негативные влияния, в ряде исследований задачу улучшения смесеобразования в распределенной подаче решают без установки дополнительных элементов во впускной системе, а путем регулирования положения струи газа в потоке воздуха, что осуществляется за счет электронного регулирования давления подачи газа с использованием редуктора с электронным управлением [12, 13], который позволяет изменять давление впуска газа от 2 до 10 бар.

Редуктор с электронным управлением позволяет регулировать струю газа таким образом, чтобы топливо подавалось не во впускной коллектор, а во впускной канал, а также подача производилась после закрытия выпускного клапана.

Заключение

Рассмотрены различные виды подачи природного газа в двигатель внутреннего

сгорания. Предложен новый способ подачи газового топлива (комбинированная подача), предусматривающий для каждого цилиндра двигателя наличие двух систем подачи: распределенной и непосредственной. Предполагается, что на разных режимах работы двигателя данные виды впрыска топлива задействуются в разных комбинациях.

Для регулирования подачи топлива через форсунки распределенного впрыска с целью предотвращения аккумуляирования топлива во впускном коллекторе предлагается использование редуктора с электронным управлением, позволяющего подавать топливо с разными величинами давления для создания направленного движения струи газа. Такой подход позволяет не использовать для подачи топлива газовые направляющие трубки.

К преимуществам такого способа подачи топлива возможно отнести оптимальный состав смеси на всех режимах работы, повышение коэффициента наполнения, исключение потерь топлива на перекрытии клапанов, а также наличие возможности установки данного вида подачи топлива на серийные двигатели в эксплуатации.

Среди недостатков данного вида топливоподачи можно отметить высокую сложность и стоимость системы.

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

Библиографический список

1. Оценка влияния элементов топливной системы на коэффициент наполнения газового двигателя / А.Л. Пенкин [и др.] // Грузовик. 2024. № 5. С. 15–20. DOI: 10.36652/1684-1298-2024-5-15-20. EDN FVPAWX.

2. Системы управления бензиновыми двигателями / пер. с нем. М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2005. 432 с.

3. Двигатели внутреннего сгорания: в 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: учебник для вузов / В.Н. Луканин [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2005. 479 с.

4. Application of Natural Gas for Internal Combustion Engines, *Advances in Natural Gas Technology / Rosli Abu Bakar* [et al.]; ed. Dr. Hamid Al-Megren. 2012.

5. Двухтопливная форсунка ДВС: патент на изобретение № 2784 858, Рос. Федерация МПК F02M 43/04 (2022.08); F02M 51/061 (2022.08). № 2022113950 / В.В. Гаврилов, Д.Д. Богачев, В.В. Калининченко. заявл. 25.05.2022. Заявитель: ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова».

6. Performance of a direct-injection natural gas engine with multiple injection strategies / M. Li [et al.] // *Energy*. 2019. Vol. 189. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116363.

7. *Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development: Gasoline and Gas Engines* / ed. by Hua Zhao. Elsevier, 2014. 312 p.

8. Moon S. Potential of Direct-Injection for the Improvement of Homogeneous-Charge Combustion in Spark-Ignition Natural Gas Engines // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 136. P. 41–48. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.01.068.

9. Двигатель внутреннего сгорания на газовом топливе и способ управления двигателем внутреннего сгорания на газовом топливе: патент на изобретение № 2411 386. Рос. Федерация, МПК F02D 19/02 (2006.01) F02M 21/02 (2006.01). № 2008130588/06 / Синагава Томохиро, Судзуки Макото; Тойота Дзидося Кабусики Кайся; заявл. 28.12.2006.

10. Numerical investigations on pilot ignited high pressure direct injection natural gas engines: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* / M. Li [et al.] // Elsevier. 2021. Vol. 150.

11. Шишков В. А. Непосредственный впрыск газового топлива в камеру сгорания ДВС с искровым зажиганием // Транспорт на альтернативном топливе. 2010. № 6 (18).

12. Пенкин А. Л., Метлякова С. А. Способ повышения однородности газозвушной смеси в транспортных двигателях внутреннего сгорания // International Journal of Advanced Studies. 2023. Т. 13, № 1. С. 137–158. DOI: 10.12731/2227-930X2023-13-1-137-158.

13. Пенкин А. Л., Метлякова С. А., Воробьев А. А. Исследование расчетных методов проникновения

струи газового топлива в поток воздуха // ТТПС. 2023. № 1 (63).

Дата поступления: 14.06.2024

Решение о публикации: 01.09.2024

Контактная информация:

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич —
докт. техн. наук, доцент; nttk@pgups.ru

ПЕНКИН Алексей Леонидович —
канд. техн. наук, доцент; apenkin1@gmail.com

ВЕДЕРНИКОВА Дарья Рудольфовна —
магистрант; v3dernikowad@yandex.ru

The method of supplying fuel to an internal combustion gas engine

A. A. Vorobev¹, A. L. Penkin², D. R. Vedernikova²

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

² Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2nd Krasnoarmeiskaya Str. 4, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation

For citation: Vorobev A. A., Penkin A. L., Vedernikova D. R. Method of fuel supply to a gas internal combustion engine // Proceedings of Petersburg Transport University. PGUPS. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 661–669. (In Russian) DOI 10.20295/1815-588X-2024-03-661-669

Abstract

Purpose: due to the significant disadvantages of the most commonly implemented fuel supply methods in gas engines, the goal was set to develop a new method of fuel supply. The advantages and disadvantages of existing methods of fuel supply in gas engines, such as central, distributed and direct supply, fuel supply through a dual-fuel nozzle, are considered. **Methods:** on the basis of distributed and direct fuel supply, a combined method was developed, which is a combination of these types of fuel supply. **Results:** this method of fuel supply compensates for the disadvantages of distributed supply (reduction of cylinder filling, accumulation of fuel-air mixture in the intake system and fuel losses at valve closures) and direct (poor-quality mixing in low and full load modes). In different engine operating modes, these types of fuel injection are used in different combinations, which is why the advantages of distributed and direct fuel injection are summed up. In areas of low loads, distributed injection is carried out, or a combination of distributed and direct injection. At medium loads, only direct injection is possible. At full load, it is possible to inject fuel from two injectors in one cycle. An improvement of the distributed feed as part of the combined one is proposed in order to eliminate fuel accumulation in the intake manifold. This effect is achieved through the use of an electronically controlled gearbox, which allows fuel to be supplied with different pressure values to create a directional movement of the gas jet, which also improves mixing. **Practical importance:** the proposed method of supplying natural gas ensures the optimal composition of the fuel-air mixture in all operating modes, increasing the filling ratio, eliminating fuel losses on valve closures.

Keywords: gas engine, natural gas, fuel supply, filling ratio, mixing quality, environmental friendliness of engines

References

1. Ocenka vliyaniya elementov toplivnoj sistemy na koefficient napolneniya gazovogo dvigatelya / A.L. Penkin [i dr.] // *Gruzovik*. 2024. № 5. S. 15–20. DOI: 10.36652/1684-1298-2024-5-15-20. EDN FVPAWX. (In Russian)
2. *Sistemy upravleniya benzinovymi dvigatelyami / per. s nem. M.: OOO “Knizhnoe izdatel’stvo “Za rulem”, 2005. 432 s. (In Russian)*
3. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: v 3 kn. Kn. 1. Teoriya rabochih processov: uchebnik dlya vuzov / V.N. Lukanin [i dr.]; pod red. V.N. Lukanina. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Vysshaya shkola, 2005. 479 s. (In Russian)*
4. *Application of Natural Gas for Internal Combustion Engines, Advances in Natural Gas Technology / Rosli Abu Bakar [et al.]; ed. Dr. Hamid Al-Megren. 2012.*
5. *Dvuhtoplivnaya forsunka DVS: patent na izobretenie № 2 784 858, Ros. Federaciya MPK F02M 43/04 (2022.08); F02M 51/061 (2022.08). № 2022113950 / V.V. Gavrilov, D.D. Bogachev, V.V. Kalinichenko. zayavl. 25.05.2022. Zayavitel’: FGBOU VO “Gosudarstvennyj universitet morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova”. (In Russian)*
6. *Performance of a direct-injection natural gas engine with multiple injection strategies / M. Li [et al.] // Energy. 2019. Vol. 189. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116363.*
7. *Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development: Gasoline and Gas Engines / ed. by Hua Zhao. Elsevier, 2014. 312 p.*
8. *Moon S. Potential of Direct-Injection for the Improvement of Homogeneous-Charge Combustion in Spark-Ignition Natural Gas Engines // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 136. P. 41–48. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.01.068.*
9. *Dvigatel’ vnutrennego sgoraniya na gazovom toplive i sposob upravleniya dvigatelem vnutrennego sgoraniya na gazovom toplive: patent na izobretenie № 2 411 386. Ros. Federaciya, MPK F02D 19/02 (2006.01) F02M 21/02 (2006.01). № 2008130588/06 / Sinagava Tomohiro, Sudzuki Makoto; Tojota Dzidosya Kabusiki Kajsya; zayavl. 28.12.2006. (In Russian)*
10. *Numerical investigations on pilot ignited high pressure direct injection natural gas engines: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews / M. Li [et al.] // Elsevier. 2021. Vol. 150.*
11. *Shishkov V.A. Neposredstvennyj vprysk gazovogo topliva v kameru sgoraniya DVS s iskrovyim zazhiganiem // Transport na al’ternativnom toplive. 2010. № 6 (18). (In Russian)*
12. *Penkin A. L., Metlyakova S. A. Sposob povysheniya odnorodnosti gazovozdushnoj smesi v transportnyh dvigatelyah vnutrennego sgoraniya // International Journal of Advanced Studies. 2023. T. 13, № 1. S. 137–158. DOI: 10.12731/2227-930X2023-13-1-137-158. (In Russian)*
13. *Penkin A. L., Metlyakova S. A., Vorob’ev A. A. Issledovanie raschetnyh metodov proniknoveniya strui gazovogo topliva v potok vozduha // TTPS. 2023. № 1 (63). (In Russian)*

Received: 14.06.2024

Accepted: 01.09.2024

Author’s information:

Aleksandr A. VOROB’EV — D. Sci. in Engineering, Associate Professor; ntk@pgups.ru

Aleksei L. PENKIN — PhD in Engineering, Associate Professor; apenkin1@gmail.com

Dar’ya R. VEDERNIKOVA — Master’s Degree Student; v3dernikowad@yandex.ru

УДК 656.073

Автоматизация приема вагонов к перевозке: система управления и нейросетевая модель

Ф. А. Смирнов, А. В. Новичихин

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

Для цитирования: Смирнов Ф. А., Новичихин А. В. Автоматизация приема вагонов к перевозке: система управления и нейросетевая модель // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС. 2024. Т. 21, вып. 3. С. 670–685. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-670-685

Аннотация

Цель: разработать решение проблемы трудоемкости информационного сопровождения грузовой перевозки с помощью интеллектуальной информационной технологии (далее — ИИТ) на основе изучения проблемных мест взаимодействия перевозчика и грузовладельца, а также существующих методов его улучшения. В статье определена структура ИИТ, усовершенствована система управления процессом приема вагона к перевозке, разработана система поддержки принятия решений в области грузовых железнодорожных перевозок. Схема жизненного цикла перевозочного процесса, построенная с помощью методологии функционального моделирования IDEF0, отражает влияние интеллектуальной информационной технологии на все составляющие при ее внедрении. Практический аспект реализации представлен программным продуктом на базе нейросетевого модельного комплекса. Приведены результаты модельных экспериментов в лабораторных условиях и испытаний в реальных условиях на полигоне Октябрьской железной дороги, которые показали существенное снижение затрат времени на прием вагона к перевозке и влияния человеческого фактора, что в перспективе снижает себестоимость грузовых перевозок. **Методы:** в исследовании применяются методы системного анализа, теории управления перевозками, нейросетевого моделирования и синтеза существующих моделей. **Результаты:** предложена технология и разработаны конкретные инструменты повышения качества информационного сопровождения железнодорожных грузовых перевозок. **Практическая значимость:** внедрение разработанных решений позволит автоматизировать информационное сопровождение железнодорожных грузовых перевозок и обмен данными между перевозчиком и грузоотправителем.

Ключевые слова: интеллектуальная информационная технология, система управления, система поддержки принятия решений, нейросетевая модель, коммерческий осмотр, автоматизация

Введение

Компания ОАО «Российские железные дороги» разрабатывает Интеллектуальную систему управления железнодорожным транспортом (далее — ИСУЖТ) [1, 2] на протяжении последних 10 лет. Элементы ИСУЖТ позволяют автоматизировать процедуру перевозочного процесса на железнодорожном транспорте. Настоящее исследование направлено на разработку

эффективных решений в области грузовой и коммерческой работы. Задачи, поставленные руководством компании ОАО «РЖД» в проекте «Цифровая железная дорога» [3], и специфика транспортных систем [4] создали предпосылки для разработки интеллектуальной информационной технологии (далее — ИИТ) в области грузовой и коммерческой работы. Внедрение ИИТ позволит расширить

«узкие» места, имеющиеся в хозяйстве грузовых перевозок на железнодорожном транспорте:

- трудоемкость процесса приема/сдачи вагона между перевозчиком и грузо-владельцем;
- недостаточная укомплектованность станций приемосдатчиками груза и багажа на малодеятельных линиях;
- необходимость совершенствования информационного сопровождения перевозочного процесса.

На железнодорожном транспорте в настоящее время основным аппаратным средством автоматизации грузовой работы является Автоматизированная система коммерческого осмотра поездов и вагонов (далее — АСКО ПВ) [5]. Основные программные решения представлены Единой автоматизированной системой актово-претензионной работы, Автоматизированной системой оперативного управления перевозками (далее — АСОУП) и автоматизированной системой «Этран» (далее — АС «Этран»).

Несмотря на достаточное количество автоматизированных решений, процесс информационного сопровождения железнодорожной перевозки остается трудоемким, потому что обработка входящего информационного потока и синхронизация данных в различных системах выполняется человеком. При прохождении вагона через АСКО ПВ, оператор при помощи установленных камер и монитора осматривает вагоны на наличие неисправностей и в случае их выявления вручную оформляет необходимые акты и меняет статус перевозочных документов.

В работе [6] предложена блок-схема усовершенствованной системы интеллектуального управления технологическими процессами на железнодорожном транспорте.

Внедрение ИИТ в жизненный цикл железнодорожной грузовой перевозки

В настоящей статье предлагается рассмотреть возможность автоматизации приема вагона к перевозке с помощью внедрения интеллектуальной информационной технологии в процесс коммерческого осмотра с точки зрения технологических изменений при организации перевозки. Место проведения приемо-сдаточных операций ИИТ состоит из следующих основных элементов:

- система управления процессом приема вагона к перевозке;
- система поддержки принятия решений в области грузовых железнодорожных перевозок;
- модель нейронной сети как прикладной инструмент ИИТ.

Комплексное описание и схему существующей информационной технологии сопровождения грузовой и коммерческой работы на железнодорожном транспорте в процессе исследования найти не удалось. В настоящее время правила формирования и передачи информационных сообщений между автоматизированными системами, сопровождающие перевозочный процесс, регламентируются отдельными внутренними нормативными актами компании ОАО «РЖД». Отметим, что формирование информационных сообщений в компании частично автоматизировано, но решение об их передаче принимается и осуществляется уполномоченным сотрудником.

Решить проблему высокой трудоемкости процесса может разработка сквозной интеллектуальной информационной технологии коммерческого осмотра, основанной на концепции совершенствования технологии приема вагонов к перевозке [7]. Технология предполагает применение нейронной сети

для обработки входящей информации и интеграцию автоматизированных систем, что позволит осуществить автоматический обмен информацией между ними.

Структура интеллектуальной информационной технологии состоит из следующих уровней:

1. На концептуальном уровне авторами предлагается исключение человека из процесса информационного сопровождения железнодорожной перевозки.

2. На стратегическом уровне разработана интеллектуальная информационная технология организации коммерческого осмотра.

3. На тактическом уровне для реализации информационной технологии усовершенствована система управления процессом приема вагонов к перевозке.

4. На логическом уровне разработана система поддержки принятия решений в области грузовой и коммерческой работы на железнодорожном транспорте.

5. На физическом уровне одним из способов практической реализации является мобильное приложение на основе нейронной сети для приема вагонов к перевозке.

На рис. 1 описан бизнес-процесс грузовой железнодорожной перевозки. Используемая методология IDEF0¹ позволяет представить систему в виде взаимосвязанных функций, влияющих на процесс грузовой перевозки.

Бизнес-процесс детализирован с помощью методологии IDEF0 в виде жизненного цикла грузовой перевозки на линейном уровне, в котором показаны все механизмы управления и место разработанной интеллектуальной информационной технологии (рис. 2).

Функционирование перевозочного процесса $\sum F_i(t)$ можно описать соотношением:

$$\sum F_i(t) \equiv M(t), P(t), R(t),$$

где $M(t)$ — технические показатели;

$P(t)$ — технологические показатели;

$R(t)$ — экономические показатели.

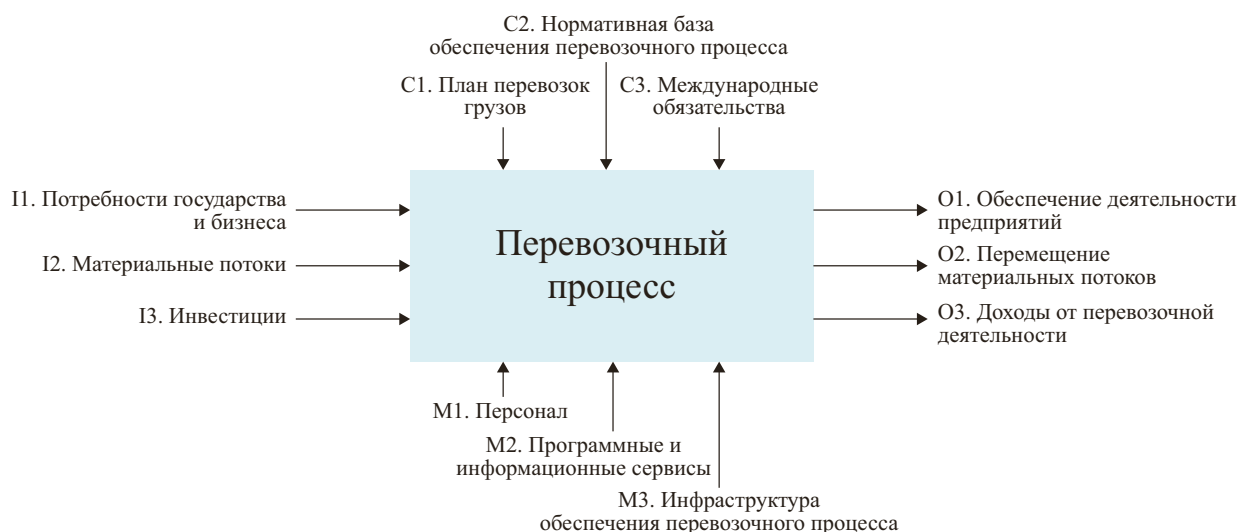


Рис. 1. Функционирование перевозочного процесса с использованием методологии функционального моделирования IDEF0

¹ IDEF0 — методология функционального моделирования и графическая нотация, предназначенная для формализации и описания бизнес-процессов.

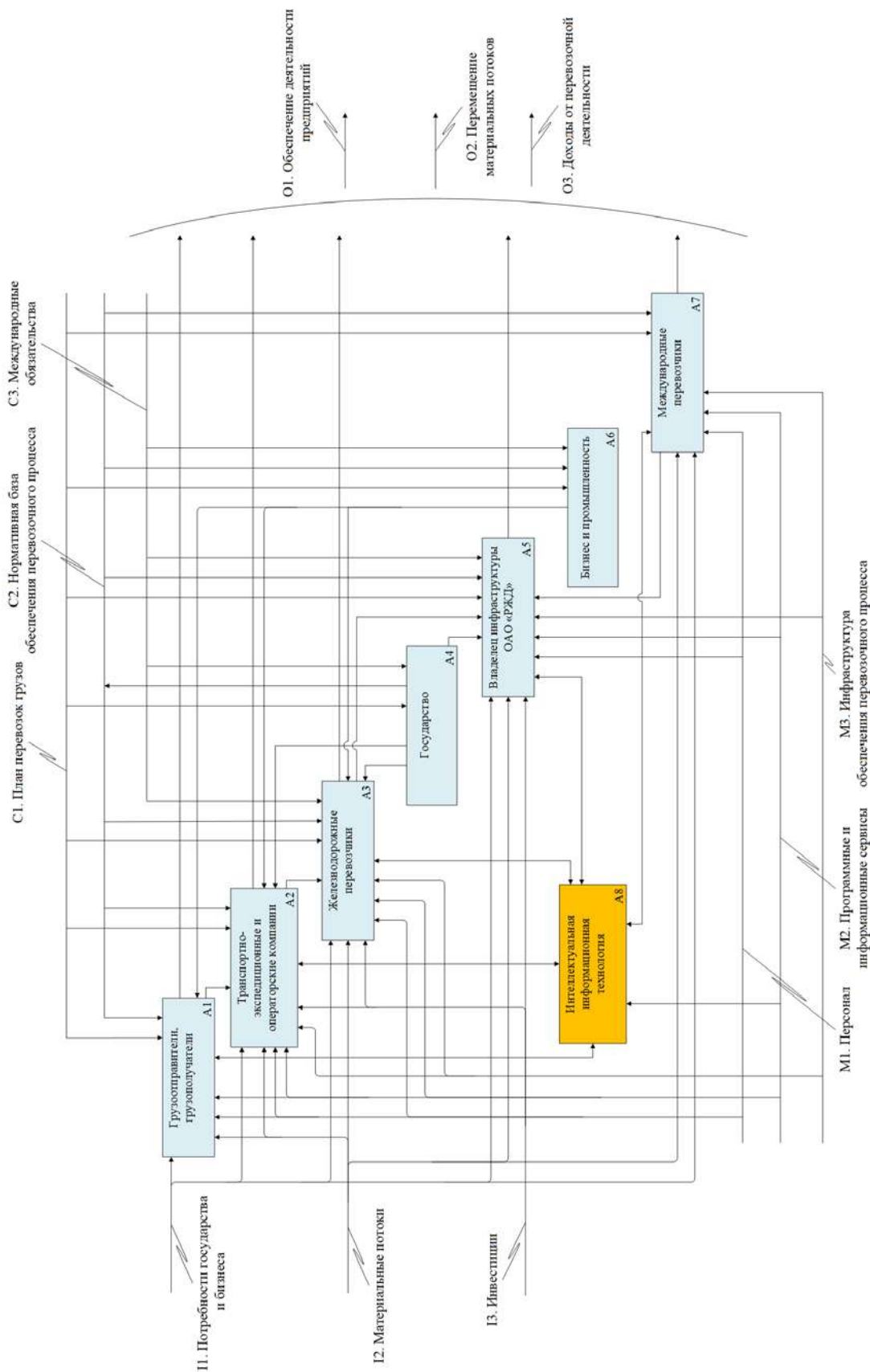


Рис. 2. Жизненный цикл перевозочного процесса в соответствии с методологией функционального моделирования IDEFO

Совершенствование системы управления процессом приема вагонов к перевозке

Разработка новой информационной технологии коммерческого осмотра потребовала усовершенствования существующей системы управления при выполнении коммерческих операций. Авторами была разработана новая система управления процессом приема вагонов к перевозке, базирующаяся на принципах концепции совершенствования грузовой и коммерческой работы [7]. Система предполагает введение в процесс нового понятия «интеллектуальная среда» — это совокупность автоматизированных систем и интеллектуальных продуктов, которая выполняет комплекс процедур, связанных с приемом груза к перевозке, без участия человека. Центральным звеном комплекса является управляющая система в лице структурных подразделений, в которую интегрирована интеллектуальная среда, управляемая вектором $\omega(t)$. Действия этих процедур определяются содержимым девяти баз знаний. Интеллектуальная среда формируется за счет интеграции внешнего прикладного инструмента в виде мобильного приложения для приема вагонов к перевозке с существующими автоматизированными системами, в частности, с АС «Этран» и АСОУП.

Управляющее воздействие $\varphi(t)$ на объект вырабатывается в интеллектуальной среде. Таким образом, свойства входящего вагонного потока $y(t)$ изменяются, и исходящий поток будет иметь конфигурацию $y'(t)$. Функцию обратной связи реализует $\varphi'(t)$, информация поступает в управляющую и экспертную системы. В экспертной системе обрабатываются результаты принятых решений в интеллектуальной среде, оцениваются и передаются в управляющую систему $\varphi''(t)$. На основе проведенной экспертизы выполняются кор-

ректировки алгоритмов, обеспечивающих работу интеллектуальной среды и баз знаний. Исходящий вагонный поток после всех преобразований обладает свойствами $S(t)$ (рис. 3).

Схема системы управления опирается на структуру, разработанную в [8], и содержит основные компоненты типовой структуры интегрированной интеллектуальной системы управления [9]. Приведенные модели не являются новыми, но предлагаемая компоновка в разработанных комплексах позволяет принципиально перестроить систему управления коммерческим осмотром.

В ходе исследования авторами разрабатываются нейросетевые модели, цифровые сервисы и формируется база данных обучающих моделей.

Система поддержки принятия решений

Для реализации функций системы управления была разработана система поддержки принятия решений для грузовых железнодорожных перевозок (далее — СППР). СППР состоит из четырех блоков (рис. 4):

- блок доступа к базам данных;
- аналитический блок;
- блок принятия решений;
- экспертный блок.

Блок доступа к базам данным открывает системе обучающие модели, нормативную документацию и отчеты о предыдущих событиях. Аналитический блок состоит из цифровых моделей объектов, динамической модели процесса управления, нейросетевых моделей и обращается к базам данных для анализа поступающей информации. Блок принятия решений на основании предварительной обработки аналитическим блоком принимает решение и оказывает управляющее воздействие на внешние автоматизированные системы. Связь с пользователем обеспечивается через интерфейс.

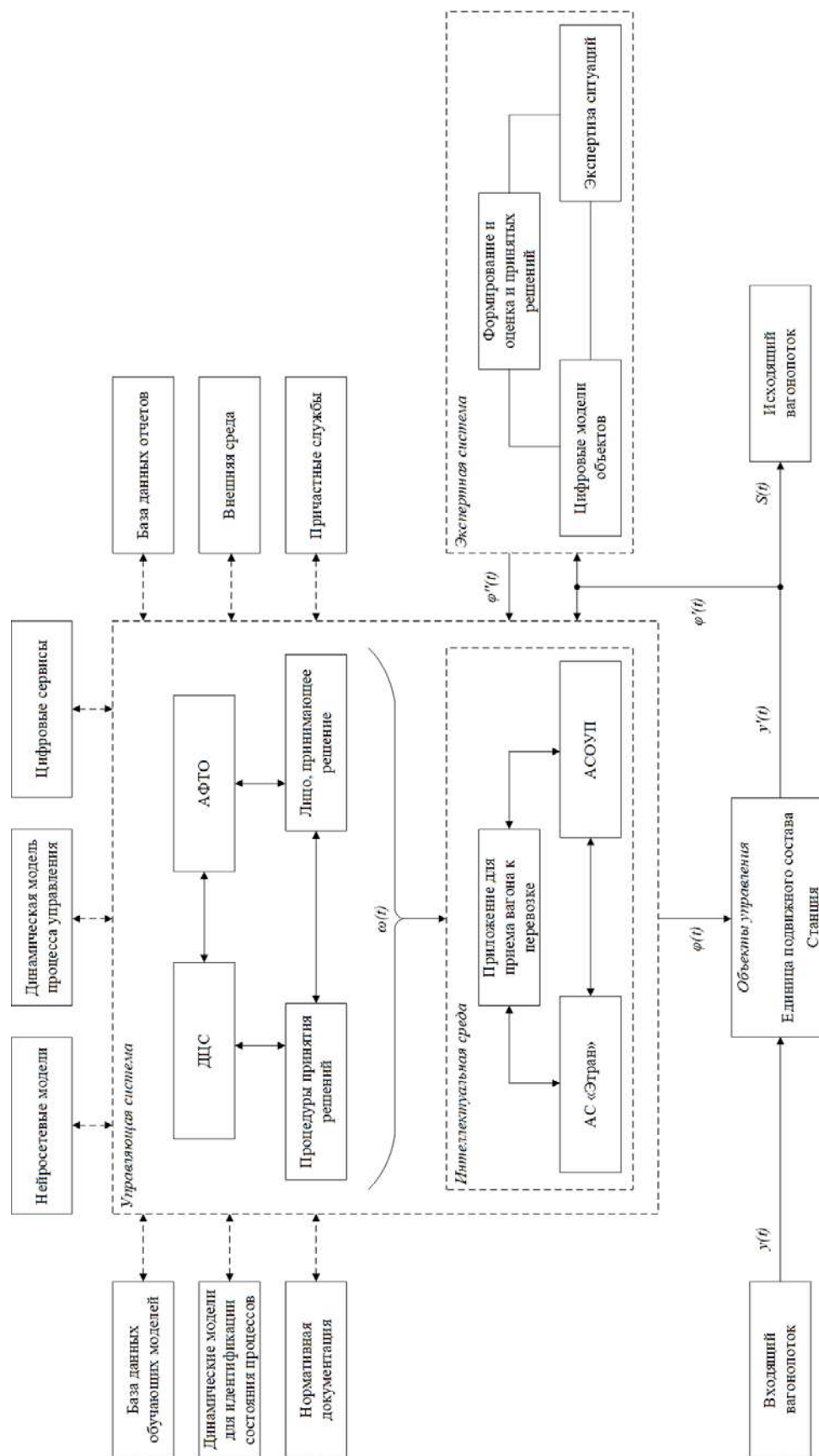


Рис. 3. Система управления процессом приема вагона к перевозке

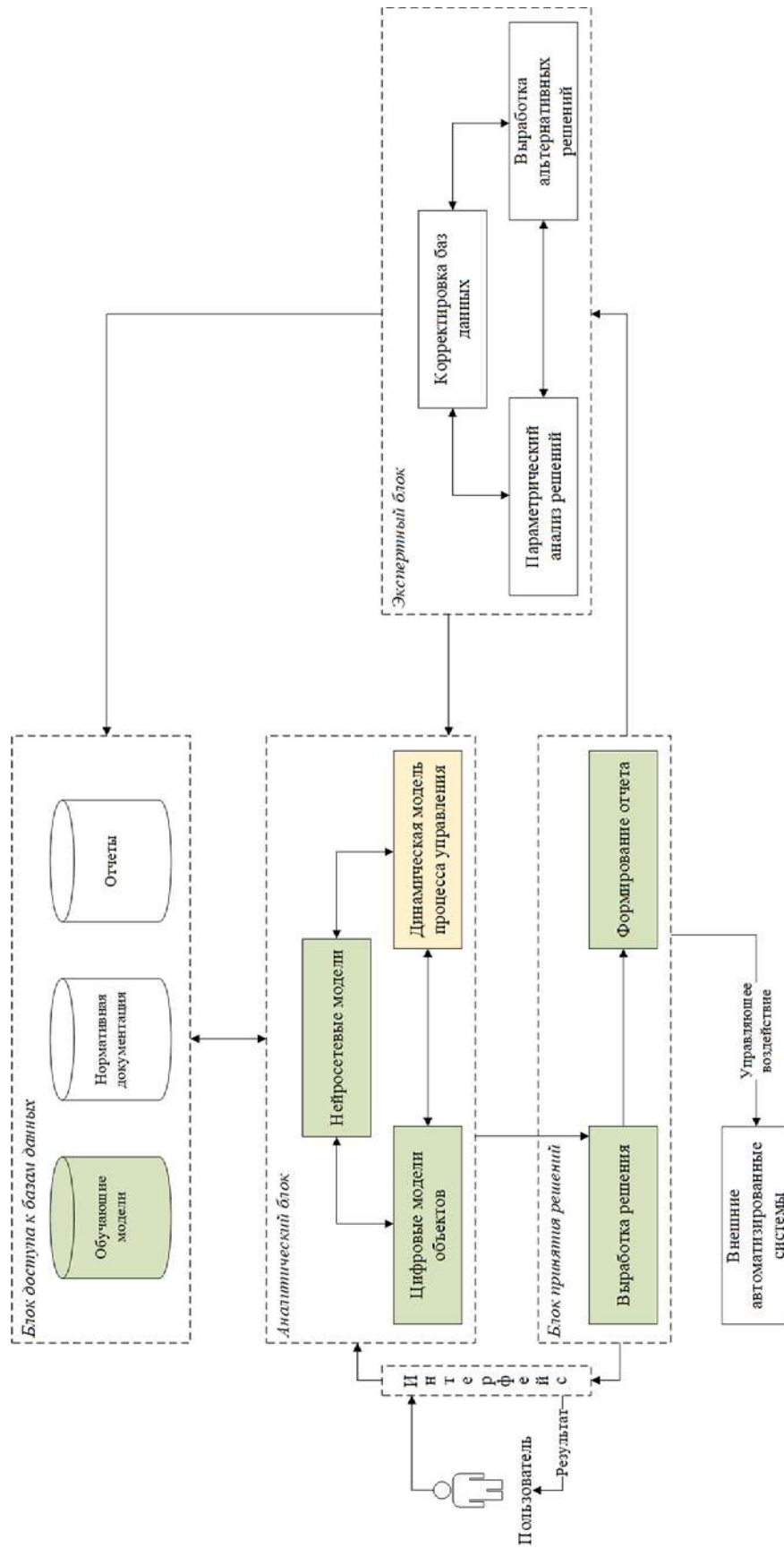


Рис. 4. Система поддержки принятия решений в области грузовых железнодорожных перевозок

Ключевым элементом предложенной СППР является аналитический блок, основанный на синтезе цифровых моделей объекта и нейросетевых моделей, интегрированных с существующей динамической моделью процесса управления. Система отличается выполнением параллельных процессов: одновременно с основными операциями выполняются экспертиза результатов работы и корректировка процедур. Согласно классификации [10], проектируемая система относится к классу активных СППР, так как пользователю предлагается согласиться с выработанным решением.

Разработка нейросетевой модели для распознавания вагонов и грузов

Прикладным решением в рамках новой СППР в области грузовой и коммерческой работы являются разработанные авторским коллективом программные продукты [11, 12].

Работа приложения основана на реализации моделей сверточных нейронных сетей третьего поколения, разработанных во время проведения исследования. Схематично модель применяемой нейронной сети приведена на рис. 5.

Выходной управляющий сигнал формируется следующим образом:

$$U_{\text{ВЫХ}}(U_{jk} \cdot w_{jk}) = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{jk} \cdot w_{jk} \in A \\ 0, & \text{если } U_{jk} \cdot w_{jk} \notin A \end{cases} \quad (1)$$

где

$$U_{\text{ВЫХ}} = \sum_{j=1}^{k=1} U_{jk} \cdot w_{jk} = U_{\text{ВЫХ}}^1 + U_{\text{ВЫХ}}^2 + U_{\text{ВЫХ}}^3 = \\ = U_{11} \cdot w_{11} + U_{12} \cdot w_{12} + \dots + U_{jk} \cdot w_{jk}, \quad (2)$$

где $U_{\text{ВЫХ}}$ — выходные данные сети;

U_{jk} — промежуточные данные, передаваемые по нейронной связи;

w_{jk} — вес нейронной связи;

A — множество данных с положительным исходом.

Применение ИИТ и вышеуказанных элементов на железнодорожном транспорте позволит полностью автоматизировать процесс приема вагонов к перевозке. Тогда эта процедура будет проводиться самим грузоотправителем после погрузки в удобное ему время с помощью мобильного устройства (смартфона), на который будет установлено соответствующее программное обеспечение. Процесс сводится к фотографированию вагона с каждого угла и сверху без участия представителя перевозчика. Ввод изображений осуществляется пользователем с помощью камеры либо из памяти устройства. Изображения проверяются на наличие дефектов кузова вагона, соответствие заявленному

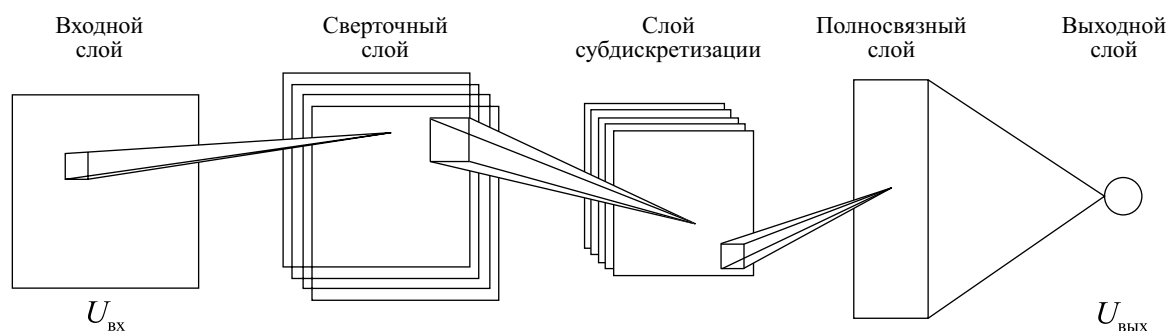


Рис. 5. Упрощенная модель сверточной нейронной сети

роду подвижного состава и груза, а также правильность его погрузки. Кроме того, фотографии сопоставляются между собой на предмет соответствия инвентарного номера вагона. На основании анализа программа формирует итоговый результат и либо разрешает принять вагон к перевозке, либо нет. Благодаря предусмотренной интеграции в существующие автоматизированные системы, в частности, в АС «Этран», решение передается автоматически и не требует от сотрудников перевозчика каких-либо действий по ручному вводу информации.

Кроме того, отметим, что объектом анализа являются именно фотографии, а не видеопоток. Они требуют значительно меньших ресурсов как для распознавания, так и для обучения нейронной сети, а также временных затрат на создание и передачу. Технологией предусматривается и хранение инфор-

мации в течение определенного срока, что также определяет выбор ее типа [13].

Программы на приведенной модели обеспечивают идентификацию подвижного состава, определение типа вагона, распознавание щебня и определение правильности погрузки груза [14, 15]. На рис. 6 показан процесс проведения модельных экспериментов в лабораторных условиях. В настоящий момент программа реализована для двух операционных систем на языках Python и Swift. На рис. 7 приведен фрагмент работы мобильного приложения в реальных условиях на одном из фронтов погрузки щебня на Октябрьской железной дороге. Для проведения эксперимента был выбран щебень как один из видов класса инертных грузов. Более сложные виды погрузки, например по НТУ, рассматривать в текущем состоянии нецелесообразно, так как для выполнения

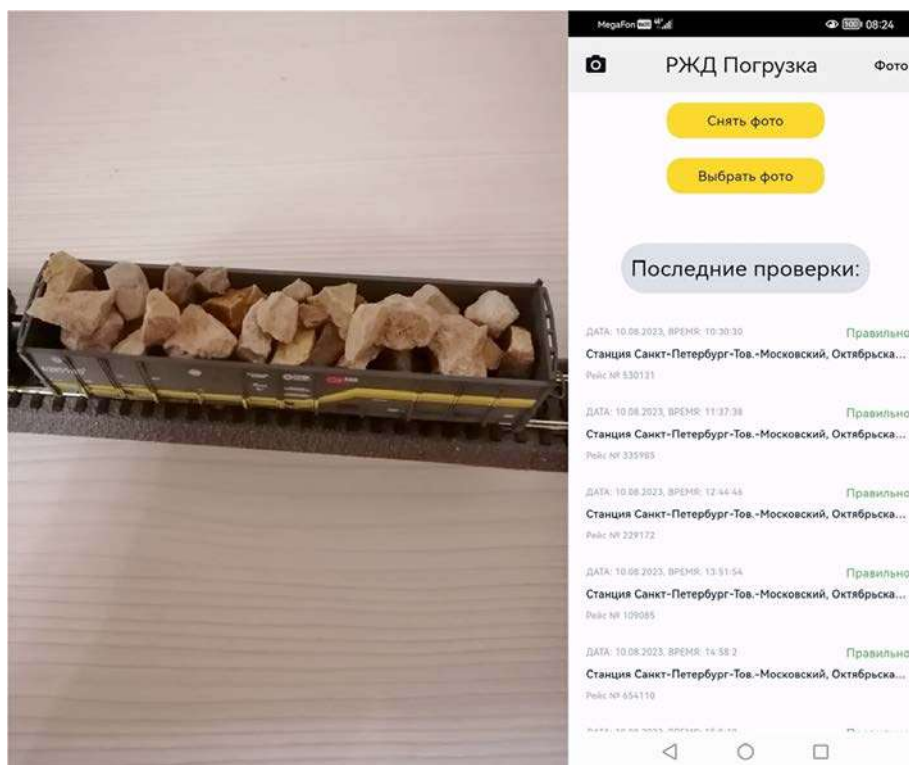


Рис. 6. Проведение модельного эксперимента



Рис. 7. Проведение эксперимента в реальных условиях на полигоне Октябрьской железной дороги

задачи потребуется приложить кратно больше усилий, а объемы погрузки таких грузов значительно уступают инертным, что также обуславливает выбор в пользу последних. Положительный результат позволит применять решение без существенных доработок для остальных видов грузов этого класса.

Планируемые эффекты от внедрения ИИТ

Внедрение ИИТ в перевозочный процесс позволит исключить необходимость в двукратной проверке вагона приемосдатчиком, а именно в приеме вагона к перевозке и коммерческом осмотре перед отправлением, что приведет к уменьшению времени, затрачиваемого на проведение грузовых и коммер-

ческих операций с вагоном. Это позволит уменьшить себестоимость перевозки. В параграфе рассматривается только технологический эффект, экономический будет рассмотрен в дальнейших исследованиях.

Расчет временных затрат на перевозку производится по формуле:

$$t = \sum t_{\text{н.-к.о.}} + \sum t_{\text{в пути}} + \sum t_{\text{техн. опер.}} \quad (3)$$

где $\sum t_{\text{н.-к.о.}}$ — сумма времени, затрачиваемого на выполнение операций на станции погрузки до отправления поезда и на станции выгрузки после прибытия;

$\sum t_{\text{в пути}}$ — сумма времени нахождения вагона в пути;

$\sum t_{\text{техн. опер.}}$ — сумма времени, затрачиваемого на выполнение технологических операций в пути следования (смена локомотива, смена локомотивной бригады, простой на технических станциях и др.).

При этом $\sum t_{\text{н.-к.о.}}$ формируется из следующих компонентов:

$$\sum t_{\text{н.-к.о.}} = 2t_{\text{под}} + t_{\text{погр}} + t_{\text{прием}} + 2t_{\text{уб}} + t_{\text{обр.отпр.}} + t_{\text{обр.приб.}} + t_{\text{выгр}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{под}}$ — время, затрачиваемое на операции, связанные с подачей вагона на путь необщего пользования;

$t_{\text{погр}}$ — время, затрачиваемое на операции, связанные с погрузкой вагона;

$t_{\text{прием}}$ — время, затрачиваемое на операции, связанные с приемом вагона к перевозке;

$t_{\text{уб}}$ — время, затрачиваемое на операции, связанные с уборкой вагона с пути необщего пользования;

$t_{\text{обр.отпр.}}$ — время, затрачиваемое на операции, связанные с обработкой вагона перед отправлением;

$t_{\text{выгр}}$ — время, затрачиваемое на операции, связанные с выгрузкой вагона.

Реализация ИИТ на железнодорожном транспорте уменьшит эту составляющую. Для проверки этой гипотезы на полигоне Октябрьской железной дороги был проведен натурный эксперимент. Для этого нейронная сеть была обучена на фотографиях, сделанных в различных световых и погодных условиях. Первичное тестирование на контрольной выборке фотографий основных типов подвижного состава выполнялось в сухую пасмурную погоду. Проверка показала при идентификации полувагона на фотографии результат 100% точности, при распознавании щебня в полувагоне — 99%, и в 97% случаев

было правильно определено положение груза в полувагоне. В ходе эксперимента был проведен хронометраж временных затрат на проведенные операции и сделан сравнительный анализ с текущим состоянием. Результаты представлены в табл. 1.

Временные значения из табл. 1, полученные в ходе эксперимента, показывают кратное сокращение времени, необходимого для приема вагона к перевозке, в случае внедрения ИИТ. Разница средних значений при применении различных технологий для закрытого подвижного состава составляет 14 раз, полувагона и другого открытого подвижного состава — 9,5 раза, контейнеров на фитинговых платформах — 14,8 раза и платформы с техникой — 40 раз.

На рис. 8 приведено графическое сравнение применения существующей технологии и ИИТ при приеме к перевозке полувагона и другого открытого подвижного состава.

Заключение

В настоящей работе выявлен ряд научно-прикладных задач для организации грузовых перевозок и разработаны методические основы внедрения ИИТ в перевозочный процесс на железнодорожном транспорте. Для решения вопроса трудоемкости информационного сопровождения грузовой перевозки авторами предложено внедрить интеллектуальную информационную технологию коммерческого осмотра вагонов и разработана ее структура. Также при помощи методологии функционального моделирования IDEF0 рассмотрено влияние ИИТ на составляющие перевозочного процесса.

Для создания условий реализации усовершенствована система управления процессом приема вагона к перевозке и разработана система поддержки принятия решений

ТАБЛИЦА 1. Значения $t_{\text{прием}}$ при применении существующей технологии приема вагона к перевозке и при применении ИИТ

Итерация	Закрытый ПС		Полувагон и др. ОПС		Фитинговая платформа		Платформа с техникой		
	Существующая технология	Интеллектуальная информационная технология	Существующая технология	Интеллектуальная информационная технология	Существующая технология	Интеллектуальная информационная технология	Существующая технология	Интеллектуальная информационная технология	
Время, необходимое для приема вагона к перевозке	1	28,0	1,9	28,2	3,3	29,7	1,7	87,2	1,7
	2	27,8	2,1	28,3	3,2	29,6	1,9	68,8	2,0
	3	27,5	2,0	28,7	3,1	29,3	2,0	81,2	2,2
	4	29,3	2,3	28,9	2,8	29,3	1,8	65,6	1,9
	5	29,5	2,1	27,6	2,8	29,5	1,9	91,1	2,1
	6	28,9	2,3	28,5	3,0	28,9	2,2	97,6	1,8
	7	27,7	1,9	28,0	2,9	29,8	2,1	62,5	1,8
	8	27,0	1,8	29,3	3,4	30,1	1,9	72,8	1,8
	9	28,6	1,7	28,2	3,2	30,1	1,7	73,0	2,0
	10	27,6	2,0	27,7	3,0	29,5	2,1	72,3	1,7
	11	26,9	2,3	29,5	2,8	28,8	1,9	76,6	1,8
	12	28,1	1,7	29,0	3,3	29,3	1,7	98,0	2,0
	13	28,3	2,1	27,7	2,8	28,8	2,0	79,9	2,2
	14	27,3	1,9	28,9	3,2	30,5	1,9	92,8	2,2
	15	27,8	1,8	28,2	2,7	30,3	2,1	76,5	2,2
	16	26,7	2,1	28,4	2,9	29,3	1,8	92,1	1,9
	17	28,1	2,0	28,9	2,7	31,0	2,3	90,2	1,8
	18	27,9	2,3	28,7	2,7	29,0	2,3	76,2	2,1
	19	27,7	1,8	28,6	2,8	29,5	2,2	54,0	2,2
	20	28,3	2,3	29,4	2,5	28,7	1,7	92,1	1,7
Среднее значение	28,0	2,0	28,5	3,0	29,6	2,0	80,0	2,0	

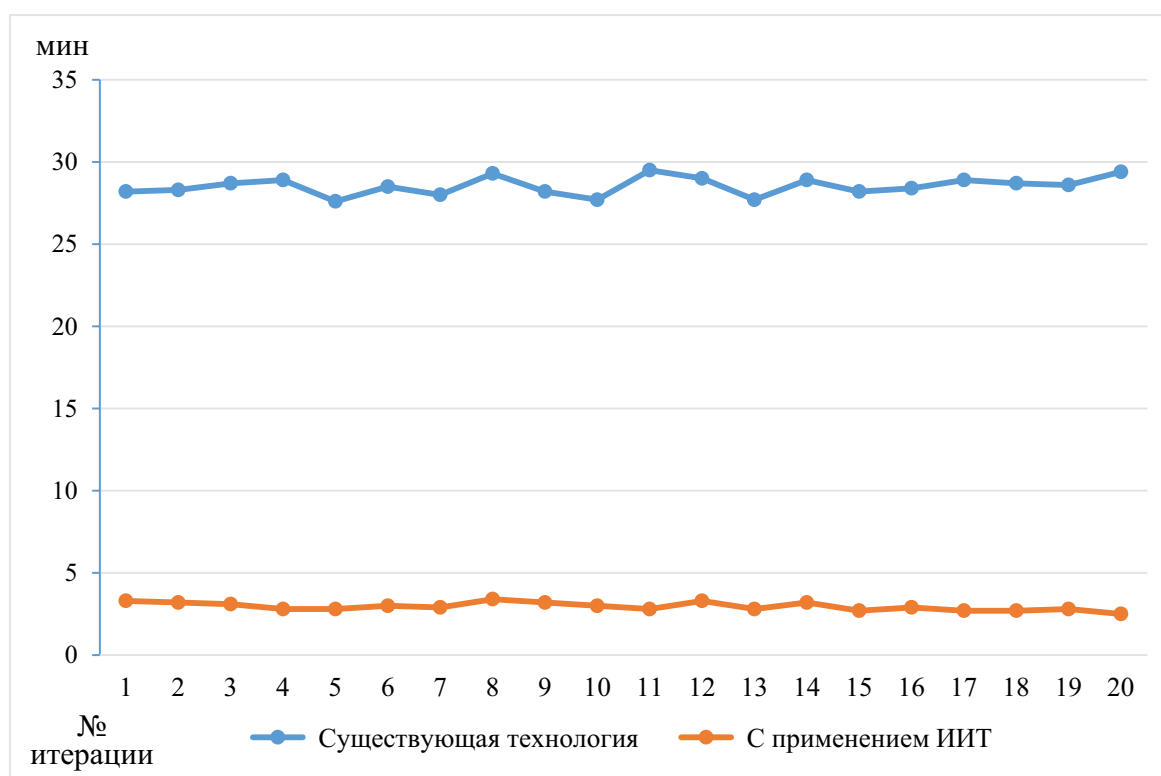


Рис. 8. Сравнительный график времени приема открытого подвижного состава к перевозке

в области грузовой и коммерческой работы. Отметим, что элементы систем не являются новыми, но их предложенная компоновка позволяет увеличить эффективность процесса с помощью организационных изменений. В системе управления приемом вагона к перевозке предложен новый блок «Интеллектуальная среда», включающий в себя разрабатываемое программное обеспечение и обеспечивающий его интеграцию с существующими автоматизированными системами. В СППР новым является «Блок принятия решений», где на основе проведенного анализа полученных изображений формируется решение о приеме вагона к перевозке или об отказе от него, а также формируется управляющее воздействие в интегрированные автоматизированные системы для начала перевозки. Прикладным решением в рамках

спроектированной СППР является мобильное приложение для приема к перевозке полувагонов с щебнем. Оно создано на основе разработанной модели сверточной нейронной сети. В целях проведения лабораторного и натурного экспериментов для подтверждения научной гипотезы в приложение заложен функционал распознавания полувагонов и щебня, в дальнейших исследованиях будут рассмотрены другие комбинации.

Проведен эксперимент, доказывающий технологическую эффективность разработанного решения, определено время, необходимое для приема вагона к перевозке при внедрении ИИТ. Сделан сравнительный анализ, показавший его кратное сокращение.

В продолжение исследования планируется разработать схему интеллектуальной информационной технологии коммерческого

осмотра, ее описание и рекомендации по практическому применению, а также провести эксперимент в других погодных и световых условиях.

Библиографический список

1. Системы управления ж/д транспортом. URL: <https://niias.ru/products-and-services/products/sistemy-upravleniya-zh-d-transportom/> (дата обращения: 10.03.2024).

2. Матюхин В.Г. Интеллектуальные системы для железнодорожного транспорта. Опыт и перспективы // Труды четвертой научно-технической конференции с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование» (ИСУЖТ-2015). М., 2015. С. 3–5.

3. Концепция реализации комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога»: распоряжение ОАО «РЖД» от 05.12.2017 № 1285. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=56885> (дата обращения: 09.03.2024).

4. Верескун В.Д. Методы управления в корпоративных информационных системах на транспорте // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2008. № 1. С. 61–67.

5. Автоматизированная система коммерческого осмотра поездов и вагонов. URL: <https://www.alfa-pribor.ru/products/automated-inspection-system/asko-pv/> (дата обращения: 10.03.2024).

6. Кулькин А.Г. Совершенствование систем управления технологическими процессами на железнодорожном транспорте // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2002. № 2. С. 96–98.

7. Смирнов Ф.А., Новичихин А.В., Ковалев К.Е. Совершенствование грузовой и коммерческой работы на железнодорожном транспорте: концепция и инструментарий // Известия Петер-

бургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20, вып. 2. С. 302–313.

8. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник: в 3 т. Т. 3: Методы современной теории автоматического управления / под ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 748 с.

9. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: МПСИ, 2005. 584 с.

10. Haettenschwiler P. Neues anwenderfreundliches Konzept der Entscheidungs-unterstützung. Gutes Entscheiden in Wirtschaft&Politik. Zurich: Hochschulverlag, 1999. P. 189–208.

11. Программа для определения типа вагонов и опасных грузов: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022617520. 11.04.2022 / 21.04.2022 / Ф.А. Смирнов [и др.].

12. Программа для определения правильности погрузки щебня в полувагон: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023666145. 14.07.2023 / 26.07.2023 / Ф.А. Смирнов, И.А. Щербак, А.В. Новичихин.

13. Сакович И.Л., Смирнов Ф.А., Новичихин А.В. Интеллектуальная информационная технология коммерческого осмотра // Железнодорожный транспорт. 2024. № 5. С. 25–27.

14. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия — Телеком, 2006. 452 с.

15. Владимиров Д.А. Булевы алгебры. М., 1969. С. 320.

Дата поступления: 18.06.2024

Решение о публикации: 14.07.2024

Контактная информация:

СМИРНОВ Федор Андреевич — аспирант;
fsmirnov96@gmail.com

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — доктор техн. наук, профессор; novitchihin@bk.ru

Automation of acceptance of wagons for transportation: control system and neural network model

F. A. Smirnov, A. V. Novichikhin

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

For citation: Smirnov F. A., Novichikhin A. V. Automation of acceptance of wagons for transportation: control system and neural network model // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 670–685. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-670-685

Abstract

Purpose: the article examines the problem areas of interaction between the carrier and the cargo owner, as well as existing methods for improving it. A solution to the problem of labor-intensive information support for freight transportation is proposed using intelligent information technology. Its structure has been determined, the system for managing the process of accepting a wagon for transportation has been improved, and a decision support system in the field of rail freight transportation has been developed. The life cycle diagram of the transportation process, built using the IDEF0 functional modeling methodology, reflects the influence of intelligent information technology on all components during its implementation. The practical aspect of implementation is represented by a software product based on a neural network model complex. The results of model experiments in laboratory conditions and tests in real conditions at the Oktyabrskaya Railway test site are presented, which showed a significant reduction in the time spent on accepting a car for transportation and the influence of the human factor, which in the future reduces the cost of freight transportation. **Methods:** the study uses methods of system analysis, transportation management theory, neural network modeling and synthesis of existing models. Results: a technology has been proposed and specific tools have been developed to improve the quality of information support for rail freight transportation. **Practical significance:** the implementation of the developed solutions will automate information support for rail freight transportation and data exchange between the carrier and the shipper.

Keywords: intelligent information technology, control system, decision support system, neural network model, commercial inspection, automation

References

1. Sistemy upravleniya zh/d transportom. URL: <https://nias.ru/products-and-services/products/sistemy-upravleniya-zh-d-transportom/> (data obrashcheniya: 10.03.2024). (In Russian)
2. Matyuhin V. G. Intellektual'nye sistemy dlya zheleznodorozhnogo transporta. Opyt i perspektivy // Trudy chetvertoj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie" (ISUZHT-2015). M., 2015. S. 3–5. (In Russian)
3. Koncepciya realizacii kompleksnogo nauchno-tehnicheskogo proekta "Cifrovaya zheleznaya doroga": rasporyazhenie OAO "RZHD" ot 05.12.2017 № 1285. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=56885> (data obrashcheniya: 09.03.2024). (In Russian)
4. Vereskun V. D. Metody upravleniya v korporativnyh informacionnyh sistemah na transporte // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2008. № 1. S. 61–67. (In Russian)
5. Avtomatizirovannaya sistema kommercheskogo osmotra poezdov i vagonov. URL: <https://www.alfa-pribor.ru/products/automated-inspection-system/asko-pv/> (data obrashcheniya: 10.03.2024). (In Russian)
6. Kul'kin A. G. Sovershenstvovanie sistem upravleniya tekhnologicheskimi processami na

zheleznodorozhnom transporte // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2002. № 2. S. 96–98. (In Russian)

7. Smirnov F.A., Novichihin A.V., Kovalev K.E. Sovershenstvovanie gruzovoj i kommercheskoj raboty na zheleznodorozhnom transporte: koncepciya i instrumentarij // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2023. T. 20, vyp. 2. S. 302–313. (In Russian)

8. Metody klassicheskoy i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik: v 3-h t. T. 3: Metody sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya / pod red. N.D. Egupova. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2000. 748 s. (In Russian)

9. Novikov D.A. Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami. M.: MPSI, 2005. 584 s. (In Russian)

10. Haettenschwiler P. Neues anwenderfreundliches Konzept der Entscheidungs-unterstützung. Gutes Entscheiden in Wirtschaft&Politik. Zurich: Hochschulverlag, 1999. P. 189–208.

11. Programma dlya opredeleniya tipa vagonov i opasnyh gruzov: svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM № 2022617520. 11.04.2022 / 21.04.2022 / F.A. Smirnov [et al.]. (In Russian)

12. Programma dlya opredeleniya pravil'nosti pogruzki shchebnya v poluvagon: svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM № 2023666145. 14.07.2023 / 26.07.2023 / F.A. Smirnov, I. A. Shcherbak, A.V. Novichihin. (In Russian)

13. Sakovich I.L., Smirnov F.A., Novichihin A.V. Intellektual'naya informacionnaya tekhnologiya kommercheskogo osmotra // Zheleznodorozhnyj transport. 2024. № 5. S. 25–27. (In Russian)

14. Rutkovskaya D., Pilin'skij M., Rutkovskij L. Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy / per. s pol'sk. I.D. Rudinskogo. M.: Goryachaya liniya — Telekom, 2006. 452 s. (In Russian)

15. Vladimirov D.A. Bulevy algebry. M., 1969. S. 320. (In Russian)

Received: 18.06.2024

Accepted: 14.07.2024

Author's information:

Fedor A. SMIRNOV — Postgraduate Student; fsmirnov96@gmail.com

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

УДК 628.38; 666.973.2; 539.1.074

Исследование экологической безопасности автоклавного золопенобетона, полученного с использованием золы от сжигания осадка сточных вод

Е. В. Русанова

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

Для цитирования: Русанова Е. В. Исследование экологической безопасности автоклавного золопенобетона, полученного с использованием золы от сжигания осадка сточных вод // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 686–693. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-686-693

Аннотация

В статье приведены исследования экологической безопасности автоклавного золопенобетона с использованием золы от сжигания осадка сточных вод в построенном и эксплуатируемом производственном здании. Показано, что после продолжительной эксплуатации здание из автоклавного золопенобетона, полученного с использованием золы с завода по сжиганию осадка сточных вод, оказалось экологически безопасным для человека. **Цель:** зола от сжигания осадка сточных вод обладает высокой средней удельной радиоактивностью (радия и тория), что сильно ограничивает ее дальнейшее применение. Ранее было установлено, что применение золы от сжигания осадка сточных вод в качестве сырья в автоклавном золопенобетоне в различных пропорциях оказывает влияние на содержание естественных радионуклидов в готовой продукции. В статье рассматривается экологическая безопасность автоклавного золопенобетона после продолжительной эксплуатации. **Методы:** исследования проводились на действующем объекте при помощи поверенного дозиметра-радиометра АТОМЕХ МКС-АТ6130. **Результаты:** было установлено, что во всех образцах автоклавного золопенобетона с использованием золы от сжигания осадка сточных вод создаваемый радиационный фон был ниже нормы — на границе пороговых значений. **Практическая значимость:** результаты работы имеют важное значение для строительства, так как расширяют представления об особенностях автоклавного золопенобетона и возможности безопасного использования золы от сжигания осадка сточных вод в строительстве.

Ключевые слова: зола от сжигания осадка сточных вод, утилизация золы, автоклавный золопенобетон, применение автоклавного золопенобетона, строительство зданий, содержание естественных радионуклидов, радиационное исследование золы, экологическая безопасность

В настоящее время во многих городах мира реализована технология утилизации осадка, возникающего после очистки канализационных сточных вод. Осадок в виде золы получается чаще всего путем его сжигания в печах преимущественно с кипящим песчаным слюем. Это позволяет обработать весь поступающий осадок. Возникающая от сжигания осадка сточных вод зола позволяет существенно

сократить объем получающегося продукта, что влечет за собой значительное сокращение экономических затрат на перевозку и дальнейшее хранение. Необработанный осадок сточных вод, как и зола от его сжигания, являются отходом IV класса опасности [1, 2]. Однако зола гораздо меньше загрязняет окружающую среду, чем осадок, так как суммарный объем ее производства за год существенно меньше.

Физико-механические свойства золы от сжигания осадка сточных вод Санкт-Петербурга (ГУП «Водоканал СПб») были исследованы в [3].

С точки зрения экологической безопасности выявлено следующее:

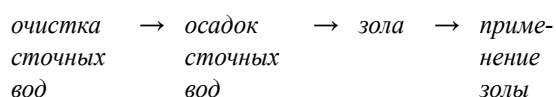
- пыление золы создает вторичное загрязнение воздушного бассейна вокруг полигонов складирования [4], загрязнение водного бассейна, в том числе подземных вод;

- повышенное содержание ионов тяжелых металлов и повышенное содержание естественных радионуклидов в золе от сжигания осадка сточных вод является следствием особенности канализования г. Санкт-Петербурга и обработки осадка в данной местности (рис. 1).

В НИИ радиационной гигиены и ГУП «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» были проведены исследования содержания естественных радионуклидов в золе при сжигании осадка (рис. 1). С точки зрения экологической безопасности зола от сжигания осадка сточ-

ных вод имеет умеренный класс опасности [5] — не выше II (рис. 2).

Несмотря на то что осадки после очистки сточных вод в мире сжигаются уже давно, вопрос о полном или хотя бы малоотходном производстве пока не решен. Длительное время ведутся исследования по использованию золы от сжигания осадка сточных вод [6, 7, 8, 9, 10], чтобы добиться полностью замкнутого цикла:



Один из вариантов использования золы от сжигания осадков сточных вод — использование ее как вторичного сырья при производстве пенобетона автоклавным методом. Данный материал получил название автоклавного золопенобетона [11], его основные свойства представлены в табл. 1. Содержание естественных радионуклидов в образцах автоклавного золопенобетона различного состава представлено на рис. 3.

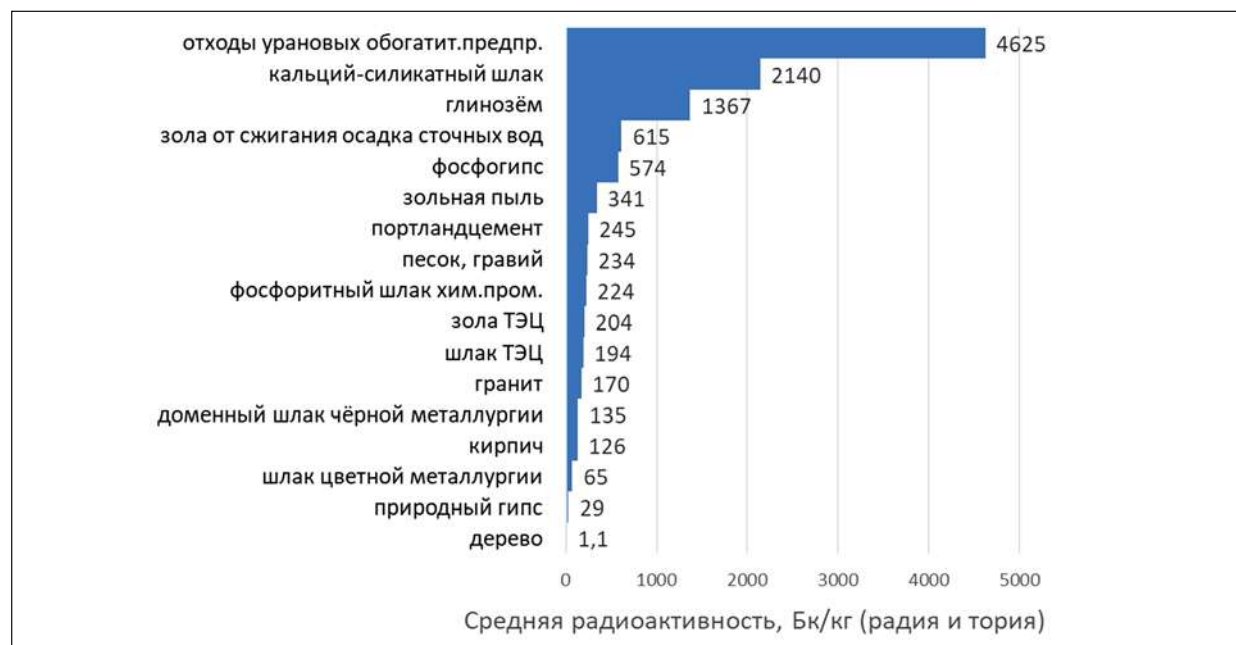


Рис. 1. Содержание естественных радионуклидов в различных естественных и искусственных материалах

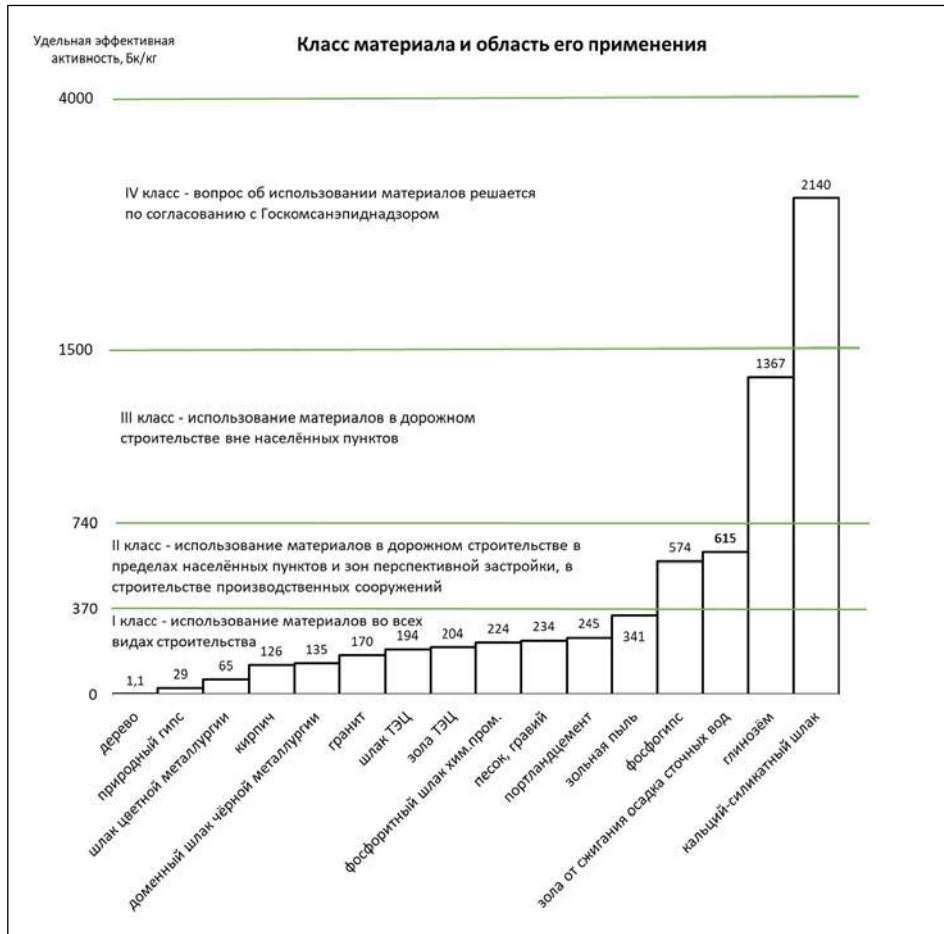


Рис. 2. Классы материалов и область их применения

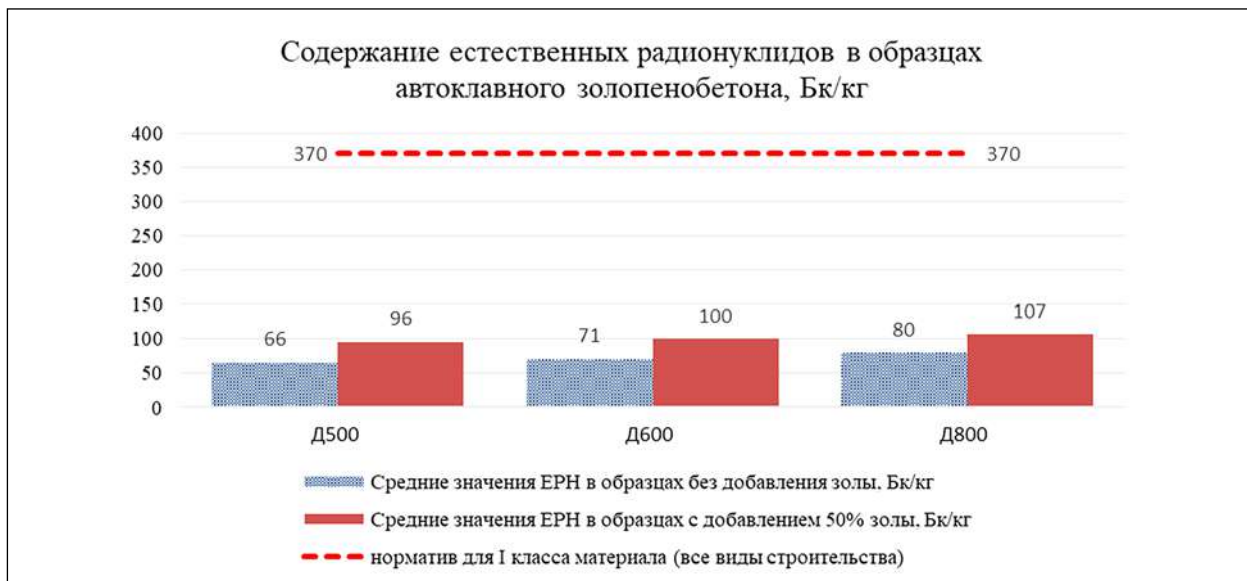


Рис. 3. Содержание естественных радионуклидов в образцах автоклавного золопенобетона

ТАБЛИЦА 1. Свойства золопенобетона автоклавного твердения

Средняя плотность золопенобетона, полученного по автоклавной технологии	Физико-механические свойства				Средние значения ЕРН, Бк/кг
	Прочность при сжатии, МПа	Сорбционная влажность, %	Морозостойкость, циклов	Теплопроводность, Вт/м°	
Д500 без золы	19	11	15	0,12	66
Д600 без золы	25	12	25	0,14	71
Д800 без золы	35	15	25	0,21	80
Д500 с 50% золы	15	14	15	0,10	96
Д600 с 50% золы	20	14	15	0,12	100
Д800 с 50% золы	25	17	15	0,19	107

Автоклавный золопенобетон с использованием золы от сжигания осадка сточных вод экологически безопасен, так как относится к I классу (рис. 3), и его можно применять во всех сферах строительства без ограничений [12].

Таким образом получается создать полную цепочку утилизации данного вида отходов:

очистка сточных вод → *осадок сточных вод* → *зола* → *авто-клавный золопенобетон* → *применение в строительстве*



а



б

Рис. 4. Корпус промышленного здания (Предпортовая) из блоков автоклавного золопенобетона: а — 2005 год; б — 2024 год (фото Е. В. Русановой)

Опытная научно-производственная база строительных материалов Санкт-Петербургского государственного университета путей сообщения получила данные, с учетом которых был построен корпус промышленного здания из блоков автоклавного золопенобетона (рис. 4).

Для определения экологической безопасности были проведены исследования по определению уровня величины поглощенной дозы излучения на этом действующем объекте при помощи поверенного дозиметра-радиометра АТОМЕХ МКС-АТ6130 (рис. 5). Результаты замеров приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерения автоклавного золопенобетона

Средняя плотность автоклавного золопенобетона	Средние измеренные значения, $\mu\text{Sv/h}$
Д500 без золы	0,05
Д600 без золы	0,05
Д800 без золы	0,06
Д500 с 50% золы	0,06
Д600 с 50% золы	0,07
Д800 с 50% золы	0,08
Фоновое измеренное значение	0,08



Рис. 5. Проведение измерений автоклавного золопенобетона различного состава:
а и *б* — блоки пенобетона, *в* — фоновое значение (фото Е. В. Русановой)

Измерения показали, что доза излучения в пределах корпуса промышленного здания составила не более $0,08 \mu\text{Sv/h}$. Также видно, что во всех случаях в исследуемых образцах доза излучения составила не более $0,08 \mu\text{Sv/h}$ и находится в пределах фоновых значений (табл. 2). По сравнению с известными пороговыми значениями радиационного фона [13] автоклавный золопенобетон обладает безопасным уровнем для человека и составляет менее

$0,30 \mu\text{Sv/h}$ (рис. 6). То есть данный материал не вносит вклад в дополнительное облучение населения в целом и рабочих в частности.

Вывод: автоклавный золопенобетон, который получен с использованием золы от сжигания осадка канализационных сточных вод, является экологически чистым и безопасным для человека. Это позволяет без ограничений использовать его в строительстве, а область применения золы существенно расширить.

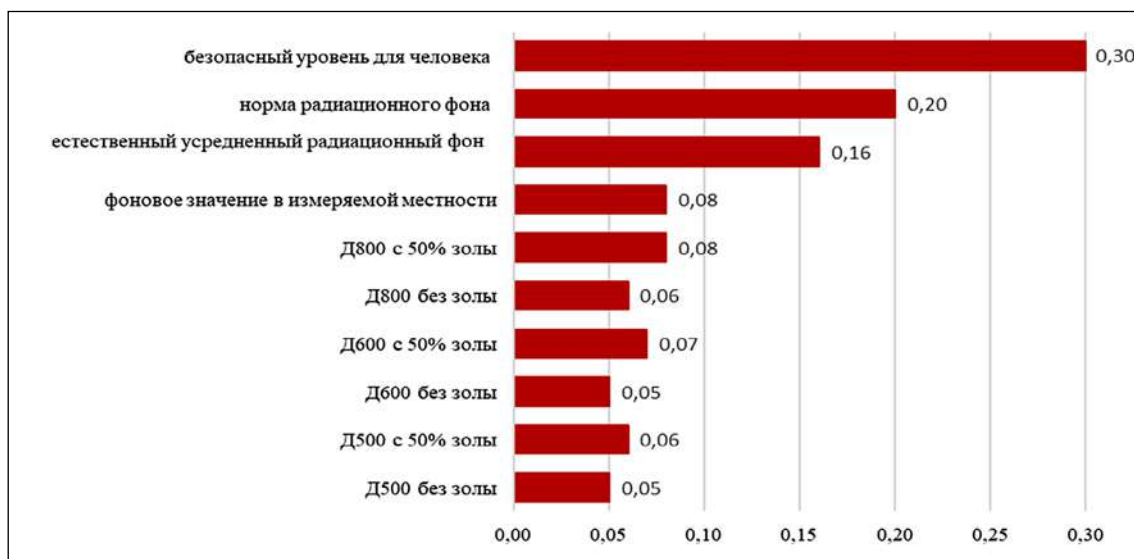


Рис. 6. Доза излучения, мкЗв/ч

Библиографический список

1. Об утверждении критериев отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду: приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 04.12.2014 № 536.

2. Эколого-гигиеническая оценка отходов производства для применения в дорожном строительстве / Н.В. Русаков [и др.] // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96, № 4. С. 309–313. DOI: 10.18821/0016-9900-2017-96-4-309-313. EDN YKUQIB.

3. Русанова Е. В. Физико-химические исследования автоклавного золопенобетона // Новые исследования в материаловедении и экологии: сборник научных статей сотрудников, аспирантов, докторантов и студентов. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2005. Вып. 5. С. 95–96. EDN DHLODO.

4. Новые экозащитные технологии на железнодорожном транспорте: монография / Л.Б. Сватовская [и др.]. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2007. 159 с. ISBN 978-5-89035-358-0. EDN RYRPAV.

5. ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов.

6. Утилизация коммунальной золы / С.В. Селиванова [и др.] // Actualscience. 2016. Т. 2, № 4. С. 38–39. EDN VXCWHJ.

7. Сучкова М. В. Полезная утилизация золы сжигания осадка сточных вод // Нефтяная столица: Третий Международный молодежный научно-практический форум (Нижевартовск, 18–19 февраля 2020 года): сборник материалов. Нижевартовск: Центр научно-технических решений, 2020. С. 310–316. EDN LUJBYU.

8. Смирнов Ю. Д., Сучкова М. В. Перспективы полезного использования золы сжигания осадка сточных вод в народном хозяйстве // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 3 (79). С. 16–25.

DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.3.16-25. EDN WVMACH.

9. Результаты исследований по применению осадков городских сточных вод в производстве строительных материалов / М.В. Паршикова [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 4. С. 25–30. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-25-30. EDN VPNZUR.

10. Способ утилизации золы: патент № 2294905 С2 Российская Федерация, МПК C04B 20/04, C04B 18/06, C04B 20/10. № 2001136046/03 / С.В. Карпов, А.О. Дьяков; заявл. 26.12.2001, опубл. 10.03.2007. Заявитель: А.Г. Умвельт. EDN ZKGZBJ.

11. Автоклавный золопенобетон: патент № 2256632 С1 Российская Федерация, МПК C04B 38/10. № 2004108763/03 / Л. Б. Сватовская [и др.]; заявл. 24.03.2004, опубл. 20.07.2005. Заявитель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Министерства путей сообщения Российской Федерации». EDN ZOLIUX.

12. Русанова Е. В. Снижение радиоактивности при производстве строительных материалов // Новые исследования в материаловедении и экологии: сборник научных статей сотрудников, аспирантов, докторантов и студентов (кафедра «Инженерная химия и защита окружающей среды») / отв. ред. Л.Б. Сватовская. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2004. С. 71–74. EDN PSOJFK.

13. Stabin M. G. Radiation Protection and Dosimetry: an Introduction to Health Physics. Springer, 2010.

Дата поступления: 18.07.2024

Решение о публикации: 01.09.2024

Контактная информация:

РУСАНОВА Екатерина Владимировна — канд. техн. наук, доцент; rusanovaev@mail.ru

Research of ecological safety of autoclaved ash-foam concrete produced with ash from sewage sludge incineration

E. V. Rusanova

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

For citation: *Rusanova E.V.* Research of ecological safety of autoclaved ash-foam concrete, produced with ash from sewage sludge incineration // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 686–693. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-686-693

Abstract

The article presents the research of ecological safety of autoclaved ash-foam concrete using ash from sewage sludge incineration in the constructed and operated production building. It is shown that after more than eighteen years of operation, the building made of autoclaved ash-foam concrete obtained using ash from sewage sludge incineration plant turned out to be environmentally safe for humans. **Purpose:** ash from sewage sludge incineration has high average specific radioactivity (radium and thorium), which strongly limits its further use. Earlier it was found that the use of ash from sewage sludge incineration as a raw material in autoclaved ash-foam concrete in different proportions affects the content of natural radionuclides in the finished product. The paper considers the environmental safety of autoclaved ash-foam concrete after prolonged operation. **Methods:** the research was carried out at the operating facility using a verified dosimeter-radiometer ATOMEX MKC-AT6130. **Results:** it was found that in all samples of autoclaved ash-foam concrete produced with ash from sewage sludge incineration the generated radiation background was below the norm, on the border of threshold values. **Practical significance:** the results of the work are important for construction, as they expand the ideas about the peculiarities of autoclaved ash-foam concrete and the possibility of safe use of ash from sewage sludge incineration in construction.

Keywords: ash from sewage sludge incineration, ash utilisation, autoclaved ash-foam concrete, application of autoclaved ash-foam concrete, building construction, natural radionuclide content, radiation study of ash, environmental safety

References

1. Ob utverzhdenii kriteriev otneseniya otkhodov k I–V klassam opasnosti po stepeni negativnogo vozdeystviya na okruzhayushhuyu sredu: prikaz Ministerstva prirodny`x resursov i e`kologii RF ot 04.12.2014 № 536. (In Russian)

2. E`kologo-gigienicheskaya ocenka otkhodov proizvodstva dlya primeneniya v dorozhnom stroitel`stve / N. V. Rusakov [i dr.] // Gigiena i sanitariya. 2017. T. 96, № 4. S. 309–313. DOI: 10.18821/0016-9900-2017-96-4-309-313. EDN YKUQIB. (In Russian)

3. Rusanova E. V. Fiziko-ximicheskie issledovaniya avtoklavnogo zolopenobetona // Novy`e issledovaniya v materialovedenii i e`kologii: sbornik nauchny`x statej sotrudnikov, aspirantov, doktorantov i studentov.

SPb.: Peterburgskij gosudarstvenny`j universitet putej soobshheniya Imperatora Aleksandra I, 2005. Vy`p. 5. S. 95–96. EDN DHLODO. (In Russian)

4. Novy`e e`kozashhitny`e texnologii na zhelezno-dorozhnom transporte: monografiya / L. B. Svatovskaya [i dr.]. M.: Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2007. 159 s. ISBN 978-5-89035-358-0. EDN RYRPAV. (In Russian)

5. GOST 30108–94. Materialy` i izdeliya stroitel`ny`e. Opredelenie udel`noj e`ffektivnoj aktivnosti estestvenny`x radionuklidov. (In Russian)

6. Utilizaciya kommunal`noj zoly` / S. V. Selivanova [i dr.] // Actualscience. 2016. T. 2, № 4. S. 38–39. EDN VXCWHJ. (In Russian)

7. Suchkova M. V. Poleznaya utilizatsiya zoly` szhiganiya osadka stochny`x vod // Neftyanaya stolitsa: Tretij Mezhdunarodny`j molodezhny`j nauchno-prakticheskij forum (Nizhnevartovsk, 18–19 fevralya 2020 goda): sbornik materialov. Nizhnevartovsk: Centr nauchno-texnicheskix reshenij, 2020. S. 310–316. EDN LUJBYU. (In Russian)
8. Smirnov Yu. D., Suchkova M. V. Perspektivy` poleznogo ispol`zovaniya zoly` szhiganiya osadka stochny`x vod v narodnom xozyajstve // Voda i e`kologiya: problemy` i resheniya. 2019. № 3 (79). S. 16–25. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.3.16-25. EDN WVMACH. (In Russian)
9. Rezul`taty` issledovanij po primeneniyu osadkov gorodskix stochny`x vod v proizvodstve stroitel`ny`x materialov / M. V. Parshikova [i dr.] // Intellektual`ny`e sistemy` v proizvodstve. 2023. T. 21, № 4. S. 25–30. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-25-30. EDN VPNZUR. (In Russian)
10. Sposob utilizatsii zoly`: patent № 2294905 C2 Rossijskaya Federaciya, MPK C04B 20/04, C04B 18/06, C04B 20/10. № 2001136046/03 / S. V. Karpov, A. O. D`yakov; zayavl. 26.12.2001, opubl. 10.03.2007. Zayavitel`: A. G. Umvel`t. EDN ZKGZBJ. (In Russian)
11. Avtoklavny`j zolopenobeton: patent № 2256632 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK C04B 38/10. № 2004108763/03 / L. B. Svatovskaya [i dr.]; zayavl. 24.03.2004, opubl. 20.07.2005. Zayavitel`: Gosudarstvennoe obrazovatel`noe uchrezhdenie vy`sshego professional`nogo obrazovaniya “Peterburgskij gosudarstvenny`j universitet putej soobshheniya Ministerstva putej soobshheniya Rossijskoj Federacii”. EDN ZOLIUX. (In Russian)
12. Rusanova E. V. Snizhenie radioaktivnosti pri proizvodstve stroitel`ny`x materialov // Novy`e issledovaniya v materialovedenii i e`kologii: sbornik nauchny`x statej sotrudnikov, aspirantov, doktorantov i studentov (kafedra “Inzhenernaya ximiya i zashhita okruzhayushhej sredy”) / otv. red. L. B. Svatovskaya. SPb.: Peterburgskij gosudarstvenny`j universitet putej soobshheniya Imperatora Aleksandra I, 2004. S. 71–74. EDN PSOJFK. (In Russian)
13. Stabin M. G. Radiation Protection and Dosimetry: an Introduction to Health Physics. Springer, 2010.

Received: 18.07.2024

Accepted: 01.09.2024

Author’s information:

Ekaterina V. RUSANOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; rusanovaev@mail.ru

УДК 625.031.1

Диагностика системы взаимодействия железнодорожного пути и подвижного состава по параметрам комфорта езды и эквивалентной конусности

А. С. Гапоненко, А. А. Киселев

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

Для цитирования: Гапоненко А. С., Киселев А. А. Диагностика системы взаимодействия железнодорожного пути и подвижного состава по параметрам комфорта езды и эквивалентной конусности // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. 2024. Т. 21, вып. 3. С.694–705. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-694-705

Аннотация

Цель: выявить влияние геометрических параметров колесных пар и рельсовой колеи на показатели плавности хода и уровня комфорта езды пассажиров для автоматизированной системы диагностики. **Методы:** при проведении исследований были использованы статистические методы. Выборка и анализ данных статистических наблюдений позволили выявить существующие подходы оценки уровней взаимодействия системы «колесо — рельс» при разных скоростях движения. Сгруппированные в ряды участки пути по пикетам были оценены по показателям комфорта езды пассажиров и эквивалентной конусности. Использованы материалы общего доступа и официальных сайтов, исследования авторов. **Результаты:** выявлен перечень факторов, влияющих на условия взаимодействия скоростного подвижного состава и железнодорожного пути. Получены данные показателей комфорта езды и эквивалентной конусности для линии Санкт-Петербург — Москва по пикетам при фактических реализуемых скоростях движения. **Практическая значимость:** определена возможность использования диагностики дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар и рельсов и геометрических параметров рельсовой колеи. Рекомендованы предложения по улучшению качественной оценки взаимодействия системы «колесо — рельс».

Ключевые слова: уровень комфорта, дискомфорт, комфортабельность езды пассажиров, эквивалентная конусность, ускорения, взаимодействие колеса с рельсом, колесная пара, профиль рельса, система диагностики

До начала 2000-х годов диагностика подвижного состава и диагностика путевой инфраструктуры велись независимо друг от друга. С появлением микропроцессорной системы диагностики ходовых частей появилась возможность непрерывного мониторинга сил взаимодействия пути и подвижного состава, построения прогнозных моделей их развития и предупреждения неисправностей. Эксплуатируемый в России высокоскоростной подвижной состав «Сап-

сан» оснащен микропроцессорной системой диагностики версии 1.0. В функциональные возможности системы диагностики входят такие компоненты, как контроль устойчивости хода (КУХ) и индекс состояния пути [1].

Система диагностики взаимодействия железнодорожного пути и подвижного состава «Сапсан» позволяет дополнить данные, полученные от мобильных средств диагностики инфраструктуры и других напольных систем бесконтактного контроля (контроль

нагрева буксовых узлов, контроль состояния поверхности катания колеса и т. д.). На основе мониторинга полученных данных о состоянии железнодорожного пути и реакции подвижного состава на неровности пути можно прогнозировать модель поведения каждой отдельной единицы подвижного состава с целью предупреждения отказа и своевременного обслуживания.

Использование датчиков ускорений позволяет ходовым тележкам выявлять как неровности пути, так и неровности на поверхности катания колес, а также отдельные неисправности ходовых частей (деградацию/излом рессор, амортизаторов колебаний и др.).

Датчики ускорений регистрируют ускорения на трех уровнях (рис. 1):

1. Неподдресоренные массы (установлены на буксовых узлах колесных пар) позволяют оценить уровень сил взаимодействия в зоне контакта колеса и рельса (ускорения величиной до 100g).

2. Датчики КУХ (установлены на раме тележки) позволяют выявить неисправности первой ступени рессорного подвешивания, а также оценить силы, вызванные извилистым движением колесных пар (ускорения до 5g). С повышением скорости движения

частота и амплитуда извилистых колебаний увеличиваются. При превышении «критической» скорости движения свободного зазора между гребнями колес и рельсами становится недостаточно для компенсации колебаний. «Критическая» скорость для одного и того же подвижного состава может значительно различаться в зависимости от состояния ходовых частей (износа колес, деградации амортизаторов поперечных колебаний) и состояния пути (сужения рельсовой колеи, износа головки рельсов).

3. Датчики второй ступени подвешивания (установлены на кузове вагона) позволяют выявить неисправности пневмоподвешивания и гасителей колебаний (рис. 2), а также оценить силы, вызванные длинными неровностями пути (ускорения до 2g).

Для привязки координат к путевой инфраструктуре используется приемник GPS или ГЛОНАСС и система беспроводной передачи информации о выявленных отступлениях на сервер организации, эксплуатирующей подвижной состав. Например, на основе измеренных данных в режиме реального времени формируется предупреждение о превышении предельного уровня (4-я степень) ускорения кузова вагона в вертикальной плоскости. Экспертная система анализа

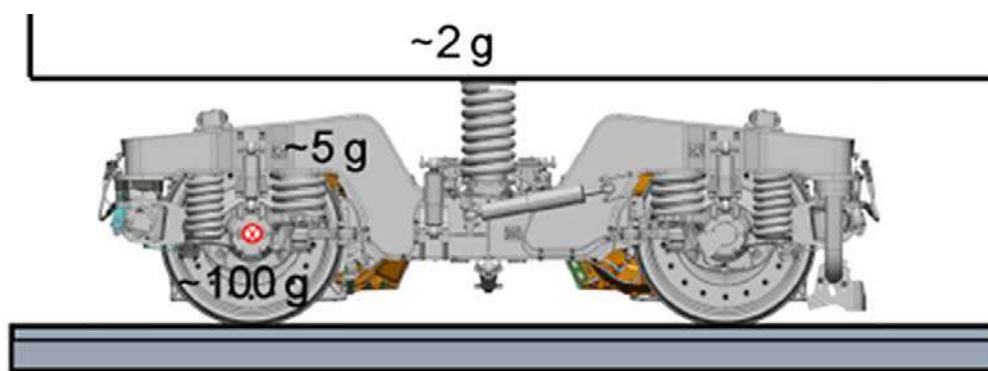


Рис. 1. Датчики ускорений, установленные на ходовой тележке «Сапсана»

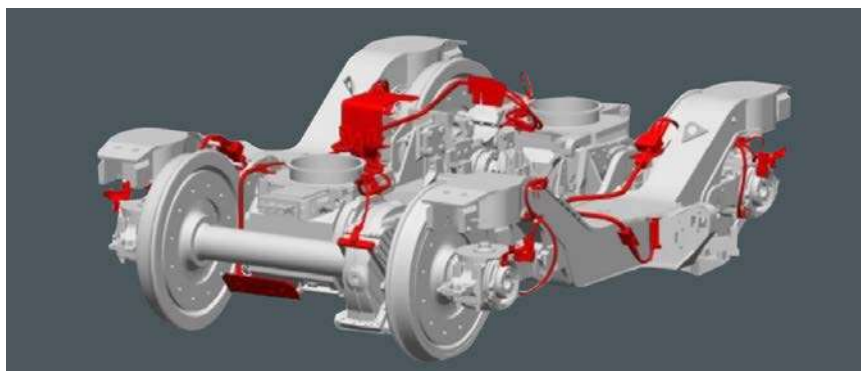


Рис. 2. Возможные места появления неисправностей в системах пневмоподвешивания и гасителей колебаний ходовой тележки

данных одновременно определяет место выявленного отступления.

Контроль плавности хода и комфорта езды пассажиров высокоскоростного подвижного состава «Сапсан» ведется с помощью портативного акселерометра «Аксиома» [2], который устанавливается на полу в кабине машиниста (хвостовой по ходу движения) над центром масс тележки. Статистическая обработка данных акселерометра и данных, полученных с датчиков, установленных на подвижном составе, позволяет получить необходимую информацию для последующей оценки состояния пути и подвижного состава. Например, на основании данных по ускорению кузова вагона производится расчет показателя среднего уровня комфорта пассажиров N_{mv} согласно стандарту EN-12299 [3]. Показатель среднего уровня комфорта позволяет производить ранжирование участков пути в зависимости от индекса качества пути и наличия вертикальных неровностей.

Для достоверности результатов исследования оценки степени влияния подвижного состава на показатели комфорта езды пассажиров было проведено сравнение выявленных ускорений подвижного состава на тестовых участках по первому и второму

главным путям станции Решетниково направления Санкт-Петербург — Москва. На этих участках фактическая скорость подвижного состава наиболее стабильна при движении в обоих направлениях и составляет от 195 до 200 км/ч. Были выполнены оценки среднего и максимального значений ускорений обращающегося высокоскоростного подвижного состава «Сапсан» (путем расчета статистического показателя полного значения вибрации: корень из суммы квадратов скорректированного виброускорения в вертикальной (cz) и поперечной (cy) плоскостях на тестовых участках (табл. 1)) [4].

Мониторинг полученных результатов обращающегося подвижного состава «Сапсан» показал, что на тестовых участках пути средние значения ускорений колеблются от 0,5 до 0,57 м/с² (расхождение между «лучшим» и «худшим» составами составляет 0,07 м/с², или 14%). Это свидетельствует о достаточно хорошем техническом состоянии подвижного состава и железнодорожного пути. Большое расхождение среди максимальных значений ускорения (от 0,71 до 0,84 м/с²) можно объяснить влиянием технического состояния деталей подвески и тележки на величину уровня комфорта

ТАБЛИЦА 1. Показатели уровня ускорений высокоскоростных подвижных составов «Сапсан» на тестовых участках направления Санкт-Петербург — Москва

№ подвижного состава	Тестовый участок 1 гл. путь 543ПК9 — 546ПК2			№ подвижного состава	Тестовый участок 2 гл. путь 543ПК9 — 546ПК2		
	среднее значение ускорений, м/с ²	максимальное значение ускорений, м/с ²	средняя скорость, км/ч		среднее значение ускорений, м/с ²	максимальное значение ускорений, м/с ²	средняя скорость, км/ч
1-07	0,5	0,73	198	1-17	0,5	0,72	197
1-12	0,5	0,71	197	1-19	0,51	0,74	199
2-04	0,5	0,71	199	2-04	0,52	0,79	199
1-17	0,51	0,78	198	2-03	0,53	0,78	197
1-11	0,51	0,76	199	1-09	0,54	0,77	198
2-02	0,52	0,77	199	1-06	0,54	0,78	196
1-13	0,54	0,74	199	1-12	0,55	0,81	197
1-15	0,54	0,8	197	1-05	0,55	0,81	198
1-06	0,56	0,74	199	1-16	0,55	0,84	199
1-08	0,56	0,82	199	1-15	0,55	0,83	198
2-03	0,56	0,77	199	2-02	0,56	0,82	197
1-19	0,56	0,76	199	1-11	0,56	0,84	198
1-16	0,57	0,78	199	1-07	0,56	0,84	198

в вагоне, на котором производились измерения. Нет необходимости проводить дальнейшую оценку уровня комфорта по составам, так как разница в оценке комфорта обусловлена состоянием конкретной подвижной единицы (вагона/тележки), на которой устанавливается акселерометр. Так, при следовании по первому главному пути в хвостовом вагоне № 1 подвижного состава № 1-07 показатели комфорта лучшие, а при следовании в этом же составе № 1-07 по второму главному пути в хвостовом вагоне № 10 — худшие.

Данные о количестве пикетов пути по первому и второму главным путям направ-

ления Санкт-Петербург — Москва, на которых выявлен уровень дискомфорта езды пассажиров «легкий» и хуже, показаны на рис. 3 и 4. Необходимо отметить, что с ростом показателя среднего значения уровня комфорта среди обращающегося подвижного состава увеличивается и количество выявленных пикетов с превышением уровня комфорта езды пассажиров.

Анализ показал, что количество пикетов пути с дискомфортом езды по результатам проездов высокоскоростных подвижных составов по первому главному пути составляет в среднем 23,8% от общего их числа. Из них 23,4% приходится на уровень



Рис. 3. Наличие пикетов пути с уровнем дискомфорта по первому главному пути направления Санкт-Петербург — Москва



Рис. 4. Наличие пикетов пути с уровнем дискомфорта по второму главному пути направления Санкт-Петербург — Москва

дискомфорта «легкий», 0,4% — на «чувствительный» и 0,02% — на уровень дискомфорта «сильный». Аналогичные результаты проезда получены по второму главному пути, где общее количество пикетов, на ко-

торых выявлен уровень дискомфорта, достигает в среднем 25,4%. Из них на 24,7% пикетов выявлен «легкий» уровень дискомфорта, на 0,6% — «чувствительный» и на 0,06% — «сильный».

Установлено, что со стороны пути основной причиной снижения уровня комфорта езды пассажиров высокоскоростных поездов является наличие длинных неровностей (от 100 до 250 м) в профиле (более 25 мм) и в плане (более 15 мм), которых больше всего наблюдается в зонах стрелочных переводов (более 60%). Наиболее интенсивно расстройство рельсовой колеи происходит именно на пикетах с длинноволновыми неровностями и смежных с ними. Дополнительными факторами, оказывающими неблагоприятное влияние на динамику, являются наличие отступлений по геометрии рельсовой колеи и неравномерная жесткость подрельсового основания на стрелочных переводах, мостах и пешеходных настилах.

Данные ускорений тележки высокоскоростного подвижного состава совместно с данными мобильных путеизмерительных средств (по величинам волнообразных неровностей рельсов в диапазоне волн 300–1000 мм) помогают оценить эффективность проведения работ. Так, проведение работ по шлифовке рельсов в зоне моста позволило уменьшить величины неровности с 0,6 до 0,4 мм, что, в свою очередь, привело к снижению уровня ускорения и контактных напряжений [5].

Данные, полученные с датчиков ускорений буксовых узлов тележки, позволяют выявить закономерности между величинами неровностей пути в вертикальной плоскости (расчетные значения на 6 м) и усилием в рессорах подвижного состава. В основном усилие в рессорах обусловлено величиной неровности, но не всегда. Проведенными исследованиями установлено, что не все неровности в вертикальной плоскости приводят к возникновению повышенных усилий в пружинах подвески, важную роль играют длина волны неровности и ее форма. Форма

волны неровности имеет большое значение, что подтверждается данными, полученными при оценке уровня вертикального ускорения кузова и величин неровностей профиля пути до и после проведения работ по ремонту пути [6]. Из-за низкого качества проведенных работ величины неровностей профиля выросли, значительно увеличился уровень вертикальных ускорений вагона, уровень комфорта езды пассажиров в вертикальной плоскости ухудшился до уровня «чувствительный» дискомфорт. Профиль пути после ремонта имеет большую волнистость, а средняя длина волны неровности профиля уменьшилась со 150 до 50 м, в местах резкого перелома отмечены значительные уровни вертикального ускорения кузова.

Данные по ускорению тележек высокоскоростного подвижного состава в поперечной плоскости (наблюдения в течение нескольких лет) показывают, что повышенные уровни колебаний привязаны к определенным участкам пути. Причем на этих участках они могут регистрироваться как в течение всего года, так и в течение определенного сезона (весна — лето). Возникновение таких колебаний обусловлено неблагоприятным сочетанием профилей в паре «колесо — рельс» из-за их износа. Весенний всплеск обусловлен изменением положения рельсовых нитей в плане в момент оттаивания пути (переход рельсов из растянутого в сжатое состояние и накопление мелких рихтовок пути). Анализ результатов срабатывания датчиков контроля устойчивости хода по составам, номерам вагонов и тележек высокоскоростного подвижного состава «Сапсан» [7] показывает, что срабатывания распределяются неравномерно, что может быть обусловлено износом колесных пар и амортизаторов поперечных колебаний.

Возникает вопрос: как определить, что является причиной срабатывания — состояние пути или состояние ходовых частей?

Необходим комплексный параметр, с помощью которого можно прогнозировать динамику поведения ходовых тележек подвижного состава «Сапсан». Динамика ходовых тележек в значительной мере обусловлена контактной геометрией в паре «колесо — рельс». В рамках европейского проекта DunoTrain была разработана методика выявления потенциально опасных участков с точки зрения контактной геометрии и обеспечения устойчивости подвижного состава [8]. Методика основана на построении карт частотного распределения показателя «эквивалентная конусность». Методика позволяет производить качественную оценку состояния контактной пары «колесо — рельс» и в зависимости от выбранной стратегии проводить превентивное восстановление профиля катания колеса либо профильную шлифовку рельсов. Похожая методика используется в КНР [9] и США [10]. Аналогичные исследования были проведены и в Российской Федерации [11, 12].

На наш взгляд, необходимо внедрение автоматизированной системы контроля за контактом в паре «колесо — рельс» на участках обращения скоростных и высокоскоростных поездов. Для этого необходимо обеспечить автоматизированный сбор данных по геометрическим параметрам колесных пар скоростных и высокоскоростных поездов и геометрическим параметрам рельсовой колеи и рельсов [13].

Для автоматического сбора данных по геометрическим параметрам колесных пар необходимы параметрами обладает система контроля колесных пар на ходу 3DWheel компании «Рифтэк» [14]. Данная система

в настоящее время эксплуатируется в пункте технического обслуживания Лужская эксплуатационного локомотивного депо Санкт-Петербург — Варшавский. Комплекс включен в реестр средств измерений, применяемых в ОАО «РЖД».

Для автоматического сбора данных по геометрическим параметрам рельсов и рельсовой колеи можно использовать мобильный диагностический комплекс МДК-498 компании «Радиоавионика». Данный диагностический комплекс начиная с июня 2023 года позволяет получать данные по параметру «эквивалентная конусность», характеризующему контакт в паре «колесо — рельс». Расчет выполняется путем наложения неизношенной колесной пары на реально измеренное очертание рельсового пути. Для построения прогнозной модели необходимы данные по реально измеренным профилям колес подвижного состава «Сапсан».

Проведенный мониторинг полученных данных диагностического комплекса МДК-498 с сентября по декабрь 2023 года параметра «эквивалентная конусность» позволил установить, что 98% и более значений эквивалентной конусности обращающегося высокоскоростного подвижного состава и рельсов на пикетах первого и второго главных путей направления Санкт-Петербург — Москва находятся в пределах от 0,27 до 0,38 (рис. 5).

Показатели эквивалентной конусности зависят от реализуемых скоростей движения, ширины рельсовой колеи и времени года. Следует отметить тот факт, что величина эквивалентной конусности на участках пути с узкой рельсовой колеей больше, чем на участках с широкой рельсовой колеей (рис. 6, 7).

Так как показатель эквивалентной конусности каждой конкретной колесной оси

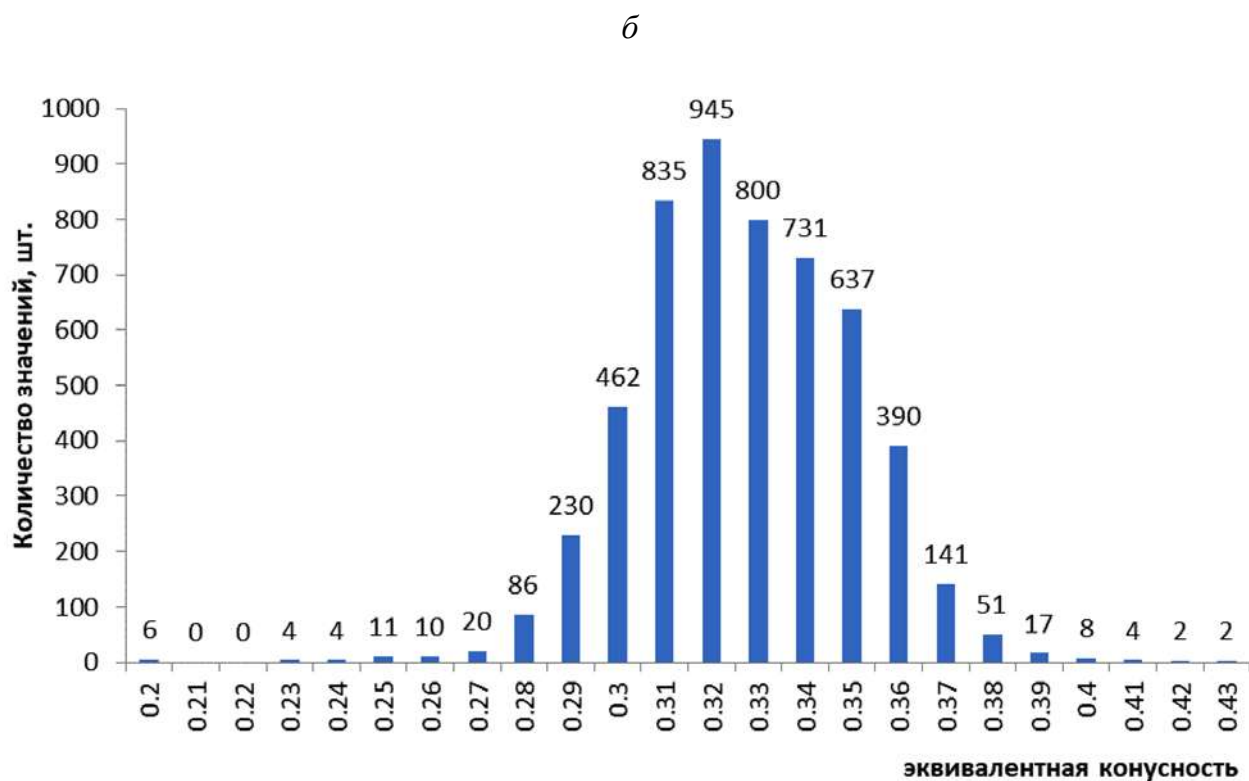
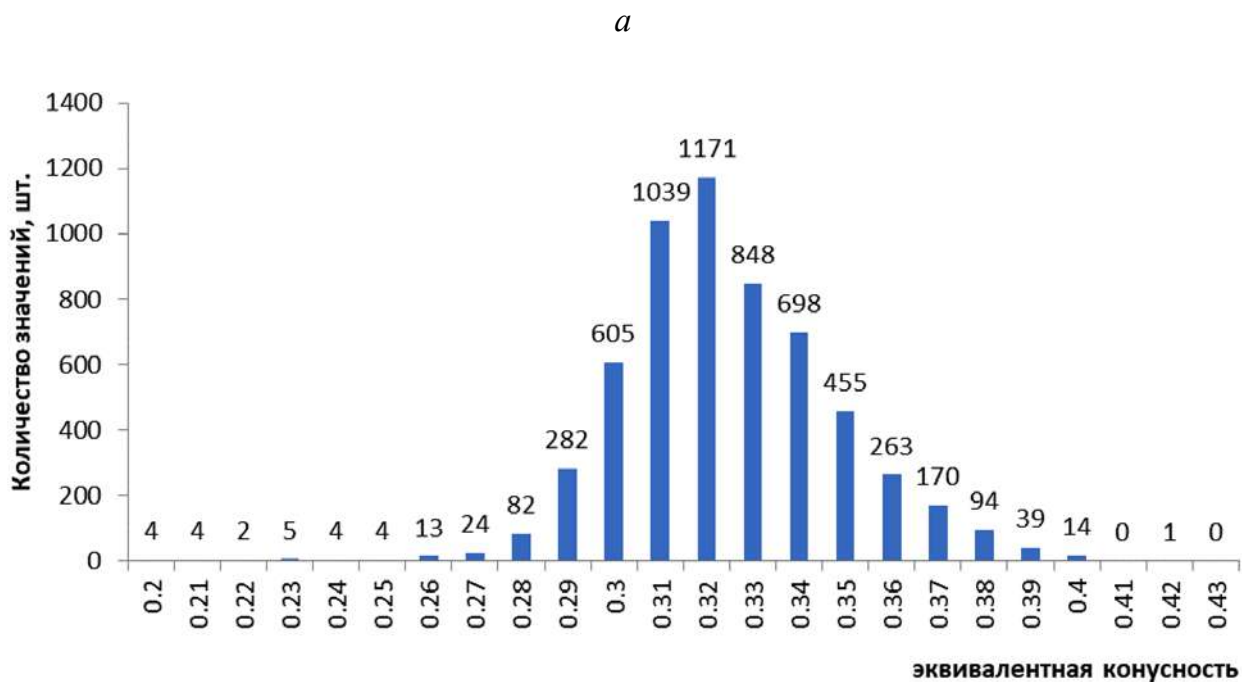


Рис. 5. Карты частотного распределения показателей эквивалентной конусности:
a — по первому главному пути, *б* — по второму главному пути

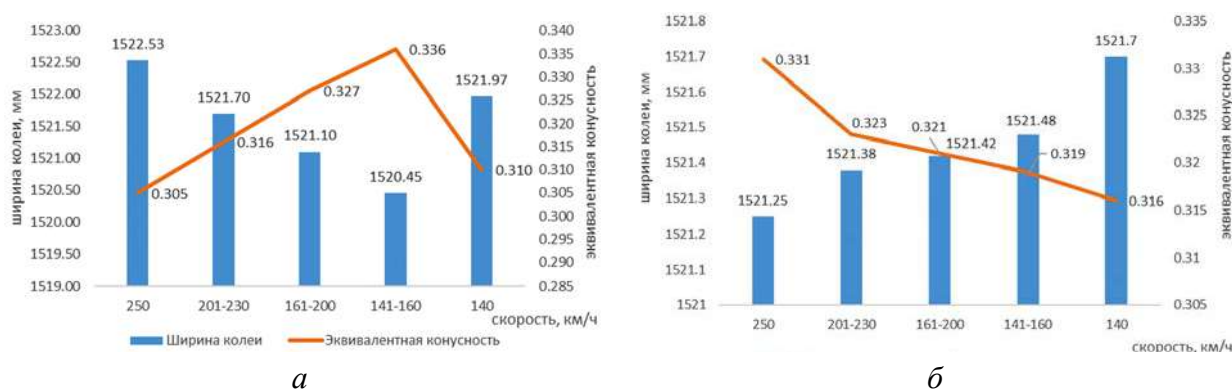


Рис. 6. Влияние скоростей движения на показатели эквивалентной конусности и ширины колеи: *а* — по первому главному пути, *б* — по второму главному пути

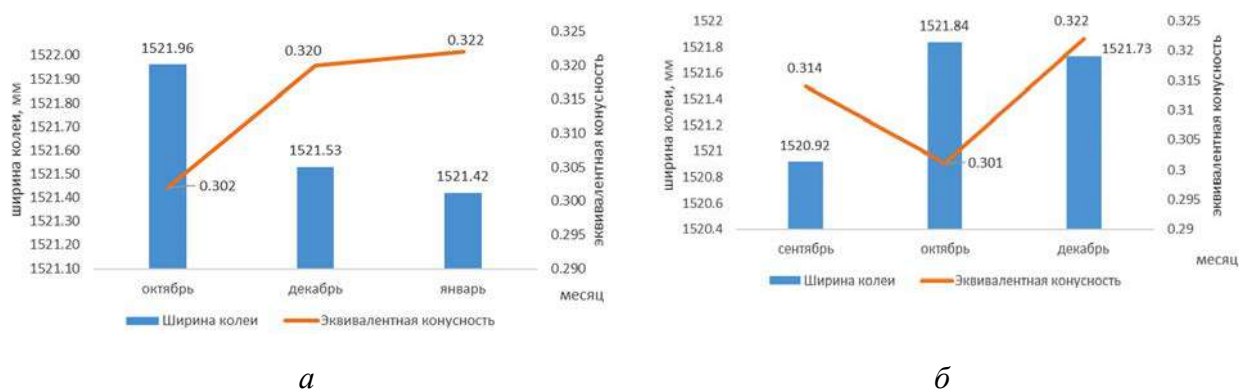


Рис. 7. Влияние периода года на показатели эквивалентной конусности и ширины колеи: *а* — по первому главному пути, *б* — по второму главному пути

подвижного состава изменяется в процессе движения по оси железнодорожного пути, то одной из задач при дальнейшем повышении скоростей движения является установление допустимых уровней показателя эквивалентной конусности в эксплуатации.

Выводы

1. Статистическая оценка данных, полученных с датчиков ускорений тележек высокоскоростного подвижного состава, совместно с результатами от мобильных диагностических комплексов позволяет более полно оценивать по пикетам уровень комфорта езды пассажиров, устанавливать при-

чины появления дискомфорта и принимать решения для своевременного их устранения.

2. Проведение выправочных работ в комплексе с работами по шлифовке рельсов является наиболее эффективной мерой, направленной на улучшение динамики вагонных тележек подвижного состава.

3. Обоснована необходимость создания единой автоматизированной системы контроля контакта в системе «колесо — рельс», позволяющей осуществлять автоматизированный сбор информации о геометрических параметрах колесных пар высокоскоростных поездов и геометрических параметрах рельсовой колеи и рельсов.

4. Применяемые мобильными диагностическими комплексами методы диагностирования состояния пути и его взаимодействия с подвижным составом могут быть использованы для более точного определения геометрических параметров колесных пар, рельсов и рельсовой колеи.

5. Для определения оптимальных условий взаимодействия системы колеса с рельсом на участках высокоскоростного движения поездов в качестве основного предлагается использовать показатель «эквивалентная конусность».

Библиографический список

1. Высокоскоростные поезда «Сапсан» В1 и В2: учебное пособие / Н. Ю. Богомолов [и др.]; под ред. А. В. Ширяева. М.: ОАО «Российские железные дороги», 2013. 522 с.

2. Системы мониторинга состояния путевой инфраструктуры и комфортабельности езды пассажиров «Аксиома»: руководство по эксплуатации ВДМА.663500.199 РЭ. 2018. 16 с.

3. Стандарт EN-12299. Железнодорожный транспорт. Комфортные условия во время движения пассажирских поездов. Измерение и оценка / Европейский комитет по стандартизации (CEN). 2009. 67 с.

4. ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997). Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека. Общие требования. М., 2010. 24 с.

5. Гапоненко А. С. Диагностика плавности хода и уровня комфорта пассажиров на участках обращения скоростных поездов // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 4. С. 8–12.

6. Гапоненко А. С. Состояние пути и риски нарушения плавности хода поездов // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 7. С. 23–26.

7. О причинах аварийного срабатывания системы контроля устойчивости хода вагонов ЭВС

«Сапсан» / А. М. Бржезовский [и др.] // Вестник ВНИИЖТа. 2014. № 2. С. 13–22.

8. A multi-national survey of the contact geometry between wheels and rails / M. Zacher [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2015. Vol. 229, № 6. P. 691–709.

9. Research on Bogie Frame Lateral Instability of High-Speed Railway Vehicle / Ch. Wang [et al.] // Shock and Vibration. 2018. Vol. 5. P. 1–13.

10. Wu H., Kalay S. Management of the Wheel/Rail Contact Interface in Heavy-Haul Operations // Interface. The Journal of Wheel/Rail Interaction. 2013, October 18.

11. Эквивалентная конусность и ее влияние на движение подвижного состава / А. А. Киселев [и др.] // Известия ПГУПС. СПб., 2017. Т. 14, вып. 2. С. 247–255.

12. Влияние геометрических параметров железнодорожного пути на величину эквивалентной конусности колесной пары / А. А. Киселев [и др.] // Известия ПГУПС, 2019. Т. 16, вып. 2. С. 202–211.

13. Развитие использования дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар / А. Г. Нуриев [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований ПГУПС. 2023. № 1. С. 7–18.

14. Система контроля колесных пар на ходу 3DWheel. URL: https://riftek.com/ru/products/real-time_wheels_geometry_measurement_system/

Дата поступления: 28.06.24

Решение о публикации: 29.07.24

Контактная информация:

ГАПОНЕНКО Александр Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Железнодорожный путь»; gaponenkoalexandr@mail.ru

КИСЕЛЕВ Артем Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Железнодорожный путь»; zhdp10@gmail.com

Diagnosics of the railway track and rolling stock interaction system according to the parameters of ride comfort and equivalent taper

A. S. Gaponenko, A. A. Kiselyov

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

For citation: *Gaponenko A. S., Kiselyov A. A.* Diagnosics of the railway track and rolling stock interaction system according to the parameters of ride comfort and equivalent taper // Proceedings of the St. Petersburg State University of Railway Engineering. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 694–705 (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-694-705

Abstract

Purpose: to identify the influence of the geometric parameters of wheel sets and rail track on the smoothness of the ride and the level of passenger comfort for an automated diagnostic system. **Methods:** statistical methods were used to conduct the research. Sampling and analysis of statistical observation data made it possible to identify existing approaches to assessing the levels of interaction of the wheel-rail system at different speeds. The track sections grouped into rows along pickets were assessed in terms of passenger ride comfort and equivalent conicity. Materials used in the public domain and official websites, as well as research by the authors. **Results:** a list of factors influencing the conditions of interaction between high-speed rolling stock and the railway track has been identified. Data were obtained for indicators of ride comfort and equivalent conicity for the St. Petersburg — Moscow line along pickets at actual realizable speeds. **Practical importance:** the possibility of using remote measurement diagnostics to determine the geometric parameters of wheelsets and rails and the geometric parameters of the rail track has been determined. Suggestions for improving the qualitative assessment of the interaction of the wheel-rail system are recommended.

Keywords: comfort level, discomfort, passenger ride comfort, equivalent conicity, acceleration, wheel-rail interaction, wheelset, rail profile, diagnostic system

References

1. Vy'sokoskorostny'e poezda "Sapsan" V1 i V2: uchebnoe posobie / N. Yu. Bogomolov [i dr.]; pod red. A. V. Shiryaeva. M.: OAO "Rossijskie zheleznny'e dorogi", 2013. 522 s. (In Russian)
2. Sistemy` monitoringa sostoyaniya putevoj infrastruktury` i komfortabel`nosti ezdy` passazhirov "Aksio-ma": rukovodstvo po e`kspluatacii VDMA.663500.199 RE`. 2018. 16 s. (In Russian)
3. Standart EN-12299. Zheleznodorozhny`j transport. Komfortny`e usloviya vo vremya dvizheniya passazhir-skix poezdov. Izmerenie i ocenka / Evropejskij komitet po standartizacii (CEN). 2009. 67 s. (In Russian)
4. GOST 31191.1–2004 (ISO 2631–1:1997). Vi-braciya i udar. Izmerenie obshhej vibracii i ocenka ee vozdejstviya na cheloveka. Obshhie trebovaniya. M., 2010. 24 s. (In Russian)
5. Gaponenko A. S. Diagnostika plavnosti xoda i urovnya komforta passazhirov na uchastkax obra-shheniya skorostny`x poezdov // Put` i putevoe xozyaj-stvo. 2019. № 4. S. 8–12. (In Russian)
6. Gaponenko A. S. Sostoyanie puti i riski narush-eniya plavnosti xoda poezdov // Put` i putevoe xozyaj-stvo. 2016. № 7. S. 23–26. (In Russian)
7. O prichinax avarijnogo srabaty`vaniya sistemy` kontrolya ustojchivosti xoda vagonov E`VS "Sapsan" /

A. M. Brzhezovskij [i dr.] // Vestnik VNIIZhTa. 2014. № 2. S. 13–22. (In Russian)

8. A multi-national survey of the contact geometry between wheels and rails / M. Zacher [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2015. Vol. 229, № 6. P. 691–709.

9. Research on Bogie Frame Lateral Instability of High-Speed Railway Vehicle / Ch. Wang [et al.] // Shock and Vibration. 2018. Vol. 5. P. 1–13.

10. Wu H., Kalay S. Management of the Wheel/Rail Contact Interface in Heavy-Haul Operations // Interface. The Journal of Wheel/Rail Interaction. 2013, October 18.

11. E`kvivalentnaya konusnost` i ee vliyanie na dvizheniya podvizhnogo sostava / A. A. Kiselev [i dr.] // Izvestiya PGUPS. SPb., 2017. T. 14, vy`p. 2. S. 247–255. (In Russian)

12. Vliyanie geometricheskix parametrov zheleznodorozhnogo puti na velichinu e`kvivalentnoj konusnosti kolesnoj pary` / A. A. Kiselev [i dr.] //

Izvestiya PGUPS, 2019. T. 16, vy`p. 2. S. 202–211. (In Russian)

13. Razvitie ispol`zovaniya distancionny`x izmerenij po opredeleniyu geometricheskix parametrov kolesny`x par / A. G. Nuriev [i dr.] // Byulleten` rezul`tatov nauchny`x issledovanij PGUPS. 2023. № 1. S. 7–18. (In Russian)

14. Cistema kontrolya kolesny`x par na xodu 3DWheel. URL: https://riftek.com/ru/products/real_time_wheels_geometry_measurement_system/ (In Russian)

Received: 28.06.2024

Accepted: 29.07.2024

Author's information:

Alexander S. GAPONENKO — PhD in Engineering, Associate Professor of the department “Railway track”; gaponenkoalexandr@mail.ru

Artem A. KISELEV — PhD in Engineering, Associate Professor of the department “Railway track”; zhdp10@gmail.com

УДК 621.83

Результаты испытаний макетного образца передачи с бесконтактным зацеплением на основе постоянных магнитов

Д. С. Тарицын, Д. А. Орлов, А. И. Петухов

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

Для цитирования: Тарицын Д. С., Орлов Д. А., Петухов А. И. Результаты испытаний макетного образца передачи с бесконтактным зацеплением на основе постоянных магнитов // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 706–717. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-706-717

Аннотация

Цель: в работе исследуются свойства коаксиальной магнитной передачи с постоянными магнитами и подмагничивающими обмотками. Выявляются зависимости КПД от частоты вращения и мощности нагрузки, а также зависимость максимального момента, предшествующего нарушению зацепления, от тока подмагничивания и частоты вращения. **Методы:** экспериментальное исследование на стенде путем нагрузки приводного двигателя через испытуемую передачу на генератор, работающий на резистор. Также описывается процесс исследования стенда, включающий определение потерь в испытательных электрических машинах методом отдельных потерь, а также установление соответствия частоты напряжения тахогенератора и частоты вращения приводного двигателя. **Результаты:** было установлено, что магнитная передача способна работать как в режиме редуктора, так и в режиме мультипликатора, при этом КПД в режиме редуктора в целом выше и в большей степени зависит от частоты вращения передачи, чем в режиме мультипликатора. Также можно сказать, что применение подмагничивания позволяет увеличить максимальный момент, отдаваемый нагрузке, но снижает КПД ввиду увеличения потерь в стали. **Практическая значимость:** результаты работы могут быть применены в машиностроении при проектировании нагруженных магнитных передач, работающих в режиме неравномерных нагрузок в приводах машин.

Ключевые слова: коаксиальная магнитная передача, редуктор, мультипликатор, постоянный магнит, коэффициент полезного действия, максимальный момент

Постановка задачи

Во многих современных устройствах применяются механические передачи (зубчатые, цепные, ременные), в которых движение передается за счет контактного взаимодействия звеньев. Из этого взаимодействия вытекает ряд недостатков, вызванных наличием трения: снижение КПД, износ, вибрация и шум.

Одним из возможных способов снизить потери и увеличить ресурс агрегата является применение магнитной передачи с бес-

контактным зацеплением (МПБЗ) на основе постоянных магнитов (рис. 1) [1, 2].

Однако у данной конструкции есть существенные ограничения по максимальному моменту, который можно получить на ведомом валу, обусловленные возможностями магнитного взаимодействия звеньев. В результате при работе МПБЗ в условиях резконервномерных нагрузок может потребоваться существенное увеличение размеров передачи для создания запаса по максимальному моменту, что также

повлечет повышенный расход материалов. Одним из возможных решений этой проблемы является использование подмагничивания (рис. 2) [2, 3].

Рассмотрим функционирование МПБЗ с подмагничиванием в режиме редуктора. Ротор (11) приводится во вращение приводным двигателем. Создаваемое постоянными магнитами ротора (5) поле с числом пар полюсов p_1 (на рис. $p_1 = 2$) взаимодействует через стальные сегменты (10) низкоскоростного ротора (модулятора) (8) с полем, создаваемым маг-

нитами (4) статора (2) с числом пар полюсов p_2 (на рис. $p_2 = 4$). При этом за счет взаимодействия магнитных полей ротора и статора с разным числом пар полюсов и модулятора с числом сегментов, равным половине суммарного числа полюсов статора и ротора на модуляторе, создается результирующее поле, частота вращения основной гармоники которого будет меньше частоты вращения поля ротора. Создаваемый этим полем электромагнитный момент заставляет модулятор вращаться сонаправленно с ротором

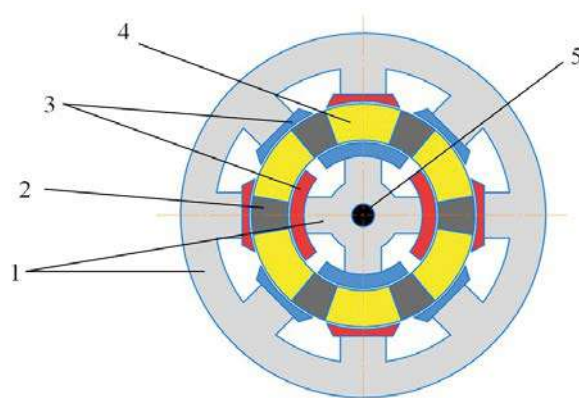


Рис. 1. Коаксиальная магнитная передача. 1 — сердечники; 2 — активные сегменты модулятора; 3 — постоянные магниты; 4 — немагнитный корпус модулятора; 5 — вал ротора

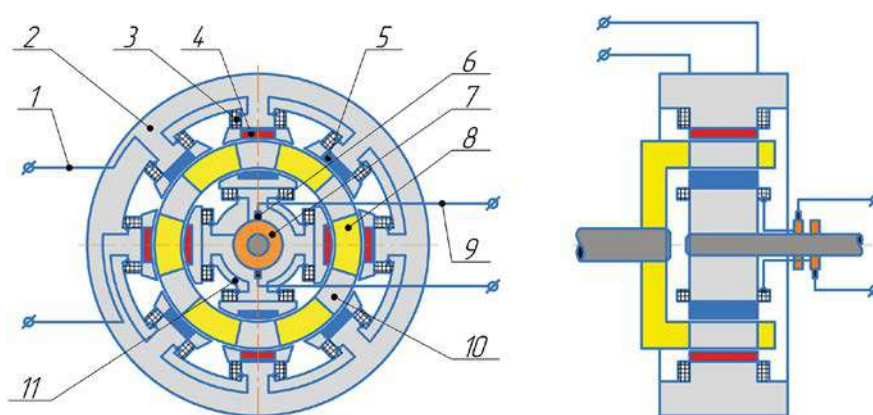


Рис. 2. МПБЗ с подмагничиванием. 1 — выводы обмотки статора; 2 — статор; 3 — обмотка статора; 4, 5 — постоянные магниты; 6 — щетки; 7 — контактные кольца; 8 — немагнитный корпус модулятора; 9 — выводы обмотки ротора; 10 — активные сегменты модулятора; 11 — ротор; 12 — обмотка ротора

без скольжения, но с меньшей скоростью. На валу модулятора создается момент, превосходящий момент приводного двигателя, но не выше максимального, определяемого силами магнитного взаимодействия. В случае разрыва магнитной связи между ротором и модулятором ротор необходимо будет остановить для восстановления зацепления. Для повышения максимального момента на ведомом валу без увеличения размеров передачи предусмотрены подмагничивающие обмотки: 12 на полюсах ротора и 3 на полюсах статора. При повышении момента нагрузки на ведомом валу подается напряжение на обмотки статора через выводы (1) и на обмотки ротора через контактные кольца (7), щетки (6) и выводы (9). Ток, протекающий по обмоткам, создает дополнительное магнитное поле, сонаправленное с полем постоянных магнитов и увеличивающее электромагнитный момент на валу модулятора.

Такое решение может использоваться в нагруженных приводах, где требуется компенсация периодически возникающих колебаний нагрузки. Возможности применения подмагничивания в МПБЗ ранее были теоретически обоснованы конечно-элементным расчетом магнитной системы передачи [2].

В отличие от электромагнитной муфты [4] предлагаемая схема МПБЗ позволяет осуществлять преобразование момента и угловой скорости входного вала, то есть выполнять функцию понижающего или повышающего редуктора. Как следует из описания, принцип действия магнитной передачи близок к принципу действия синхронной электрической машины, что определяет основные ее достоинства и недостатки. К первым, помимо возможности разъединения под нагрузкой, могут быть отнесены снижение механического износа и потерь на трение в зацеплении, снижение

потребности в смазке и затрат на техническое обслуживание. Важной особенностью магнитной передачи является наличие естественного ограничения момента на выходном валу, позволяющее обеспечить разгрузку двигателя при заклинивании механизма рабочей машины. Среди недостатков следует отметить наличие электрических и магнитных потерь в стали, особенно в ненормальных режимах.

Целями работы являются экспериментальная проверка возможностей подмагничивания в МПБЗ и сопоставление параметров работы передачи в подмагниченном и неподмагниченном режимах.

Конструктивные особенности макетного образца магнитной передачи

Для проведения экспериментальных исследований был сконструирован и изготовлен образец МПБЗ с подмагничиванием (рис. 3).

Магнитная система и вращающиеся элементы магнитной передачи смонтированы в сварном стальном корпусе (14). Горловины корпуса закрыты подшипниковыми щитами (6), в расточках которых установлены радиальные шариковые подшипники (20) с тихоходным валом (4) и быстроходным валом (5). Модулятор (12) выполнен в виде пластикового стакана, соединенного с тихоходным валом с помощью шпонки (18). В прорези модулятора уложены стальные сегменты (13), закрепленные шпильками (24) с гайками (23). Сердечники ротора (2) и статора (3) изготовлены из шихтованной стали 2411. Статор крепится к корпусу болтами (25), ротор крепится к валу с помощью шпонки (19) и поджимного винта (16) с шайбой (21). Контактные кольца (1) изготовлены из пластика с медными бандажами, на которые устанавливаются угольные

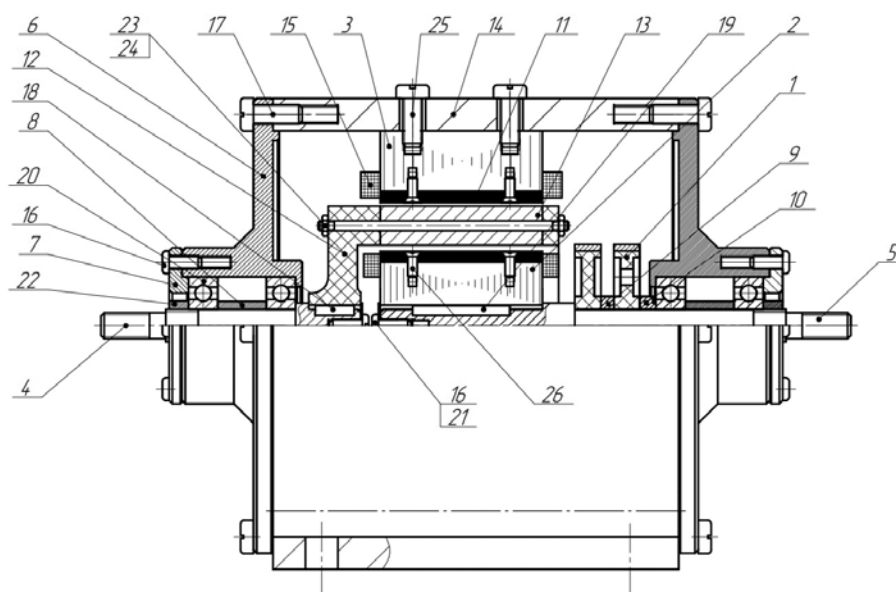


Рис. 3. Образец МПБЗ с подмагничиванием. 1 — контактное кольцо; 2 — сердечник ротора; 3 — сердечник статора; 4 — вал модулятора (тихоходный); 5 — вал ротора (быстроходный); 6 — подшипниковый щит; 7 — крышка подшипника; 8, 9, 10 — распорная втулка; 11 — постоянный магнит; 12 — модулятор; 13 — сегменты модулятора; 14 — корпус; 15 — обмотка; 16, 17, 26 — винт, 18, 19 — шпонка; 20 — подшипник; 21 — шайба; 22, 23 — гайка; 24 — шпилька; 25 — болт

щетки. Постоянные магниты (11) марки N38 крепятся к сердечникам потайными винтами (26). Обмотки (15) выполнены проводом ПЭТВ-2 с сечением 0,785 мм².

Методика испытаний

Для определения рабочих показателей изготовленного макетного образца магнитной передачи был разработан и изготовлен стенд (рис. 4), включающий:

- две однотипные электрические машины постоянного тока (МСА 45/64-148/ML2) (2) и (7) [5], одна из которых (Д) используется в качестве приводного двигателя, вторая (Г) работает в генераторном режиме и выполняет функцию нагрузки; энергия, вырабатываемая генератором, рассеивается на резисторе (9);

- тахогенераторы ТГд и ТГг, связанные с валами двигателя и генератора;

- регулируемые источники напряжения для питания цепей приводного двигателя и подмагничивающих обмоток ротора и статора;

- 8-канальный измерительный комплекс на базе многофункционального модуля сбора данных Advantech USB-4716 [6], обеспечивающий возможность регистрации измерительной информации.

Целью испытаний является определение зависимостей коэффициента полезного действия (КПД) передачи и максимального передаваемого момента от частоты вращения быстроходного звена и тока подмагничивающих обмоток.

КПД передачи определяется следующим образом:

$$\eta_{\text{пер}} = \frac{\eta_{\text{ст}}}{\eta_{\text{м-г}}}, \quad (1)$$

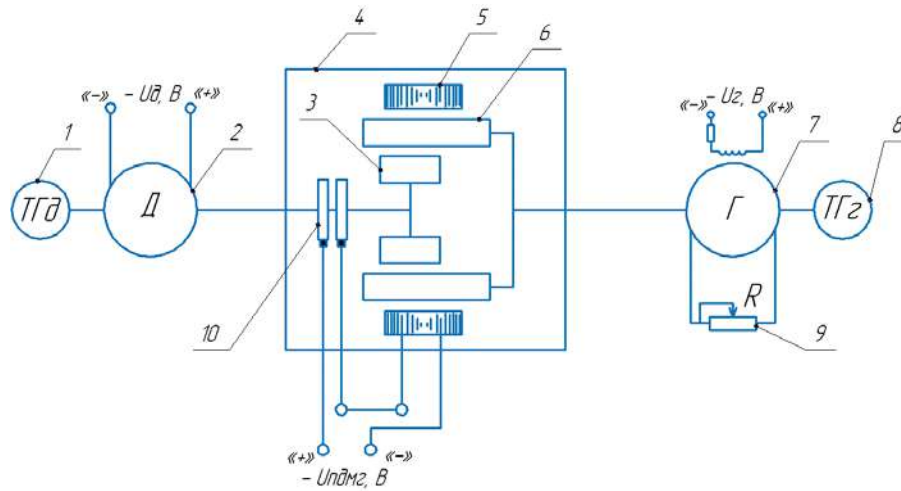


Рис. 4. Схема испытательного стенда. 1 — тахогенератор; 2 — двигатель; 3 — ротор; 4 — корпус; 5 — статор; 6 — модулятор; 7 — генератор; 8 — тахогенератор генератора; 9 — нагрузочный реостат; 10 — контактные кольца

где $\eta_{м-г}$ — КПД мотор-генератора (стенда в отсутствие магнитной передачи);

$$\eta_{ст} = \frac{P_{сред г}}{P_{сред д}} \text{ — КПД стенда;}$$

$P_{сред г}$, $P_{сред д}$ — средние электрические мощности на выходе из генератора и входе в двигатель, Вт.

Значения $P_{сред г}$, $P_{сред д}$ определяются по формуле:

$$P_{сред} = \frac{\sum_{i=1}^N A_{МГН Эл}^i}{\sum_{i=1}^N dt}, \quad (2)$$

где $A_{МГН Эл}^i = U^i \cdot I^i \cdot dt$ — энергия, потребленная/выработанная электрической машиной за i -й шаг измерения dt , Дж;

U^i , I^i — мгновенные значения тока и напряжения;

N — количество шагов измерения.

КПД мотор-генератора без учета затрат энергии на подмагничивание:

$$\eta_{м-г} = \eta_{д} \cdot \eta_{г}. \quad (3)$$

КПД двигателя и генератора определяется методом отдельных потерь [7]:

$$\eta_{д} = \frac{P_{Эл ВХ} - \Delta P_{д}}{P_{Эл ВХ}}, \quad (4)$$

$$\eta_{г} = \frac{P_{Эл ВЫХ}}{P_{Эл ВЫХ} + \Delta P_{г}}, \quad (5)$$

где $P_{эл вх}$ — электрическая мощность, потребляемая электродвигателем, Вт;

$P_{эл вых}$ — электрическая мощность на выходе из генератора, Вт;

$\Delta P_{д}$, $\Delta P_{г}$ — суммарные потери соответственно в двигателе и генераторе, Вт.

Суммарные потери как в двигателе, так и в генераторе представляют собой сумму трех составляющих:

$$\Delta P = \Delta P_{эл} + \Delta P_{мг} + \Delta P_{мех}, \quad (6)$$

где $\Delta P_{мех}$ — механические потери, Вт;

$\Delta P_{мг}$ — магнитные потери, Вт;

$\Delta P_{эл}$ — электрические потери, Вт.

Электрические потери в двигателе при последовательном или параллельном возбуждении:

$$\Delta P_{эл\ дв} = I_{я}^2 \cdot (R_{я} + R_{ов}), \quad (7)$$

в генераторе при независимом возбуждении:

$$\Delta P_{эл\ г} = I_{я}^2 \cdot R_{я}, \quad (8)$$

где $I_{я}$ — ток якоря соответствующей машины, А.

Потери на обмотке возбуждения генератора не учитываются, поскольку эта энергия не преобразуется магнитной передачей.

Механические потери зависят главным образом от частоты вращения вала машины, магнитные потери — от величины тока возбуждения и частоты перемагничивания железа, поэтому они могут быть представлены функциями вида:

$$\begin{cases} \Delta P_{мг} = f(I_{в}, n) \\ \Delta P_{мех} = f(n) \end{cases} \quad (9)$$

Для определения механических и магнитных потерь в мотор-генераторе был дополнительно проведен ряд экспериментов.

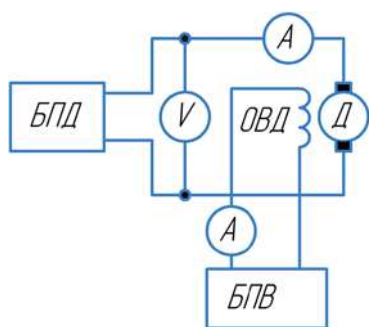


Рис. 5. Определение потерь холостого хода двигателя.

БПД — блок питания якорной обмотки двигателя; БПВ — блок питания обмотки возбуждения; ОВД — обмотка возбуждения двигателя; Д — двигатель

В первом из них определялась мощность, потребляемая электродвигателем в режиме холостого хода при различных значениях тока возбуждения и тока якоря (питающего напряжения) (рис. 5).

В этом случае величина суммарных потерь (без учета потерь на возбуждение двигателя) определяется следующим образом:

$$P_{эл\ вх1} = \Delta P_{эл\ дв1} + \Delta P_{мг\ дв} + \Delta P_{мех\ дв} \quad (10)$$

В следующем эксперименте двигатель нагружен на обесточенный генератор (рис. 6).

Испытания проводились в тех же режимах (при тех же значениях тока возбуждения и частоты вращения якоря электродвигателя). Полагая механические потери в обеих машинах равными, можно определить суммарные потери следующим образом:

$$P_{эл\ вх2} = \Delta P_{эл\ дв.2} + \Delta P_{мг\ дв} + 2\Delta P_{мех\ дв} \quad (11)$$

Выражения (10) и (11) образуют систему из двух уравнений относительно двух неизвестных $\Delta P_{мг\ дв}$ и $\Delta P_{мех\ дв}$. В результате ее решения:

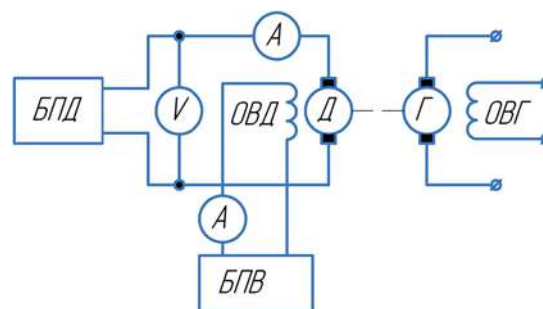


Рис. 6. Определение потерь холостого хода двигателя и генератора.
ОВГ — обмотка возбуждения генератора; Г — генератор

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{мех дв}} = (P_{\text{эл.вх.2}} - P_{\text{эл.вх.1}}) + (\Delta P_{\text{эл.дв.1}} - \Delta P_{\text{эл.дв.2}}) \\ \Delta P_{\text{мг дв}} = 2 \cdot P_{\text{эл.вх.1}} - P_{\text{эл.вх.2}} - 2 \cdot \Delta P_{\text{эл.дв.1}} + \Delta P_{\text{эл.дв.2}} \end{cases} \quad (12)$$

Зависимость суммы $(\Delta P_{\text{мех дв}} + \Delta P_{\text{мг дв}})$ от частоты вращения и тока возбуждения для одной электрической машины представлена на рис. 7.

Для выполнения расчетов данные зависимости аппроксимируются полиномом третьей степени от двух переменных с использованием метода наименьших квадратов.

После определения магнитных и механических потерь в мотор-генераторе на стенд устанавливается магнитная передача, якорь генератора соединяется с нагрузочным сопротивлением (рис. 4), на двигатель подается напряжение. При выходе двигателя на заданную частоту вращения подается напряжение на обмотку возбуждения генератора и выполняется несколько сотен циклов измерений с периодом dt , в процессе которых регистрируются

значения частоты вращения валов, электрическая мощность двигателя (с учетом мощности, потребляемой обмоткой возбуждения) и мощность генератора, рассеиваемая на нагрузке, а также ток возбуждения генератора, необходимый для определения магнитных потерь.

Средний момент нагрузки на ведомом валу передачи:

$$M_{\Gamma} = \frac{9,55 \cdot P_{\text{сред } \Gamma}}{\eta_{\Gamma} \cdot n_{\Gamma}}. \quad (13)$$

Средний момент двигателя на ведущем валу передачи:

$$M_{\text{д}} = \frac{9,55 \cdot P_{\text{сред д}} \cdot \eta_{\text{д}}}{n_{\text{д}}}. \quad (14)$$

Максимальный (срывной) момент нагрузки определяется в результате увеличения тока возбуждения генератора до момента нарушения магнитного взаимодействия звеньев передачи.

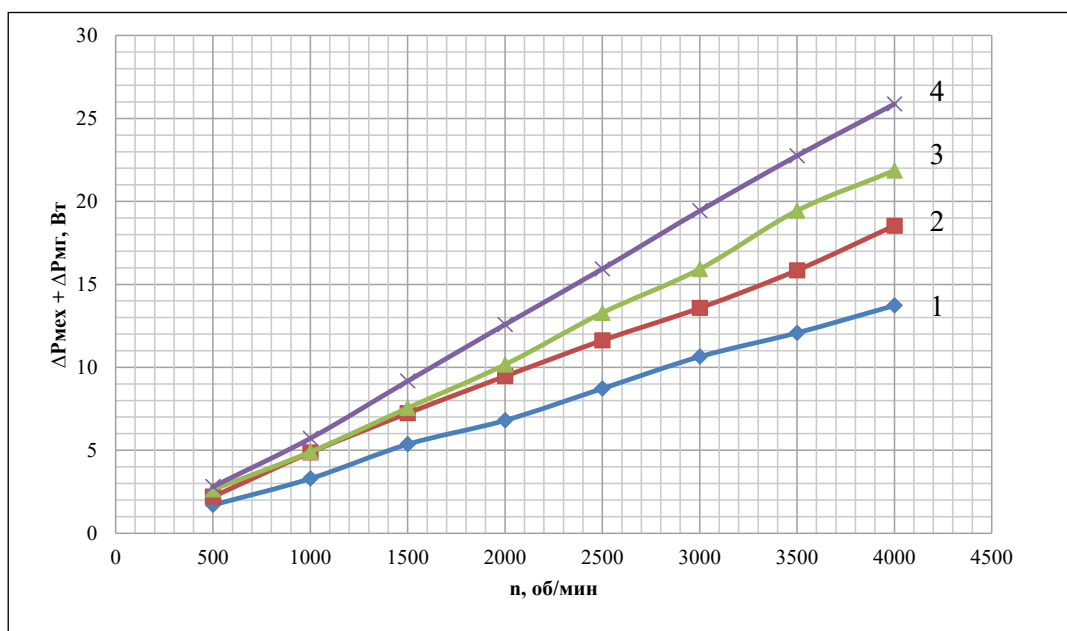


Рис. 7. Зависимость магнитных и механических потерь от режима работы электрической машины. 1 — при токе возбуждения 1А; 2 — при токе возбуждения 2А; 3 — при токе возбуждения 3А; 4 — при токе возбуждения 4А

Обсуждение результатов

В процессе испытаний передача последовательно выводилась на ряд установившихся режимов, в каждом из которых снимался ряд осциллограмм (рис. 8).

В результате обработки измерительной информации определялись зависимости КПД передачи и максимального момента от частоты вращения при различных значениях тока подмагничивания в режиме редуктора (с валом генератора соединен вал модулятора) и в режиме мультипликатора (с валом генератора соединен вал ротора), при этом при расчете КПД передачи с подмагничиванием электрические потери на подмагничивание не учитывались.

Результаты испытаний в режиме редуктора приведены на рис. 9–10, в режиме мультипликатора — на рис. 11–12.

Из зависимостей, приведенных на рис. 9 и 11, следует, что подключение подмагничи-

вающей обмотки обеспечивает повышение величины максимального момента на выходном валу передачи как в режиме редуктора, так и в режиме мультипликатора. С ростом тока подмагничивания максимальный момент растет линейно. Однако при этом наблюдается снижение значения КПД передачи (рис. 10, 12), что можно объяснить увеличением потерь в стали на гистерезис и вихревые токи, которые зависят в том числе от величины магнитной индукции в стали, которая возрастает с увеличением тока обмоток подмагничивания.

Как следует из полученных результатов, КПД передачи мало зависит от частоты вращения и передаваемой мощности в режиме мультипликатора, при этом в режиме редуктора он несколько снижается при увеличении частоты вращения ведомого звена.

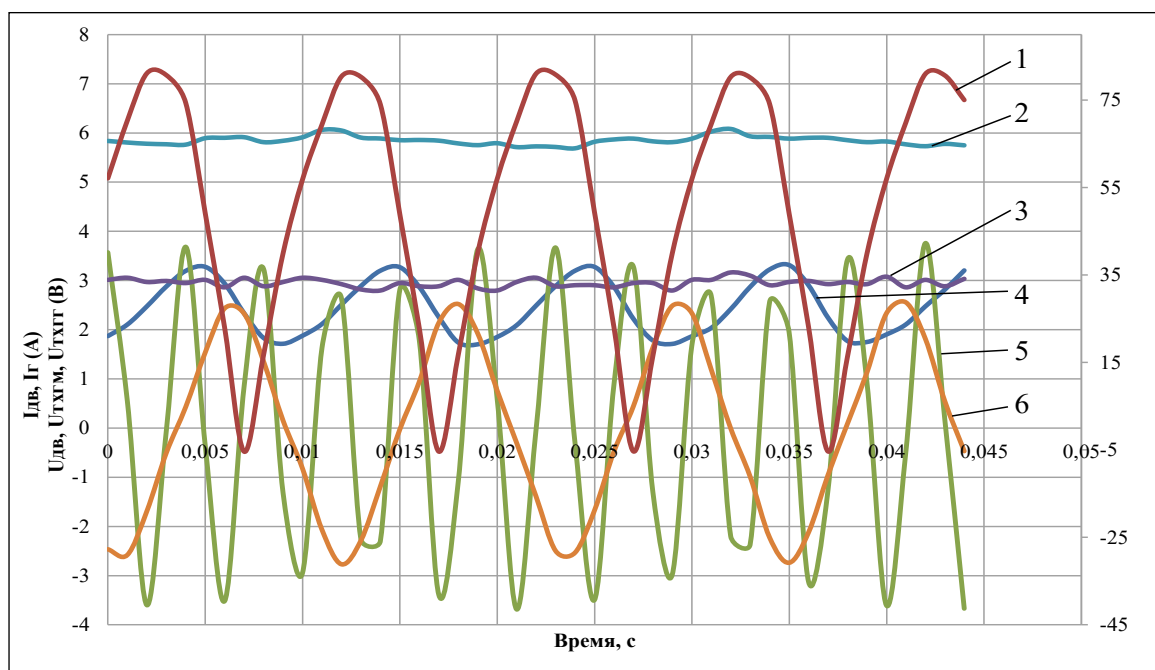


Рис. 8. Осциллограммы входов и выходов стенда. 1 — напряжение на двигателе; 2 — напряжение на генераторе; 3 — ток генератора; 4 — ток двигателя; 5 — напряжение тахогенератора двигателя; 6 — напряжение тахогенератора генератора

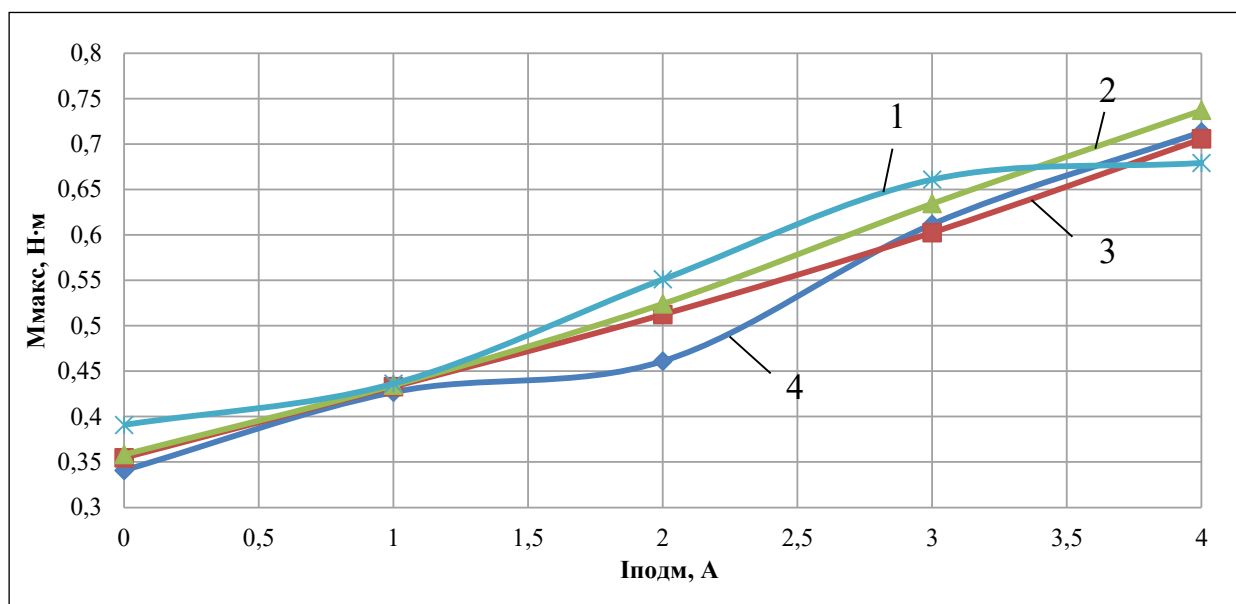


Рис. 9. Зависимость максимального момента на ведомом валу от тока подмагничивания и частоты вращения в режиме редуктора. 1 — частота вращения быстроходного вала 2000 об/мин; 2 — частота вращения быстроходного вала 3000 об/мин; 3 — частота вращения быстроходного вала 3500 об/мин; 4 — частота вращения быстроходного вала 4000 об/мин

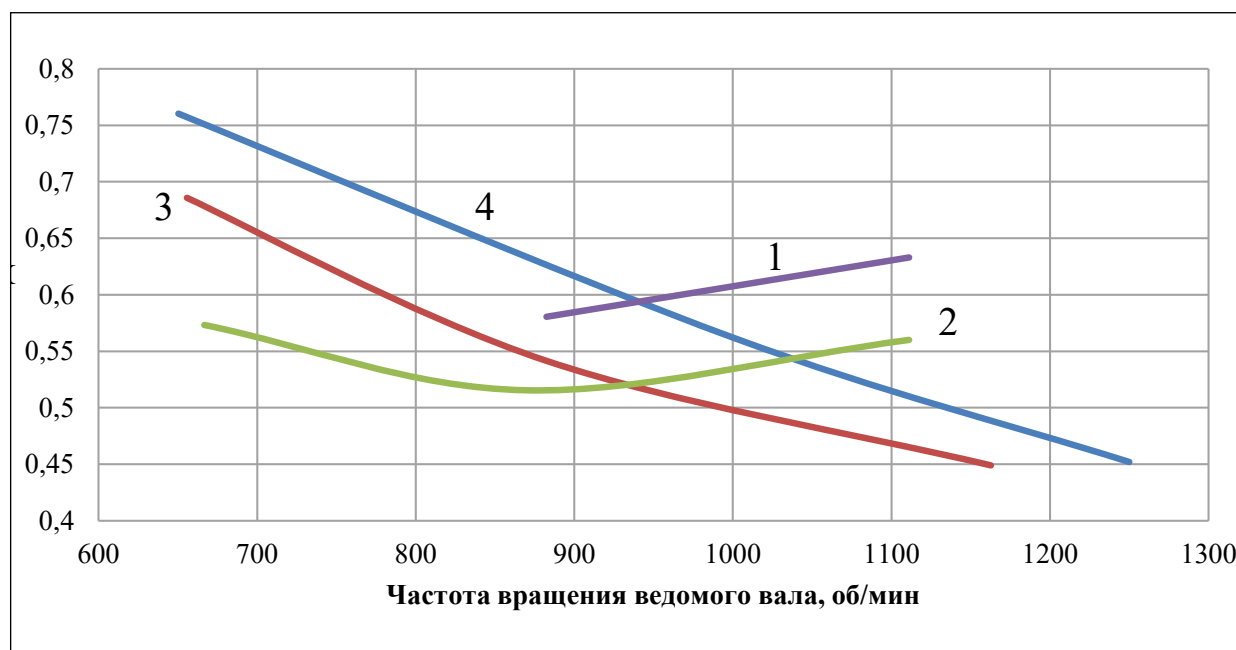


Рис. 10. Зависимость КПД от частоты вращения ведомого вала в режиме редуктора. 1 — передача подмагничена, мощность генератора 24 Вт; 2 — передача подмагничена, мощность генератора 18 Вт; 3 — передача подмагничена, мощность генератора 12 Вт; 4 — передача не подмагничена, мощность генератора 12 Вт

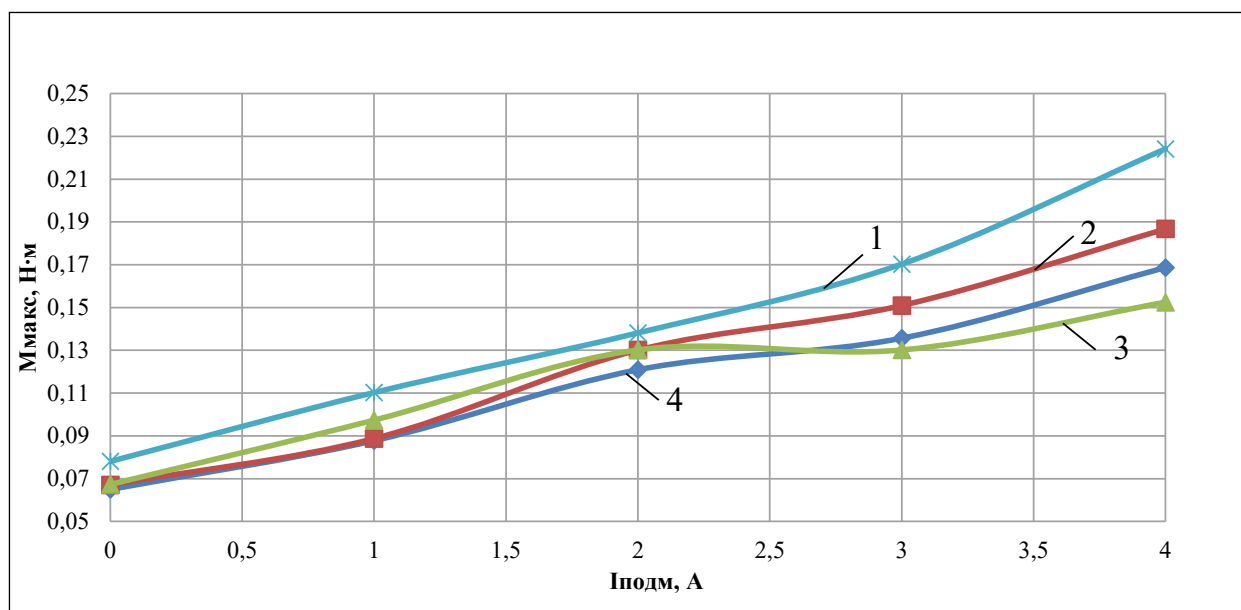


Рис. 11. Зависимость максимального момента на ведомом валу от тока подмагничивания и частоты вращения в режиме мультипликатора. 1 — частота вращения быстроходного вала 2000 об/мин; 2 — частота вращения быстроходного вала 3000 об/мин; 3 — частота вращения быстроходного вала 3500 об/мин; 4 — частота вращения быстроходного вала 4000 об/мин

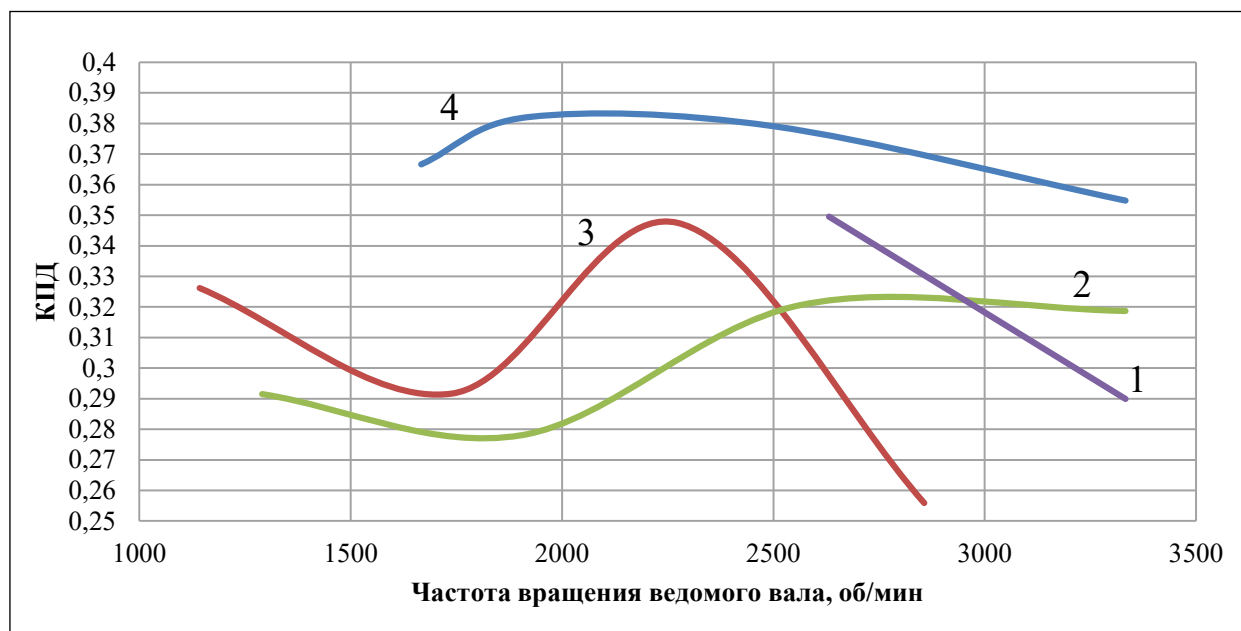


Рис. 12. Зависимость КПД от частоты вращения (мультипликатор). 1 — передача подмагничена, мощность генератора 15 Вт; 2 — передача подмагничена, мощность генератора 7 Вт; 3 — передача подмагничена, мощность генератора 2 Вт; 4 — передача не подмагничена, мощность генератора 2 Вт

Выводы

В результате анализа результатов испытаний могут быть сделаны следующие выводы:

1. Использование подмагничивания полюсов статора и ротора коаксиальной магнитной передачи позволяет существенно повысить ее нагрузочную способность и устойчивость работы при работе на механизмы с нестабильным моментом на входном валу.

2. Наряду с увеличением максимального (срывного) момента использование подмагничивания приводит к снижению КПД передачи за счет увеличения магнитных потерь в стали, поэтому применение подмагничивания целесообразно только при работе на нагрузки с периодическими резкими изменениями момента.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Фонда содействия инновациям по программе «Студенческий стартап».

Библиографический список

1. Молоканов О. Н. Разработка методов расчета и анализ перспективных конструкций бесконтактных магнитных передач: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2017. 153 с.

2. Применение электромагнитов в коаксиальной магнитной передаче для компенсации наброса нагрузки / Д. С. Тарицын [и др.] // Eltrans 2023: сборник трудов XI Международного симпозиума (Санкт-Петербург, 31 мая – 2 июня 2023 года). ПГУПС, 2023.

3. Регулируемая коаксиальная передача на основе постоянных магнитов: патент № RU 216916 U1 Рос. Федерация, № 2023103523 / Д. С. Тарицын [и др.]; заявл. 16.02.2023, опубл. 09.03.2023. Заявитель: ООО «Магнитные передачи».

4. Синхронная муфта с постоянными магнитами: патент № SU 416810 A1 СССР, № 1746707/24-7 / Г. А. Иванов [и др.]; заявл. 09.02.1972, опубл. 25.02.1974.

5. Двигатель МСА 45/64–148/ML2 // Самоделкин [Электронный ресурс]. URL: <https://kirov.samodelkin-mag.ru/stiralnyie-mashinyi/dvigateli/dvigatel-k-stiralnoj-mashine-ardo> (дата обращения: 03.03.2024).

6. 16-битный многофункциональный USB-модуль USB-4716 // Advantech [Электронный ресурс]. URL: https://www.advantech.com/ru-ru/products/1-2mlkno/usb-4716/mod_a3ab933c-c6d3-49eb-9d25-58cacedef7a (дата обращения: 03.03.2024).

7. Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 408 с.

Дата поступления: 07.07.2024

Решение о публикации: 01.08.2024

Контактная информация:

ТАРИЦЫН Данил Сергеевич — студент;
parovozik_tar@mail.ru

ОРЛОВ Данил Александрович — студент;
mr.danisimo@yandex.ru

ПЕТУХОВ Александр Игоревич — студент;
trevlmoimalenki@gmail.com

Test results of a prototype transmission with non-contact gearing based on permanent magnets

D. S. Taritsyn, D. A. Orlov, A. I. Petukhov

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

For citation: Taritsyn D. S., Orlov D. A., Petukhov A. I. Test results of a prototype transmission with non-contact gearing based on permanent magnets // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 706–717. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-706-717

Abstract

Purpose: the paper studies the properties of a coaxial magnetic transmission with permanent magnets and magnetizing windings. The dependences of the efficiency on the rotation frequency and load power are revealed, as well as the dependence of the maximum torque preceding the engagement failure on the magnetizing current and the rotation frequency. **Methods:** experimental study on a stand by loading the drive motor through the test transmission on a generator loading on a resistor. The process of studying the stand is also described, including determining the losses in test electric machines by the method of individual losses, as well as establishing the correspondence between the frequency of the tachogenerator voltage and the rotation frequency of the drive motor. **Results:** it was found that the magnetic transmission is capable of operating both in the reducer mode and in the multiplier mode, while the efficiency in the reducer mode is generally higher and depends on the rotation frequency of the transmission to a greater extent than in the multiplier mode. It can also be said that the use of magnetization allows increasing the maximum torque given to the load, but reduces the efficiency due to the increase in losses in the steel. **Practical significance:** the results of the work can be applied in mechanical engineering when designing loaded magnetic transmissions operating in the mode of uneven loads in machine drives.

Keywords: coaxial magnetic transmission, gearbox, multiplier, permanent magnet, efficiency, maximum torque

References

1. Molokanov O. N. Razrabotka metodov rascheta i analiz perspektivnykh konstrukcij beskontaknykh magnitnykh peredach: diss. ... kand. tekhn. nauk. M., 2017. 153 s. (In Russian)
2. Primenenie elektromagnitov v koaksial'noj magnitnoj peredache dlya kompensacii nabrosa nagruzki / D. S. Taricyn [i dr.] // Eltrans 2023: sbornik trudov XI Mezhdunarodnogo simpoziuma (Sankt-Peterburg, 31 maya – 2 iyunya 2023 goda). PGUPS, 2023. (In Russian)
3. Reguliruemaya koaksial'naya peredacha na osnove postoyannykh magnitov: patent № RU 216916 U1 Ros. Federaciya, № 2023103523 / D. S. Taricyn [i dr.]; zayavl. 16.02.2023, opubl. 09.03.2023. Zayavitel': OOO "Magnitnye peredachi". (In Russian)
4. Sinhronnaya mufta s postoyannymi magnitami: patent № SU 416810 A1 SSSR, № 1746707/24–7 / G. A. Ivanov [i dr.]; zayavl. 09.02.1972, opubl. 25.02.1974. (In Russian)
5. Dvigatel' MSA 45/64–148/ML2 // Samodelkin [Elektronnyj resurs]. URL: <https://kirov.samodelkin-mag.ru/stiralnyie-mashinyi/dvigateli/dvigatel-k-stiralnoj-mashine-ardo> (data obrashcheniya: 03.03.2024). (In Russian)
6. 16-bitnyj mnogofunkcional'nyj USB-modul' USB-4716 // Advantech [Elektronnyj resurs]. URL: https://www.advantech.com/ru-ru/products/1-2mlkno/usb-4716/mod_a3ab933c-c6d3-49eb-9d25-58cacecdef7a (data obrashcheniya: 03.03.2024).
7. Zherve G. K. Promyshlennye ispytaniya elektricheskikh mashin. L.: Energoatomizdat, 1984. 408 s. (In Russian)

Received: 07.07.2024

Accepted: 01.08.2024

Author's information:

Danil S. TARITSYN — student; parovozik_tar@mail.ru

Danil A. ORLOV — student; mr.danisimo@yandex.ru

Alexander I. PETUKHOV — student; trevlmoi-malenki@gmail.com

УДК 656.27

К совершенствованию технологии планирования транспортных процессов взаимодействия железнодорожных линий различных категорий

К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин

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

Для цитирования: Ковалев К. Е., Новичихин А. В. К совершенствованию технологии планирования транспортных процессов взаимодействия железнодорожных линий различных категорий // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 718–728. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-718-728

Аннотация

Цель: повышение эффективности функционирования транспортной сети на основе разработанной сбалансированной системы показателей взаимодействия железнодорожных линий различных категорий. **Методы:** применены методы теории управления, системного анализа, синтеза и математического моделирования, теории транспортных процессов и систем, планирования на транспорте. **Результаты:** обоснован набор показателей, влияющих на взаимодействие железнодорожных линий различных категорий, на основе сбалансированной системы показателей, позволяющей выработать корректирующие мероприятия по оптимизации перевозочного процесса. **Практическая значимость:** реализация предлагаемых решений обеспечивает конкретизацию программы повышения эффективности эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий общего пользования и корректировку плановых перевозок по данным линиям.

Ключевые слова: малоинтенсивные железнодорожные линии, сбалансированная система показателей, гибкое управление, планирование транспортных процессов

Введение

Малоинтенсивные железнодорожные линии (МИЛ), как правило, обслуживают удаленные и малонаселенные районы, соединяя их с крупными транспортными узлами. МИЛ сталкиваются с проблемами низкой доходности, недостаточной пропускной способности и ограниченных инвестиций [1–4]. Одним из результативных решений для повышения эффективности работы и увеличения доходов МИЛ являются разработка и внедрение сбалансированной системы показателей взаимодействия с линиями других категорий. Такая система позволит не только оценить текущее состояние и выявить слабые места,

но и определить приоритетные направления для совершенствования и модернизации с учетом эксплуатационных, финансовых, экологических и социальных аспектов для обеспечения комплексного развития железнодорожной сети.

В данной статье рассматривается процесс разработки сбалансированной системы показателей взаимодействия железнодорожных линий, включая эксплуатационные, финансовые и социальные характеристики. Предлагаемые меры направлены на повышение эффективности работы и доходов МИЛ, что способствует синергетическому

и устойчивому развитию эксплуатации железнодорожной инфраструктуры.

Разработка инструментария взаимодействия железнодорожных линий различных категорий

Разработка инструментария гибкого управления процессом взаимодействия МИЛ с линиями других категорий [5, 6] является сложной задачей, требующей учета различных факторов, таких как объемы перевозок, технические характеристики подвижного состава и инфраструктуры, а также требования к безопасности и надежности. Предлагаемая процедура повышения эффективности взаимодействия МИЛ с линиями других категорий представлена на рис. 1.

Процедура базируется на анализе и классификации линий. Большинство линий, кроме МИЛ, характеризуются высокой интенсивностью движения поездов и загрузкой инфраструктуры при соблюдении графика движения. МИЛ имеют низкие размеры движения и объемы грузовой и коммерческой работы. В связи с этим гибкие изменения в графике движения поездов не приведут к затруднениям в продвижении грузопотоков.

Диагностирование проблем взаимодействия линий с использованием цифровых технологий возможно посредством современных автоматизированных систем управления (АСУ СТ, «Эльбрус», АСУ МР, АСУ ТСК, «Оникс», ДМЗИ), которые позволяют проводить мониторинг и управление движением поездов в реальном времени. Также возможно применение инструментов для мониторинга состояния инфраструктуры и подвижного состава, а также искусственного интеллекта и машинного обучения для прогнозирования спроса на перевозки [7].

Системы управления можно использовать для определения неэффективных элементов

взаимодействия с использованием процедуры планирования и координации между линиями различных категорий для оптимизации маршрутов, перераспределения транспортных потоков, минимизации задержек и повышения пропускной способности транспортной сети. Например, при выделении интервалов в графике движения для пропуска поездов по МИЛ в периоды высокой загрузки прилегающих линий других категорий.

Производится оценка эффективности работы. В тех случаях, когда она требует корректировки, формируется сбалансированная система показателей для определения тенденции к повышению эффективности взаимодействия линий. Оптимизация маршрутов проводится на основе гибкого перераспределения маршрутов по данным от операторов, пассажиров и других участников перевозочного процесса для корректировки и повышения эффективности процесса взаимодействия железнодорожных линий различных категорий. На основе процедуры повышения эффективности взаимодействия интенсивных и малоинтенсивных линий формируются рекомендации для программы по повышению эффективности эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий.

Оценка взаимодействия МИЛ с линиями других категорий

Рассмотрим блок 2 (рис. 1) процедуры повышения эффективности взаимодействия железнодорожных линий на основе производимых коммерческих операций, которые могут быть реализованы на станциях, расположенных на МИЛ и ИЛ в виде матрицы (табл. 1), на основе прейскуранта 10-01 [7].

Обозначения производимых коммерческих операций представлены из прейскуранта 10-01 [7]. На всех категориях линии выполняются операции:

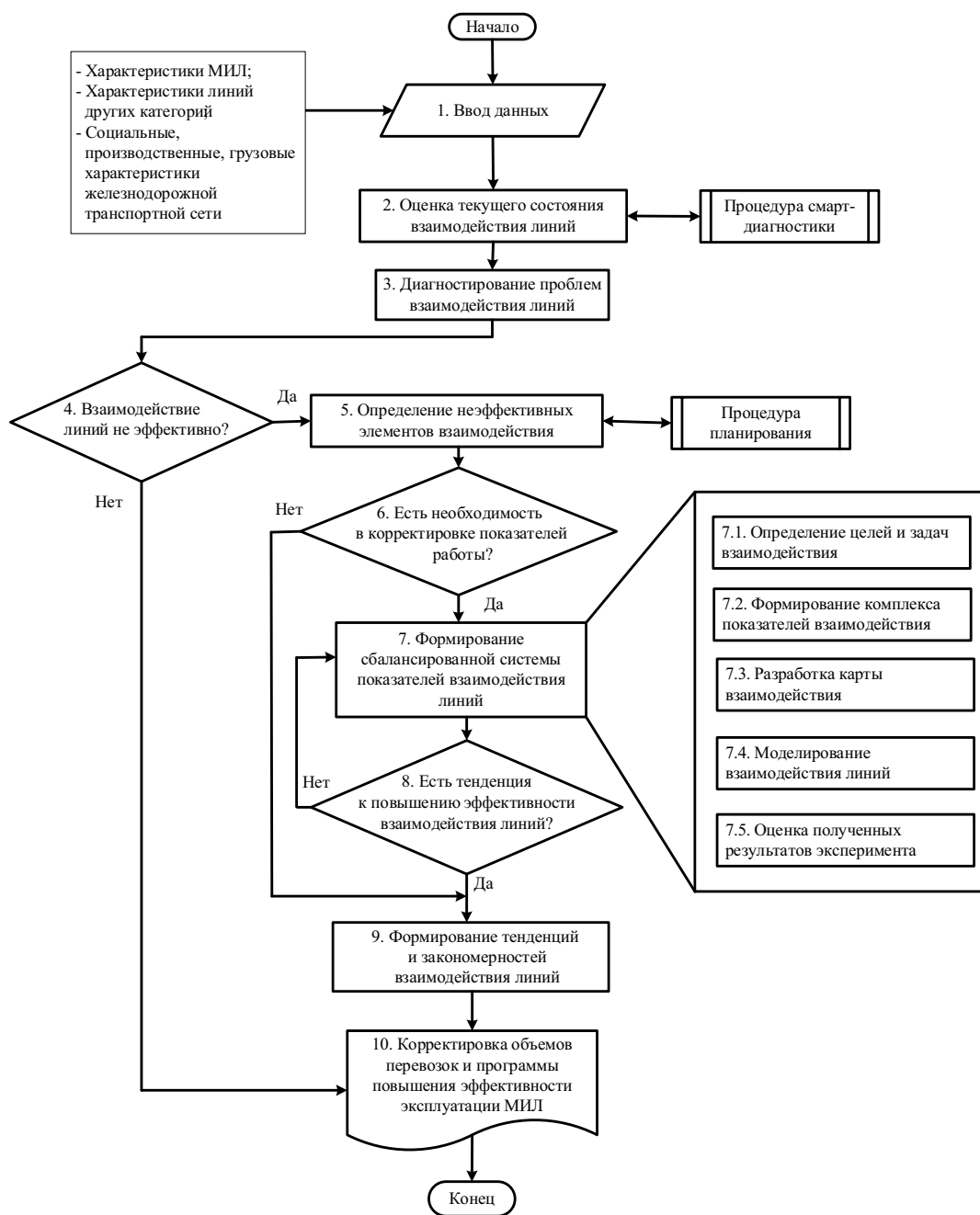


Рис. 1. Блок-схема процедуры повышения эффективности взаимодействия интенсивных и малоинтенсивных линий

ТАБЛИЦА 1. Матрица взаимодействия железнодорожных линий различных категорий по реализации коммерческих операций

Категории линий	Линии других категорий	МИЛ
Линии других категорий	П, О, 1, 3, 4, 5, 6, 8, 8н, 9, 10, 10н, Г, М, Т	П, Б, 1, 3, 6, 7, 9, Г
МИЛ	2, 4, 9, Г	7, 9 Г

– 9 — прием и выдача мелких отправок грузов, допускаемых к хранению на открытых площадках станций;

– Г — прием и выдача грузобагажа предприятий, организаций и учреждений.

На базе приведенных коммерческих операций целесообразно увеличивать степень взаимодействия МИЛ и ИЛ. Также перспективным направлением является операция 6 (прием и выдача грузов в универсальных контейнерах массой брутто 3,3 (5) и 5,5 (6) т на путях необщего пользования) (табл. 2).

Предложено определить степень согласованности МИЛ и линий других категорий по формуле:

$$S = \frac{\sum N_i}{\sum N_{i,j}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $\sum N_i$ — количество реализуемых коммерческих операций на станциях линии;

$\sum N_{i,j}$ — общее количество коммерческих операций.

ТАБЛИЦА 2. Степень согласованности коммерческих операций на железнодорожных линиях различных категорий

Категории линий	Линии других категорий	МИЛ
Линии других категорий	1	0,53
МИЛ	0,33	0,2

Увеличение количества возможных коммерческих операций при взаимодействии МИЛ с линиями других категорий позволит повысить эффективность функционирования транспортной сети. В связи с этим необходимо определить, какие наиболее вероятные коммерческие операции целесообразно реализовывать на МИЛ.

При выполнении на МИЛ операции «Прием и выдача мелких отправок грузов, требу-

ющих хранения в крытых складах станций» приведет к появлению на ИЛ операций 3, 5, 6, 8 и 8н. Аналогично по другим коммерческим операциям составлена матрица вероятностей взаимодействий МИЛ с линиями различных категорий по производимым коммерческим операциям.

На основе теории надежности [1] определим степень согласованности ИЛ и МИЛ по выражению:

$$H = \log_2 \cdot n, \quad (2)$$

где n — количество реализуемых коммерческих операций.

Мера согласованности коммерческих операций взаимодействия линий определяется на основе данных табл. 1. Количество операций на МИЛ $S_1 = 3$; количество операций на линиях других категорий $S_2 = 15$; при взаимодействии МИЛ с линиями других категорий реализуется $S_3 = 8$.

Мера согласованности H определяется как отношение разности операций на каждой из категорий линий к общему количеству операций и составит $H = 0,33$. Мера согласованности определяется в диапазоне $0 \leq H \leq 1$, где 0 — полная несогласованность, а 1 — полная согласованность.

Таким образом, для повышения степени согласованности и взаимодействия линий различных категорий целесообразно корректировать перечень коммерческих операций на МИЛ в соответствии с планируемыми объемами перевозок на дальнем горизонте.

Сбалансированная система показателей взаимодействия МИЛ с линиями других категорий

В данном разделе детализирован блок 7 «Формирование сбалансированной системы показателей взаимодействия линий» (рис. 1).

Система сбалансированных показателей (ССП) [9–11] позволяет формировать ключевые показатели, измерять и контролировать процесс взаимодействия МИЛ с линиями других категорий в условиях, когда финансовые показатели не являются единственным критерием эффективности организации и учитывается потенциал развития предприятия.

В работе предложена СПП взаимодействия железнодорожных линий различных категорий, позволяющая создать систему, которая

отражает взаимосвязь между различными аспектами процесса и обеспечивает комплексный подход к управлению системой взаимодействия линий различных категорий. СПП содержит следующие элементы (рис. 2):

1. Перспективы, включающие элементы для декомпозиции стратегии.
2. Цели, формирующие направление реализации стратегии.
3. Набор показателей, отражающих динамику при достижении целей.

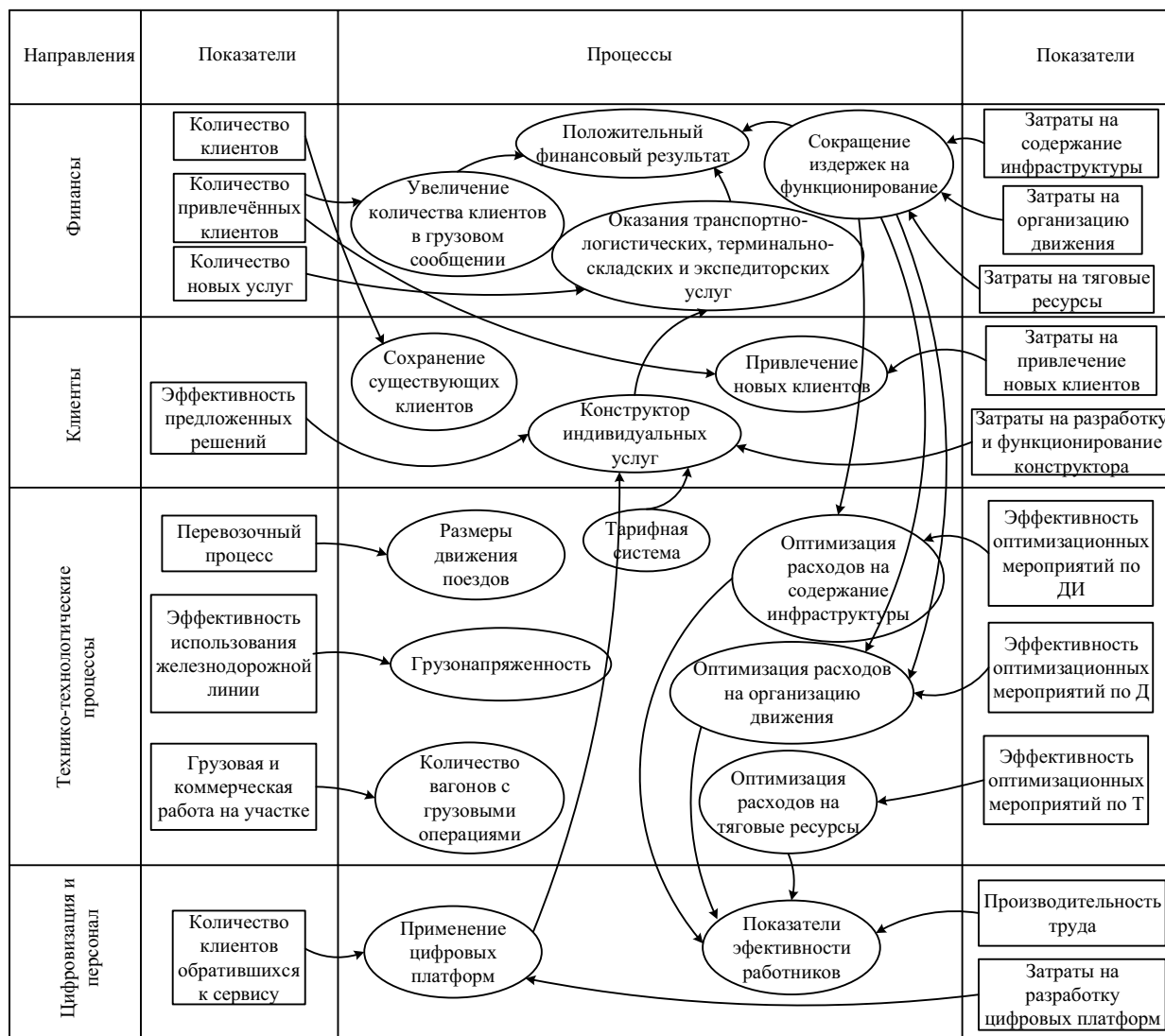


Рис. 2. Система сбалансированных показателей для повышения эффективности взаимодействия линий различных категорий

4. Количественные значения показателей для достижения цели.

5. Причинно-следственные связи целей, показателей и процессов.

6. Стратегические инициативы, состоящие в реализации мероприятий, направленных на достижение целей взаимодействия МИЛ с линиями других категорий.

ССП позволяет согласовать задачи функционирования железнодорожных линий различных категорий и железнодорожной транспортной сети в целом для достижения общих целей компании.

Реализация сбалансированной системы показателей взаимодействия МИЛ с линиями других категорий

Система сбалансированных показателей для повышения эффективности взаимодействия МИЛ и ИЛ реализована в программном

продукте BSC Designer [11], предназначенном для разработки и управления показателями системы (рис. 3), которые используются для планирования и контроля производительности предприятий и организаций (табл. 3).

Набор принятых показателей для разработки ССП представлен в табл. 3.

ССП позволяет оценить текущее состояние и определить направления для совершенствования работы транспортной сети. В табл. 4 представлены некоторые результаты проведенных экспериментов.

Реализация СПП обеспечивает рост количества новых клиентов (рис. 4) за счет комплекса мероприятий, которые формируют конструктор логистических решений:

1. Формирование гибких маршрутов и индивидуальных логистических услуг для клиентов в рамках конструктора индивидуальных логистических услуг, а также

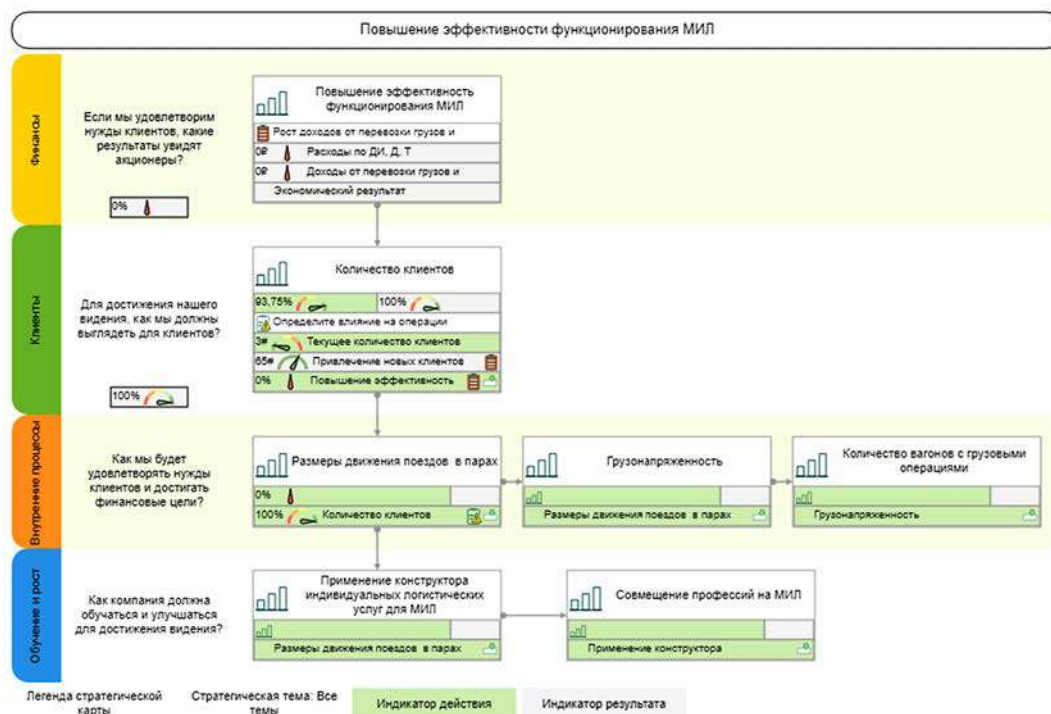


Рис. 3. Концептуальное изображение сбалансированной системы показателей для повышения эффективности взаимодействия МИЛ с линиями других категорий

ТАБЛИЦА 3. Набор показателей для разработки ССП

Категория	Показатель	Целевой показатель
Эксплуатационные	Реализация нормативного графика движения	Не менее 95 %
	Количество пар поездов в сутки	Увеличение на 10 %
	Грузонапряженность	Увеличение на 10 %
Финансовые	Доходность перевозок	Увеличение на 25 %
	Соотношение инвестиций и субсидий к доходам	Снижение зависимости от субсидий на 10 %
	Увеличение доходов от дополнительных услуг	Увеличение на 30 %
Социальные	Удовлетворенность пассажиров	Увеличение удовлетворенности на 15 %
	Расширение транспортной доступности	Увеличение числа обслуживаемых населенных пунктов на 10 %
Взаимодействие с линиями других категорий	Степень точности и актуальности данных, используемых для принятия решений о перераспределении транспортных потоков	Уменьшение времени получения достоверной информации на 5 %
	Способность линий адаптироваться к изменениям во внешней среде и требованиям клиентов	Повышение уровня адаптивности на 5 %

ТАБЛИЦА 4. Показатели моделирования ССП

Категория	Показатель	Исходное значение	Целевое значение	Значение показателей, достигнутое за счет корректировки программы по повышению эффективности эксплуатации МИЛ
Эксплуатационные	Реализация нормативного графика движения	80 %	95 %	80 %
	Количество пар поездов в сутки	3 поезда	3,6 поезда	3 поезда
	Грузонапряженность	1200	3000	2000
Финансовые	Доходность перевозок	125 %	156,25 %	125 %
	Соотношение инвестиций и субсидий к доходам	7	6,3	7
	Увеличение доходов от дополнительных услуг	20 %	26 %	20 %
Социальные	Удовлетворенность пассажиров	85 %	97,75 %	85 %
	Расширение транспортной доступности	5	6	6
Взаимодействие с линиями других категорий	Степень точности и актуальности данных, используемых для принятия решений о перераспределении транспортных потоков	80 %	90 %	85 %
	Способность линий адаптироваться к изменениям во внешней среде и требованиям клиентов	80 %	96 %	80 %

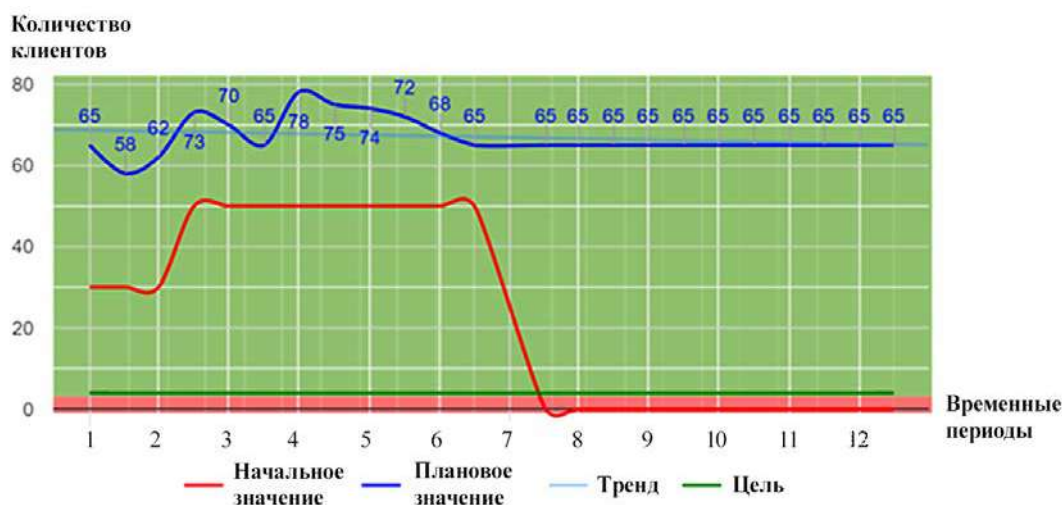


Рис. 4. Количество клиентов, использующих МИЛ в перевозочном процессе

модернизация инструментов для организации перевозок и решений по использованию инфраструктуры МИЛ.

2. Мультимодальные перевозки, объединяющие железнодорожные, автомобильные и морские перевозки.

3. Формирование комплексных предложений, включающих услуги по хранению, упаковке и документальному оформлению грузов.

4. Заключение партнерских соглашений с крупными грузоотправителями и логистическими компаниями для использования малоинтенсивных железнодорожных линий для долгосрочного и взаимовыгодного сотрудничества, с учетом динамично изменяющихся внешних и внутренних условий функционирования.

Конструктор логистических решений представляет собой инструмент, позволяющий пользователям создавать и настраивать логистические решения, адаптированные к их специфическим потребностям. Такой конструктор дает возможность выбрать различные компоненты и опции, чтобы сформировать оптимальную цепь поставки, включающую транспортировку, хранение и дополнительные необходимые операции с грузами.

Элементы конструктора индивидуальных логистических услуг включают в себя выбор транспортных средств и маршрутов, формирование складских услуг, таможенное оформление, мониторинг продвижения грузопотока, интеграцию с АСУ железнодорожного транспорта, сбор и анализ информации для принятия последующих управляющих воздействий. Конструктор индивидуальных логистических услуг, доступный различным участникам перевозочного процесса, позволяет создавать уникальные решения для повышения эффективности логистических процессов. На рис. 5 представлена динамика привлечения новых клиентов за счет применения конструктора логистических решений.

Наблюдается общая положительная линия тренда по количеству привлекаемых клиентов, готовых использовать МИЛ. Применение конструктора индивидуальных логистических услуг на МИЛ позволит повысить эффективность взаимодействия за счет разработки гибких схем доставки грузов с учетом индивидуальных потребностей клиентов по времени, маршруту и условиям перевозки.

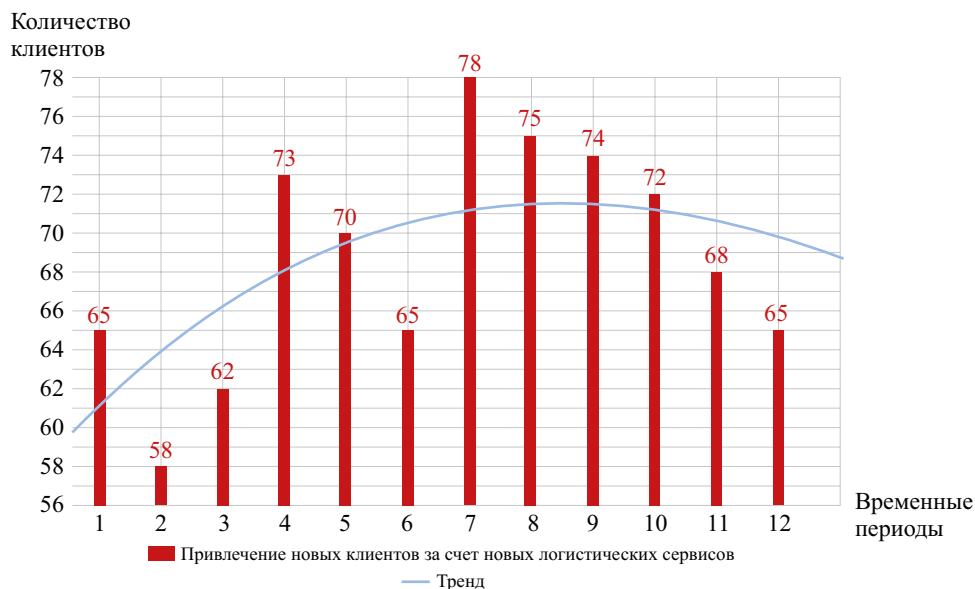


Рис. 5. Динамика количества новых клиентов за счет применения конструктора индивидуальных логистических услуг

Заключение

Разработка ССП взаимодействия МИЛ с линиями других категорий позволяет повысить эффективность функционирования железнодорожной транспортной сети на основе предложенной комплексной системы показателей, состоящей из технических, технологических и эксплуатационных характеристик. ССП позволяет выявлять узкие места, а также определять элементы для развития процесса взаимодействия МИЛ с линиями других категорий.

Применение конструктора индивидуальных логистических услуг на МИЛ способствует развитию интеграции таких линий в современные логистические цепи поставок, повышая их эффективность, гибкость и конкурентоспособность, в том числе для обеспечения государственных перевозок.

Библиографический список

1. Методика классификации железнодорожных линий ОАО «РЖД», утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 04.03.2015 № 551р. 8 с.

2. Эффективность эксплуатации и обслуживания малоинтенсивных железнодорожных линий / под ред. С. П. Вакуленко; Российский университет транспорта РУТ (МИИТ). М.: ВИНТИ РАН, 2018. 218 с.

3. Шарапов С. Н., Лялько М. В. Классификация и специализация железнодорожных линий — основа оптимизации эксплуатационных расходов // Железнодорожный транспорт. 2016. № 7. С. 50–60.

4. Терещнев Л. В. Малодеятельные железнодорожные линии или неинтенсивная экономика // Транспорт Российской Федерации. 2008. № 6 (19). С. 20–24.

5. Ковалев К. Е., Новичихин А. В. Совершенствование транспортных технологических процессов железнодорожной сети // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, вып. 1. С. 178–186.

6. Ковалев К. Е., Новичихин А. В. Процедура планирования работы малоинтенсивных железнодорожных линий: логистические аспекты и нейросетевые модели // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20, вып. 2. С. 325–335.

7. Шестаков П. А., Мартышкин Р. В. О методических рекомендациях по формированию тестового прогноза грузовых перевозок в рамках модуля сценарного прогнозирования спроса на грузовые перевозки в детализации «станция — станция» предиктивной бизнес-модели железнодорожных перевозок ОАО «РЖД» // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». 2018. № 3. С. 74–80.

8. Прейскурант № 10-01. Тарифы на перевозку грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые «Российскими железными дорогами» (утв. постановлением ФЭК РФ от 17.06.2003 № 47-т/5). 463 с.

9. Каплан Р. С., Нортон Д. П. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию. М.: Олимп-Бизнес, 2006. 320 с.

10. Шилова Н. Н., Хорсов А. Н. Сбалансированная система показателей в стратегии управления

компанией // Экономика и предпринимательство. 2019. № 4 (105). С. 781–783.

11. Kapnadak V., Senel M., Coyle E. J. Distributed iterative quantization for interference characterization in wireless networks // 2010 IEEE International Conference on Communications. Cape Town, 2010. С. 5502602.

Дата поступления: 14.07.2024

Решение о публикации: 24.08.2024

Информация об авторах

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

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — докт. техн. наук, доцент; novitchihin@bk.ru

Towards improving the technology of planning transport processes of interaction between railway lines of various categories

K. E. Kovalev, A.V. Novichikhin

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

For citation: *Kovalev K. E., Novichikhin A.V. Towards improving the technology of planning transport processes of interaction between railway lines of various categories // Proceedings of Petersburg Transport University. Vol. 21, iss. 3, P. 718–728. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-718-728*

Abstract

Purpose: increasing the efficiency of the transport network based on the developed balanced system of indicators for the interaction of railway lines of various categories. **Methods:** methods of control theory, system analysis, synthesis and mathematical modeling, theory of transport processes and systems, and transport planning methods are used. **Results:** a set of indicators that influence the interaction of railway lines of various categories is substantiated, based on a balanced system of indicators, which makes it possible to develop corrective measures to optimize the transportation process. **Practical significance:** the implementation of the proposed solutions allows us to develop and specify a program to increase the efficiency of operation of low-intensity public railway lines and adjust scheduled transportation on these lines.

Keywords: low-intensity railway lines, balanced scorecard, flexible management, planning of transport processes

References

1. Metodika klassifikacii zheleznodorozhnyh linij OAO “RZHD”, utverzhennaya rasporyazheniem OAO “RZHD” ot 04.03.2015 № 551r. 8 s. (In Russian)
2. Effektivnost’ ekspluatatsii i obsluzhivaniya malointensivnyh zheleznodorozhnyh linij / pod red. S. P. Vakulenko; Rossijskij universitet transporta RUT (MIIT). M.: VINITI RAN, 2018. 218 s. (In Russian)
3. Sharapov S. N., Lyal’ko M. V. Klassifikaciya i specializaciya zheleznodorozhnyh linij — osnova optimizacii ekspluatacionnyh raskhodov // Zheleznodorozhnyj transport. 2016. № 7. S. 50–60. (In Russian)
4. Terebnev L. V. Malodeyatel’nye zheleznodorozhnye linii ili neintensivnaya ekonomika // Transport Rossijskoj Federacii. 2008. № 6 (19). S. 20–24. (In Russian)
5. Kovalev K. E., Novichihin A. V. Sovershenstvovanie transportnyh tekhnologicheskikh processov zheleznodorozhnoj seti // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2024. T. 21, vyp. 1. S. 178–186. (In Russian)
6. Kovalev K. E., Novichihin A. V. Procedura planirovaniya raboty malointensivnyh zheleznodorozhnyh linij: logisticheskie aspekty i nejrosetevye modeli // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2023. T. 20, vyp. 2. S. 325–335. (In Russian)
7. Shestakov P. A., Martyshkin R. V. O metodicheskikh rekomendacijah po formirovaniyu testovogo prognoza gruzovyh perevozok v ramkah modulya scenarnogo prognozirovaniya sprosa na gruzovye perevozki v detalizacii “stanciya — stanciya” prediktivnoj biznes-modeli zheleznodorozhnyh perevozok OAO “RZHD” // Byulleten’ uchenogo soveta AO “IERT”. 2018. № 3. S. 74–80. (In Russian)
8. Prejskurant № 10-01. Tarify na perevozku gruzov i uslugi infrastruktury, vypolnyaemye “Rossijskimi zheleznymi dorogami” (utv. postanovleniem FEK RF ot 17.06.2003 № 47-t/5). 463 s. (In Russian)
9. Kaplan R. S., Norton D. P. Sbalansirovannaya sistema pokazatelej. Ot strategii k dejstviyu. M.: Olimp-Biznes, 2006. 320 s. (In Russian)
10. Shilova N. N., Horsov A. N. Sbalansirovannaya sistema pokazatelej v strategii upravleniya kompaniej // Ekonomika i predprinimatel’stvo. 2019. № 4 (105). S. 781–783. (In Russian)
11. Kapnadak V., Senel M., Coyle E. J. Distributed iterative quantization for interference characterization in wireless networks // 2010 IEEE International Conference on Communications. Cape Town, 2010. C. 5502602.

Received: 14.07.2024

Accepted: 24.08.2024

Author’s information:

Konstantin E. KOVALEV — PhD in Engineering;
kovalev_kostia@mail.ru

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

УДК 624.6.012.45

Методы прогнозирования долгосрочного поведения преднапряженных железобетонных мостов

Р. А. Авхимович^{1, 2}, С. В. Чижов¹

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

² АО «Институт Гипростроймост – Санкт-Петербург», Россия, 197198, Санкт-Петербург, ул. Яблочкова, 7

Для цитирования: Авхимович Р. А., Чижов С. В. Методы прогнозирования долгосрочного поведения преднапряженных железобетонных мостов // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 729–743. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-729-743

Аннотация

Цель: провести анализ причин долгосрочных деформаций пролетных строений из преднапряженного железобетона и проблем, связанных с их прогнозированием. Выполнить краткий обзор существующих методов прогнозирования долгосрочного поведения преднапряженных железобетонных мостов. Актуальность проблемы обусловлена необходимостью обеспечения надежности и долговечности этих конструкций, которые широко применяются в современном мостостроении. Статья направлена на выявление факторов, влияющих на развитие долгосрочных деформаций, и разработку подходов к их точному прогнозированию. **Методы:** рассмотрение долгосрочных деформаций пролетных строений преднапряженных железобетонных мостов и проблем, связанных с их прогнозированием на примере существующих мостовых сооружений. Проведена оценка существующих методов прогнозирования долгосрочных деформаций в преднапряженном железобетоне. В частности, анализ воздействия релаксации высокопрочной арматуры, а также эффектов ползучести и усадки бетона. **Результаты:** корректное прогнозирование долгосрочных деформаций является сложной задачей, требующей учета множества факторов, таких как потери предварительного напряжения, условия окружающей среды, свойства материалов и конструктивные особенности мостов. Рассмотренные в статье методы, включая метод множителей и приближенный метод временных интервалов, показывают свою эффективность в оценке долгосрочных деформаций. Однако существует необходимость проведения дальнейших исследований в области улучшения методов прогнозирования для повышения эффективности проектирования преднапряженных железобетонных мостов. **Практическая значимость:** предоставление инженерам-проектировщикам конкретных методов и подходов для оценки долгосрочного поведения преднапряженных железобетонных мостов. Применение указанных методов позволяет уменьшить риски возникновения сверхнормативных деформаций и прогибов, что в конечном итоге обеспечивает безопасность и надежность мостовых сооружений.

Ключевые слова: преднапряженный железобетон, мост, прогнозирование долгосрочных деформаций бетона, усадка, ползучесть, релаксация арматуры

Введение

Развитие технологии высокопрочного бетона, связанное со значительным улучшением качества цемента и высокопрочной арматуры, определило возможность его широкого применения в мостостроении. С 1950-х годов

преднапряженный бетон стал использоваться для мостов с постоянно увеличивающимися длинами пролетов. В настоящее время преднапряженные железобетонные мосты занимают значительную долю в объеме пролетных

строений среди прочих типов благодаря своим преимуществам в отношении длины пролета к высоте балки, а также долговечности и экономической эффективности. Использование преднапряженного железобетона в мостостроении имеет ряд преимуществ, включая возможность создания более экономичных сечений с высокой долговечностью и привлекательным внешним видом. Однако с увеличением длины пролетов и развитием новых технологий строительства вопросы контроля долгосрочных деформаций и прогибов стали более актуальными.

Причины долгосрочных деформаций и проблемы, связанные с их прогнозированием

Под долгосрочными понимаются зависящие от времени изменения, вызванные релаксацией высокопрочной арматуры, а также ползучестью и усадкой бетона. Эти эффекты приводят к постепенному нарастанию деформаций, что приводит к изменению и перераспределению напряжений по всему сечению балки. Корректный прогноз таких деформаций необходим для проверки надежности конструкции по критериям эксплуатационной пригодности. После проверки напряжений и прогибов на каждом этапе строительства необходимо убедиться, что вертикальные деформации пролетных строений при действии подвижных временных нагрузок остаются в пределах, допускаемых нормативной документацией (п. 5.43 [13]).

Долгосрочные деформации, связанные с релаксацией высокопрочной арматуры, а также ползучестью и усадкой бетона, вызывают значительное увеличение прогиба пролетного строения, что приводит к росту растягивающих напряжений в бетоне и арматуре. Также сверхнормативный прогиб балок

моста приводит к изменению продольного профиля мостового полотна, что влияет на качество и безопасность проезда [2–6].

Считается, что эффект ползучести бетона характеризуется наиболее низкой прогностической точностью. Данное явление в совокупности с релаксацией высокопрочной арматуры привело к развитию значительных деформаций пролетных строений за эксплуатационный период более 40 лет [12]. Например, в 2020 году был выполнен капитальный ремонт Колмовского моста 1978 года постройки в Великом Новгороде (рис. 1). В ходе ремонта были заменены все элементы мостового полотна, а также выполнена замена пучков высокопрочной арматуры в балках пролетного строения для минимизации деформаций пролетного строения.

Также известен мост имени 50-летия Октября через реку Великую в Пскове 1967 года постройки (рис. 2). Главной проблемой сооружения стала сверхнормативная деформация продольного профиля пролетного строения вблизи устоя, что привело к необходимости устройства дополнительной опоры для выборки прогиба.

Существует несколько причин изменения деформации в зависимости от времени. К ним относятся ползучесть от веса балки и усилия предварительного напряжения, ползучесть от веса мостового полотна и различная усадка между захватками бетонирования, связанная со стадийностью производства работ. Одним из главных факторов для точного прогнозирования зависящих от времени параметров является корректное определение потерь предварительного напряжения и прогиба конструкции.

Для стандартной преднапряженной балки ее собственный вес и приложенные постоянные нагрузки вызывают прогиб вниз,



Рис. 1. Капитальный ремонт Колмовского моста в Великом Новгороде. Временная опора
(фото МКУ «Управление капитального строительства»)



Рис. 2. Мост имени 50-летия Октября в Пскове
(источник: <https://m.pln24.ru/automir/aprois/badtp/431940.html>)

который увеличивается со временем из-за эффекта ползучести бетона. Усилие предварительного напряжения и связанный с ним эффект ползучести, наоборот, приводят к выгибу балки вверх. Со временем происходят потери предварительного напряжения, связанные с эффектами релаксации высокопрочной арматуры, вследствие чего первоначальный выгиб уменьшается. Усадка бетона

в целом действует как смягчающий фактор, не способствуя росту долгосрочных прогибов, но при этом также уменьшая величину выгиба балки. Как правило, величина выгиба вверх за счет предварительного напряжения превышает величину прогиба вниз за счет собственного веса (рис. 3), что обеспечивает надежность конструкции на стадии эксплуатации.

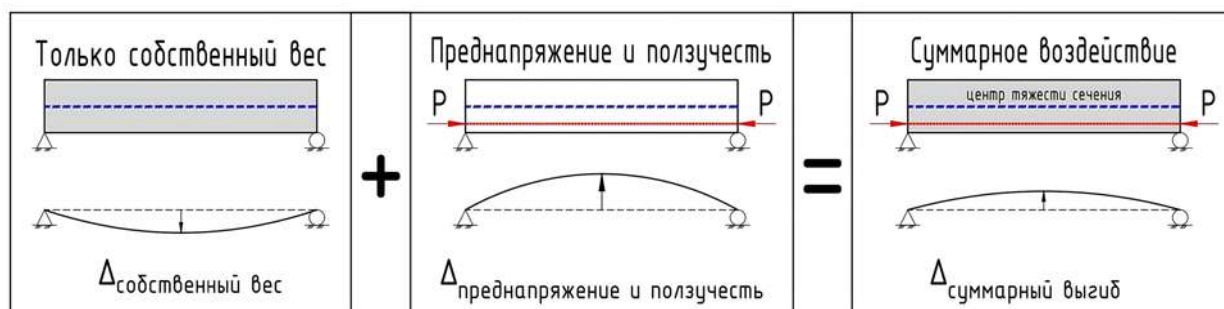


Рис. 3. Прогибы в преднапряженных балках

Тем не менее их некорректная оценка на стадии проектирования приведет к преобладанию прогиба вниз, что негативно скажется на эксплуатационных характеристиках всего сооружения, как указано на примерах выше.

Особенностью консольных мостов, построенных методом навесного монтажа с использованием сборных блоков (рис. 4), является необходимость выполнения комплексных расчетов для каждого этапа строительства, чтобы учесть долгосрочное поведение материала блоков под воздействием стадийных нагрузок.

Для таких систем необходим расчет прогиба на каждой стадии, а также корректное определение и учет требуемого выгиба (рис. 5). При этом система конструкции меняется с консольной на этапе строительства на неразрезную на этапе эксплуатации соответственно. Так как на этапе строительства конструкция продолжает прогибаться со временем вместе с ранее смонтированными бло-

ками балки, то при сопряжении консолей соседних опор может возникнуть значительная разница в уровне сопрягаемых торцов. Эту погрешность можно уменьшить с помощью домкратов или путем обеспечения заданного уклона профиля при изготовлении блоков.

Прогнозирование долгосрочных деформаций в преднапряженных балках сопряжено с различными вопросами. Например, с корректным определением фактического модуля упругости бетона или момента инерции поперечного сечения в зависимости от наличия или отсутствия в нем трещин. Долгосрочные параметры, такие как ползучесть, усадка и релаксация, зависят от свойств материалов и условий окружающей среды. Для их корректного прогнозирования требуются соответствующие модели материалов. Прогиб балки под действием предварительного напряжения связан с потерей усилия предварительного напряжения, зависящей, в свою очередь, от релаксации высокопрочной арматуры,

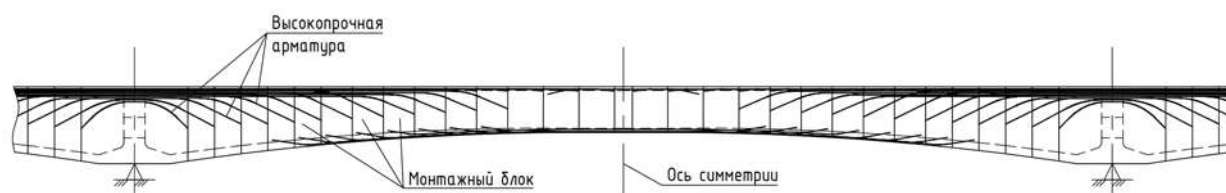


Рис. 4. Типовая схема консольного моста

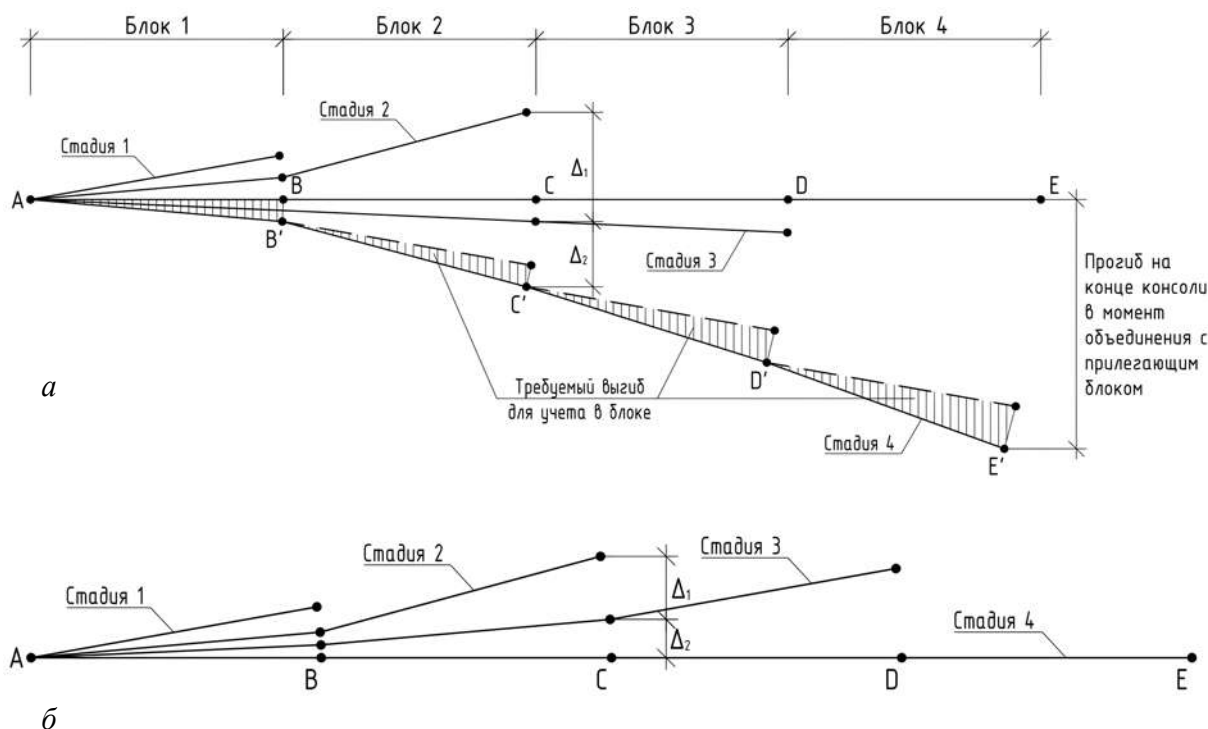


Рис. 5. Схема прогиба на примере четырехблочной консоли:

a — прогиб без учтенного выгиба в блоках;

б — прогиб с учтенным выгибом в блоках

а также ползучести и усадки бетона, в то время как прогиб под действием собственного веса увеличивается только из-за ползучести бетона. Таким образом, прогнозирование прогиба является одним из важных аспектов при проектировании мостовых сооружений. Прогнозирование долгосрочных потерь предварительного напряжения и деформаций, в свою очередь, требует соответствующего подхода к анализу из-за нелинейности задачи. Существуют различные методы и математические модели для прогнозирования долгосрочных деформаций.

Методы для прогнозирования долгосрочных деформаций

Прогнозирование долгосрочных деформаций затруднено из-за таких факторов, как

постепенное уменьшение силы предварительного напряжения, эффекта ползучести и влияния трещин в бетоне. Возможно использование относительно простых методик, которые позволяют определить величину прогиба в приемлемых пределах погрешности. Расчет величины прогиба упрощается, если точно известна сила предварительного напряжения, материалы работают только в упругой стадии и в бетоне не образуется трещин. При расчете сечения без трещин допустимо применять полный момент инерции без возникновения существенной погрешности. Зарубежный опыт проектирования предлагает использование множества методов для оценки долгосрочных деформаций пролетного строения [7]. Далее приведен обзор нескольких из них.

Метод множителей (коэффициентов) — наиболее простой метод прогнозирования деформаций в зависимости от времени в сборных предварительно напряженных элементах. Основная предпосылка заключается в применении коэффициента для мгновенного упругого прогиба, который учитывает долгосрочные эффекты в предварительно напряженных железобетонных конструкциях. Для использования этих коэффициентов нужно учитывать общую составляющую прогиба (мгновенную и зависящую от времени). Для этого нужно выделить повышающую и понижающую составляющие начального упругого прогиба. Это необходимо для учета эффекта потери предварительного напряжения, который влияет только на повышающую составляющую. В соответствии с методом к рассчитываемым деформациям вводятся повышающие коэффициенты C_1 в зависимости от стадии [8, 10]:

1. Стадия строительства.

1.1. Коэффициент прогиба (вниз) — относится к упругому прогибу под действием веса элемента при снятии предварительного напряжения.

1.2. Коэффициент выгиба (вверх) — применяется к упругому выгибу под действием предварительного напряжения в момент снятия предварительного напряжения.

2. Стадия реализации всех потерь и эффектов ползучести.

2.1. Коэффициент прогиба (вниз) — применяется к прогибу, рассчитанному в п. 1.1 выше.

2.2. Коэффициент выгиба (вверх) — применяется к выгибу, рассчитанному в п. 1.2 выше.

2.3. Коэффициент прогиба (вниз) — применяется только для упругого прогиба под действием только постоянных нагрузок.

Чтобы избежать переоценки величины прогиба, вводится понижающий коэффициент C_2 , который учитывает наличие ненапрягаемой арматуры и определяется по формуле:

$$C_2 = \frac{C_1 + A_s/A_p}{1 + A_s/A_p}, \quad (1)$$

где A_s — площадь ненапрягаемой арматуры;
 A_p — площадь напрягаемой арматуры.

Приближенный метод временных интервалов основан на упрощенной форме суммирования составляющих прогибов, обусловленных различными параметрами, зависящими от времени. Суммирование коэффициентов выполняется дважды: при снятии предварительного напряжения и в конечном состоянии, после реализации потерь предварительного напряжения. Приближенный метод временных шагов представляет собой компромисс между сложностью и эффективностью расчета, давая результаты, сопоставимые с методом множителей [1].

Выгиб балки (Δ_{pt}), который обусловлен предварительным напряжением, вычисляется по формуле:

$$\Delta_{pt} = \frac{P_i \cdot e_x}{E_b \cdot I_b} + \frac{(P_i - P_e) \cdot e_x}{E_b \cdot I_b} - \frac{(P_i + P_e) \cdot e_x \cdot C_u}{2 \cdot E_b \cdot I_b}, \quad (2)$$

где C_u — коэффициент ползучести;

e_x — эксцентриситет пучка на расстоянии x от опоры;

P_i — начальная сила предварительного напряжения до потерь;

P_e — конечная сила предварительного напряжения после потерь;

E_b — модуль упругости бетона;

I_b — момент инерции сечения.

Первое слагаемое — это начальный выгиб, второе слагаемое — уменьшение выгиба из-за потерь предварительного напряжения,

третье слагаемое — увеличение выгиба из-за ползучести бетона. В данном случае предполагается, что ползучесть происходит при постоянной силе предварительного напряжения, равной среднему значению начальной и конечной сил предварительного напряжения.

Суммарный прогиб конструкции под действием предварительного напряжения (Δ_{Pi} и Δ_{Pe}), собственного веса Δ_{Sw} , постоянных нагрузок Δ_{Dw} и временных нагрузок Δ_L определяется по формуле:

$$\Delta = -\Delta_{Pe} - 0,5 \cdot (\Delta_{Pi} + \Delta_{Pe}) \cdot C_u + (\Delta_{Sw} + \Delta_{Dw}) \cdot C_u + \Delta_L \quad (3)$$

Метод приращения временных интервалов позволяет повысить точность расчета прогиба по сравнению с приближенными методами. Предполагается, что ползучесть происходит не под действием постоянной силы, а под действием силы, которая уменьшается со временем из-за потерь предварительного напряжения. Этот процесс учитывается посредством суммирования, основанного на постепенных изменениях, происходящих за ряд последовательных временных интервалов. С помощью этого метода с большей точностью также может быть спрогнозирована потеря предварительного напряжения. Для учета зависящих от времени эффектов ползучести и усадки бетона, а также релаксации высокопрочной арматуры следует использовать соответствующие модели материалов [1].

Для определения величины прогиба в любом сечении в момент времени t формула (2) преобразуется в виде:

$$\Delta_{pi} = \frac{P_i \cdot e_c}{E_b \cdot I_b} + \sum_0^t (P_{n-1} - P_n) \cdot \frac{e_c}{E_b \cdot I_b} - \sum_0^t (C_{n-1} - C_n) \cdot P_{n-1} \cdot \frac{e_c}{E_b \cdot I_b}, \quad (4)$$

где e_c — эксцентриситет пучка в любом сечении по длине пролета;

$(n - 1)$ — начало конкретного временного интервала;

(n) — конец временного интервала;

C_{n-1}, C_n — коэффициент ползучести в начале и в конце определенного временного шага соответственно;

$(P_{n-1} - P_n)$ — потери предварительного напряжения на конкретном временном интервале от всех воздействий.

Схематичное представление изменения деформаций ϵ и углов поворота φ с момента времени $(n - 1)$ до (n) показано на рис. 6.

Обобщенно данный метод предполагает следующий алгоритм вычислений [11]:

1. Определение геометрических характеристик сечения, свойств бетона и высокопрочной арматуры, сбор нагрузок, данных о пролете и времени, в течение которого определяется деформация.

2. Определение величины предварительного напряжения в пучке после кратковременных потерь. Выбор расчетного сечения (например, середина пролета и опорное).

3. Определение напряжений от предварительного напряжения в верхней и нижней фибрах сечения. Определение деформаций посредством деления соответствующих напряжений на модуль упругости бетона.

4. Определение потерь предварительного напряжения для временного интервала, а также соответствующих напряжений и деформаций в верхней и нижней фибрах выбранных сечений.

5. Определение общей деформации с учетом деформаций ползучести в верхней и нижней фибрах выбранных сечений.

6. Определение чистой деформации ($\Delta\epsilon_n$ чистая) за вычетом деформаций, вызванных потерями предварительного напряжения (Δ'_n).

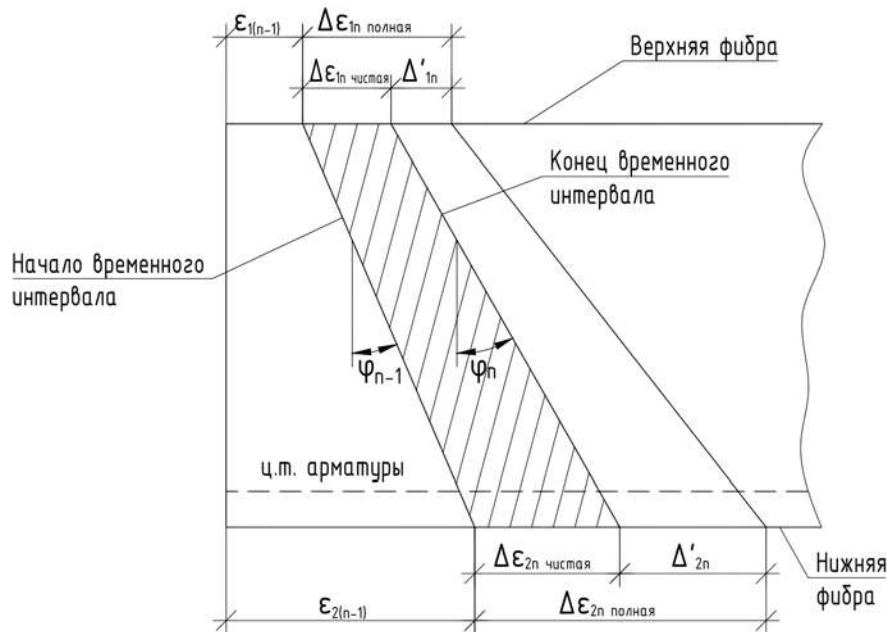


Рис. 6. Изменение деформаций ε и углов поворота φ на шаге n

В обобщенном виде для верхней и нижней фибр сечения определяется по формуле:

$$\Delta_p = \frac{P_i \cdot e_c \cdot L^2}{8 \cdot E_b \cdot I_b} = \left| \varphi_t \cdot \frac{L^2}{8} \right|, \quad (8)$$

$$\Delta \varepsilon_n \text{ чистая} = \Delta \varepsilon_n \text{ полная} - \Delta'_{1n}. \quad (5)$$

где L — длина пролета.

7. Определение приращения угла поворота φ от чистых деформаций и его суммирование с углом поворота на предыдущем интервале для получения полного угла поворота. Приращение угла поворота определяется по формуле:

$$\Delta \varphi_n = \frac{\Delta \varepsilon_{1n} \text{ чистая} - \Delta \varepsilon_{2n} \text{ чистая}}{H}, \quad (6)$$

где H — высота сечения.

Полный угол поворота φ_n , соответственно, определяется по формуле:

$$\varphi_n = \varphi_{n-1} + \Delta \varphi_n. \quad (7)$$

8. Определение выгиба балки Δ_p в середине пролета под действием предварительного напряжения по формуле:

9. Определение прогиба в середине пролета под действием собственного веса Δ_w по формуле:

$$\Delta_w = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E_b \cdot I_b} = \left| \varphi_t \cdot \frac{5 \cdot L^2}{48} \right|, \quad (9)$$

где q — нагрузка от собственного веса балки.

Рассмотрим применение метода на примере свободно опертой железобетонной балки прямоугольного сечения (рис. 7), воспринимающей только нагрузку от собственного веса.

В табл. 1 приведены геометрические характеристики сечения, а также параметры материалов, используемых для расчета.

Начальное усилие натяжения одного пучка P_1 примем 380 т (3728 кН). Тогда полное начальное усилие преднапряжения P_n составит:

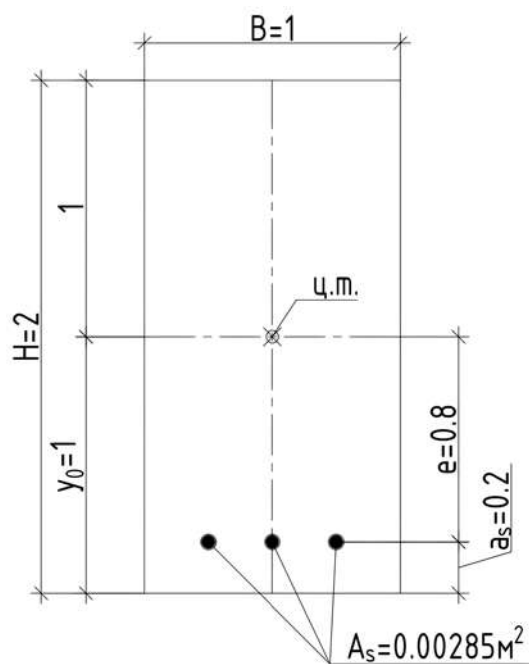


Рис. 7. Поперечное сечение балки

$$P_n = P_1 \cdot n = 3728 \cdot 3 = 11184 \text{ кН.} \quad (10)$$

Начальный момент преднапряжения определим по формуле:

$$M_n = P_n \cdot e = 11184 \cdot 0,8 = 8947 \text{ кНм.} \quad (11)$$

Определим растягивающие напряжения от преднапряжения в верхней фибре сечения:

$$\sigma_{в1} = \frac{M_n}{W_b} - \frac{P_n}{A_b} = \frac{8947}{0,6667} - \frac{111784}{2} = 7828 \text{ кН/м}^2. \quad (12)$$

Сжимающие напряжения от преднапряжения в нижней фибре сечения составят:

$$\sigma_{н1} = -\frac{M_n}{W_b} - \frac{P_n}{A_b} = -\frac{8947}{0,6667} - \frac{111784}{2} = -19012 \text{ кН/м}^2. \quad (13)$$

ТАБЛИЦА 1

Длина пролета	L	33	м
Высота балки	H	2	м
Ширина балки	B	1	м
Площадь сечения	A_b	2	м ²
Момент инерции сечения	I_b	0,6667	м ⁴
Расстояние от нижней грани до центра тяжести сечения	y_0	1,000	м
Момент сопротивления сечения	W_b	0,6667	м ³
Площадь одного пучка арматуры	A_1	0,00285	м ²
Количество пучков	n	3	шт
Площадь высокопрочной арматуры	A_s	0,00855	м ²
Расстояние от нижней грани до центра тяжести арматуры	a_s	0,2	м
Эксцентриситет арматуры относительно центра тяжести сечения	e	0,8	м
Класс бетона	B40		
Модуль упругости бетона	E_b	36000	МПа
Модуль упругости арматуры	E_p	195000	МПа
Отношение модулей упругости	α	5,417	
Удельный вес бетона	γ	25	кН/м ³

Найдем относительные деформации верхней фибры:

$$\varepsilon_{в1} = \frac{\sigma_{в1}}{E_b} = \frac{7828}{36 \cdot 10^6} = 2,17 \cdot 10^{-4}. \quad (14)$$

Соответственно, для нижней:

$$\varepsilon_{н1} = \frac{\sigma_{н1}}{E_b} = \frac{-19012}{36 \cdot 10^6} = -5,28 \cdot 10^{-4}. \quad (15)$$

Угол поворота φ_n в соответствии с формулой (6) составит:

$$\varphi_n = \frac{\varepsilon_{в1} - \varepsilon_{н1}}{H} = \frac{2,17 \cdot 10^{-4} + 5,28 \cdot 10^{-4}}{2} = 3,73 \cdot 10^{-4} \text{ рад}. \quad (16)$$

Изгибающий момент от собственного веса балки составит:

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{50 \cdot 33^2}{8} = 6806 \text{ кНм}. \quad (17)$$

Напряжения в верхней и нижней фибрах сечения соответственно составят:

$$\sigma_2 = \pm \frac{M}{W_b} = \frac{6806}{0,6667} = \pm 10208 \text{ кН/м}^2. \quad (18)$$

Относительные деформации верхней и нижней фибр сечения соответственно составят:

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_b} = \frac{\pm 10208}{36 \cdot 10^6} = \pm 2,84 \cdot 10^{-4}. \quad (19)$$

Угол поворота φ_n составит:

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_b} = \frac{\pm 10208}{36 \cdot 10^6} = \pm 2,84 \cdot 10^{-4}. \quad (20)$$

Далее в соответствии с формулой (9) определим прогиб в середине пролета под действием собственного веса:

$$\Delta_w = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E_b \cdot I_b} = \frac{5 \cdot 50 \cdot 33^4}{384 \cdot 36 \cdot 10^6 \cdot 0,6667} = 0,032 \text{ м} = 32 \text{ мм}; \quad (21a)$$

$$\Delta_w = \left| \varphi_n \cdot \frac{5 \cdot L^2}{48} \right| = 2,84 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{5 \cdot 33^2}{48} = 0,032 \text{ м} = 32 \text{ мм}. \quad (21b)$$

Далее определим потери предварительного напряжения от усадки и ползучести на принятом временном интервале от $t_0 = 30$ суток до $t = 90$ суток в соответствии с методикой, приведенной в [14].

При вычислении потерь предварительного напряжения коэффициент ползучести определяют по формуле:

$$\varphi(t, t_0) = E_b \cdot C(t, t_0) = 36000 \cdot 1,46 \cdot 10^{-5} = 0,53, \quad (22)$$

где E_b — модуль упругости бетона в возрасте 28 суток.

Меру ползучести $C(t, t_0)$ вычисляют по формуле:

$$C(t, t_0) = C(\infty, 28) \cdot (c + d \cdot e^{-\gamma t_0}) \cdot (1 - k \cdot e^{-\gamma_1(t-t_0)}) = 3,97 \cdot 10^{-5} \cdot (0,5 + 0,625 \cdot e^{-0,008 \cdot 30}) \cdot (1 - 0,8 \cdot e^{-0,004(90-30)}) = 1,46 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}, \quad (23)$$

где $c = 0,5$ и $k = 0,8$ — эмпирические коэффициенты.

Значения $\gamma = 0,008 \text{ сут}^{-1}$, $\gamma_1 = 0,004 \text{ сут}^{-1}$ и $d = 0,625$ зависят от модуля открытой поверхности (для рассматриваемого случая $M_0 < 10 \text{ м}^{-1}$).

Предельное значение меры ползучести $C(\infty, 28)$ определяют по формуле:

$$C(\infty, 28) = C^N(\infty, 28) \cdot \xi_{1c} \cdot \xi_{2c} \cdot \xi_{3c} = 6,69 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 0,594 \cdot 1 = 3,97 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}, \quad (24)$$

где $\xi_{1c} = 1$ — коэффициент, учитывающий относительную прочность бетона и возраст в момент загрузки;

$\xi_{2c} = 0,594$ — коэффициент, учитывающий величину модуля открытой поверхности элемента (для рассматриваемого случая $M_0 = 3,0 \text{ м}^{-1}$);

$\xi_{3c} = 1$ — коэффициент, учитывающий относительную влажность окружающей среды.

Величина $C^N(\infty, 28)$ зависит от состава бетонной смеси и определяется по формуле:

$$C^N(\infty, 28) = k_c \cdot \left(\frac{W + v}{B + 4} \right) = 15,5 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{160 + 30}{40 + 4} \right) = 6,69 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}, \quad (25)$$

где $W = 160 \text{ л/м}^3$ и $v = 30 \text{ л/м}^3$ — удельное количество воды затворения и содержание вовлеченного воздуха в бетонной смеси;

$k_c = 15,5 \cdot 10^{-6}$ — безразмерный коэффициент для бетонов на крупном заполнителе;

B — класс бетона по прочности на сжатие.

Предельное значение относительных деформаций усадки $\epsilon_s(\infty, t_0)$ вычисляют по формуле:

$$\epsilon_s(\infty, t_0) = \epsilon_s^N(\infty, 7) \cdot \xi_{1s} \cdot \xi_{2s} \cdot \xi_{3s} = 3,67 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 0,412 \cdot 1 = 1,51 \cdot 10^{-4}, \quad (26)$$

где $\xi_{1s} = 1$ — коэффициент, учитывающий относительную прочность бетона и возраст в момент загрузки;

$\xi_{2s} = 0,412$ — коэффициент, учитывающий величину модуля открытой поверхности элемента (для рассматриваемого случая $M_0 = 3,0 \text{ м}^{-1}$);

$\xi_{3s} = 1$ — коэффициент, учитывающий относительную влажность окружающей среды.

Величину $\epsilon_s^N(\infty, 7)$ вычисляют по формуле:

$$\epsilon_s^N(\infty, 7) = k_s \cdot (W + v)^{1,5} = 1,4 \cdot 10^{-7} \cdot (160 + 30)^{1,5} = 3,67 \cdot 10^{-4}, \quad (27)$$

где $k_s = 1,4 \cdot 10^{-7}$ — безразмерный коэффициент для тяжелых бетонов.

Деформации усадки бетона $\epsilon_s(t, t_w)$ в момент времени t вычисляют по формуле:

$$\epsilon_s(t, t_0) = \epsilon_s(\infty, t_0) \cdot \left[1 - e^{-\alpha_s(t-t_0)} \right] = 1,51 \cdot 10^{-4} \cdot \left[1 - e^{-0,004(90-30)} \right] = 3 \cdot 22 \cdot 10^{-5}, \quad (28)$$

$\alpha_s = 0,004$ — параметр, характеризующий скорость нарастания деформаций усадки во времени и зависящий от модуля открытой поверхности (для рассматриваемого случая $M_0 < 10 \text{ м}^{-1}$).

Потери преднапряжения под действием усадки, ползучести и собственного веса вычислим по упрощенной формуле в соответствии с [15]:

$$\Delta P_n = \frac{A_s \cdot \epsilon_s(t, t_0) \cdot E_p + \alpha \cdot \varphi(t, t_0) \cdot |\sigma_c|}{1 + \alpha \cdot \frac{A_s}{A_b} \cdot \left(1 + \frac{A_b}{I_b} \cdot e^2 \right) \cdot [1 + 0,8 \cdot \varphi(t, t_0)]} = \frac{0,00855 \cdot 3,22 \cdot 10^{-5} \cdot 1,95 \cdot 10^8 + 5,417 \cdot 0,53 \cdot 8804}{1 + 5,417 \cdot \frac{0,00855}{2} \cdot \left(1 + \frac{2}{0,6667} \cdot 0,8^2 \right) \cdot [1 + 0,8 \cdot 0,53]} = \frac{269,8}{1,096} = 246,2 \text{ кН}, \quad (29)$$

где σ_c — напряжение в бетоне, прилегающем к пучкам, вызванное собственным весом и начальным предварительным напряжением.

Таким образом, потери предварительного напряжения под действием эффектов ползучести и усадки составили 2,2 %.

Усилие преднапряжения с учетом потерь составит:

$$P_{nl} = P_n - \Delta P_n = 11184 - 246,2 = 10938 \text{ кН.} \quad (30)$$

Изгибающий момент преднапряжения с учетом потерь составит:

$$M_{nl} = P_{nl} \cdot e = 10938 \cdot 0,8 = 8750 \text{ кНм.} \quad (31)$$

Определим растягивающие напряжения от преднапряжения в верхней фибре сечения:

$$\sigma_{в1} = \frac{M_{nl}}{W_b} - \frac{P_{nl}}{A_b} = \frac{8750}{0,6667} - \frac{10938}{2} = 7655 \text{ кН/м}^2. \quad (32)$$

Сжимающие напряжения от преднапряжения в нижней фибре сечения составят:

$$\sigma_{н1} = -\frac{M_{nl}}{W_b} - \frac{P_{nl}}{A_b} = -\frac{8750}{0,6667} - \frac{10938}{2} = -18593 \text{ кН/м}^2. \quad (33)$$

Найдем относительные деформации верхней фибры:

$$\varepsilon_{в1} = \frac{\sigma_{в1}}{E_b} = \frac{7655}{36 \cdot 10^6} = 2,13 \cdot 10^{-4}. \quad (34)$$

Соответственно, для нижней:

$$\varepsilon_{н1} = \frac{\sigma_{н1}}{E_b} = \frac{-18593}{36 \cdot 10^6} = -5,16 \cdot 10^{-4}. \quad (35)$$

Угол поворота φ_n составит:

$$\varphi_n = \frac{\varepsilon_{в1} - \varepsilon_{н1}}{H} = \frac{2,13 \cdot 10^{-4} + 5,16 \cdot 10^{-4}}{2} = 3,6 \cdot 10^{-4} \text{ рад.} \quad (36)$$

В соответствии с формулой (8) определим выгиб балки в середине пролета под действием предварительного напряжения:

$$\Delta_p = \frac{M_{nl} \cdot L^2}{8 \cdot E_b \cdot I_b} = \frac{8750 \cdot 33^2}{8 \cdot 36 \cdot 10^6 \cdot 0,6667} = 0,05 \text{ м} = 50 \text{ мм;} \quad (37a)$$

$$\Delta_p = \left| \varphi_n \cdot \frac{L^2}{8} \right| = 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{33^2}{8} = 0,05 \text{ м} = 50 \text{ мм.} \quad (37b)$$

Таким образом, суммарный выгиб балки с учетом нагрузки от собственного веса составит:

$$\Delta = \Delta_p - \Delta_w = 50 - 32 = 18 \text{ мм.} \quad (38)$$

Заключение

Прогнозирование долгосрочного поведения преднапряженных бетонных мостов играет ключевую роль в их проектировании и эксплуатации. Понимание причин и механизмов долгосрочных деформаций, а также использование соответствующих методов и моделей обеспечивают безопасность и долговечность транспортной инфраструктуры. Дальнейшие исследования в этой области могут улучшить методы прогнозирования и повысить эффективность проектирования преднапряженных железобетонных мостов.

Библиографический список

1. ACI Committee 209. Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete (ACI 209.2R-08). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2008. P. 249–260.
2. Al-Manaseer A., Lam J. Statistical Evaluation of Shrinkage and Creep Models // A C1 Materials journal. 2005. № 102 (3). P. 170–176.
3. Al-Omaishi N., Tadros M. K., Seguirant S. J. Elasticity, Modulus, Shrinkage, and Creep of High-

Strength Concrete as Adopted by AASHTO // PCI Journal. 2009. № 54 (3). P. 44–63.

4. Bazant Z. P. Model B4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high strength concretes with multi-decade applicability // Materials and Structures. 2015. № 48. P. 753–770.

5. Excessive Deflections of Record Span Prestressed Box Girder / Z. P. Bazant [et al.] // Concrete International. 2010. № 32 (6). P. 44–52.

6. Bazant Z. P., Yu Q., Li H. G. Excessive long-time deflections of prestressed boxgirders // II: numerical analysis and lessons learned ASCE Journal of Structural Engineering. 2012. № 138 (6). P. 687–696.

7. Effect of creep on preamber of rigid frame bridges / H. Guojing [et al.] // Cent. South Univ. Technol. 2008. № 15. P. 337–341.

8. Naaman A. E. Prestressed concrete analysis and design: fundamentals. Ann Arbor: Techno Press 3000, 2004.

9. Nawy E. G. Prestressed Concrete — A Fundamental Approach. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, Inc., 2010.

10. Tadros M. K., Fawzy F., Hanna K. E. Precast, Prestressed Girder Camber Variability // PCI Journal. 2011. № 56 (1). P. 135–154.

11. Vokunnaya S. S., Tanaji T. Construction stage analysis of segmental cantilever bridge // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCI-ET). 2017. № 8 (2). P. 373–382.

12. Колмогоров А. Г., Плевков В. С. Расчет железобетонных конструкций по российским и зарубежным нормам. Томск: Печатная мануфактура, 2009. 496 с.

13. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*. Введ. 20.05.2011. Изм. 29.12.2020. М.: Стандартинформ, 2019.

14. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1988.

15. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. European Committee for Standardization, Brussels, 2004.

Дата поступления: 18.07.24

Решение о публикации: 29.08.24

Контактная информация:

АВХИМОВИЧ Роман Александрович — АО «Институт Гипростроймост — Санкт-Петербург», руководитель группы; ФГБОУ ВО ПГУПС, кафедра «Мосты», аспирант; r.avhimovich@spb.gpsm.ru; SPIN-код: 6177-8105.

ЧИЖОВ Сергей Владимирович — ФГБОУ ВО ПГУПС, кафедра «Мосты», заведующий кафедрой / доцент, канд. техн. наук; sergchizh@yandex.ru; SPIN-код: 6419-1111

A review of long-term behavior prediction methods for prestressed concrete bridges

R. A. Avkhimovich^{1, 2}, S. V. Chizhov¹

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

² Institute Giprostroymost – St. Petersburg JSC, 7, Yablochkova St., Saint Petersburg, 197198, Russia.

For citation: Avkhimovich R. A., Chizhov S. V. A review of long-term behavior prediction methods for prestressed concrete bridges // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 729–743. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-729-743

Abstract

Purpose: to analyze the causes of long-term deformations of prestressed concrete bridge spans and the problems associated with their prediction. To provide a brief overview of existing methods for predicting the long-term behavior of prestressed concrete bridges. The relevance of the problem is due to the need to ensure the reliability and durability of these structures, which are widely used in modern bridge construction. The objective of this paper is to identify factors that influence the development of long-term deformations and to develop approaches for their accurate prediction. **Methods:** the study examines the long-term deformations of prestressed concrete bridge spans and the problems associated with their prediction using existing bridge structures as examples. Existing methods for predicting long-term deformations in prestressed concrete are evaluated. In particular, the effects of high-strength reinforcement relaxation and the effects of concrete creep and shrinkage are analyzed. **Results:** accurate prediction of long-term deformations is a complex task that requires consideration of many factors, such as prestress losses, environmental conditions, material properties, and structural characteristics of bridges. The methods discussed in this paper, including the multiplier method and the approximate time interval method, demonstrate their effectiveness in evaluating long-term deformations. However, further research is needed to improve the prediction methods and increase the efficiency of prestressed concrete bridge design. **Practical significance:** provides design engineers with specific methods and approaches for evaluating the long-term behavior of prestressed concrete bridges. Application of these methods can reduce the risk of excessive deformations and deflections, ultimately ensuring the safety and reliability of bridge structures.

Keywords: prestressed concrete, bridge, prediction of long-term concrete deformations, shrinkage, creep, prestress losses

References

1. ACI Committee 209. Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete (ACI 209.2R-08). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2008. P. 249–260.
2. Al-Manaseer A., Lam J. Statistical Evaluation of Shrinkage and Creep Models // *ACI Materials Journal*. 2005. № 102 (3). P. 170–176.
3. Al-Omaishi N., Tadros M. K., Seguirant S. J. Elasticity, Modulus, Shrinkage, and Creep of High-Strength Concrete as Adopted by AASHTO // *PCI Journal*. 2009. № 54 (3). P. 44–63.
4. Bazant Z. P. Model B4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high strength concretes with multi-decade applicability // *Materials and Structures*. 2015. № 48. P. 753–770.
5. Excessive Deflections of Record Span Prestressed Box Girder / Z. P. Bazant [et al.] // *Concrete International*. 2010. № 32(6). P. 44–52.
6. Bazant Z. P., Yu Q., Li H. G. Excessive long-time deflections of prestressed boxgirders // II: numerical analysis and lessons learned *ASCE Journal of Structural Engineering*. 2012. № 138 (6). P. 687–696.
7. Effect of creep on precamber of rigid frame bridges / H. Guojing [et al.] // *Cent. South Univ. Technol.* 2008. № 15. P. 337–341.
8. Naaman A. E. Prestressed concrete analysis and design: fundamentals. Techno Press 3000, Ann Arbor, MI, 2004.
9. Nawy E. G. Prestressed Concrete — A Fundamental Approach. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, Inc., 2010.
10. Tadros M. K., Fawzy F., Hanna K. E. Precast, Prestressed Girder Camber Variability // *PCI Journal*. 2011. № 56 (1). P. 135–154.
11. Vokunnaya S. S., Tanaji T. Construction stage analysis of segmental cantilever bridge // *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 2017. № 8 (2). P. 373–382.
12. Kolmogorov A. G., Plevkov V. S. Raschet zhelezobetonnykh konstrukcij po rossijskim i zarubezhnym normam. Tomsk: Pechatnaya manufaktura, 2009. 496 s. (In Russian)

13. SP 35.13330.2011. Mosty i truby. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.05.03–84*. Vved. 20.05.2011. Izm. 29.12.2020. M.: Standartinform, 2019. (In Russian)

14. Rekomendacii po uchetu polzuchesti i usadki betona pri raschete betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij NIIZHB Gosstroya SSSR. M.: Strojizdat, 1988. (In Russian)

15. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures // European Committee for Standardization, Brussels, 2004. (In Russian)

Received: 18.07.24

Accepted: 29.08.24

Author's information:

Roman A. AVKHIMOVICH — Team Lead, Institute Giprostroymost — St. Petersburg JSC. Russia, Saint Petersburg; Postgraduate Student, Bridges Department, PGUPS; r.avhimovich@spb.gpsm.ru; SPIN-code: 6177-8105.

Sergey V. CHIZHOV — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Bridges Department, PGUPS; sergchizh@yandex.ru; SPIN-code: 6419-1111.



УДК 533.65.013.622

Проблемы поиска и преследования беспилотных летательных аппаратов с использованием теоретико-игрового подхода

О. А. Малафеев¹, К. Чжан¹, И. В. Зайцева², А. В. Гаранин³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 190034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Российский государственный гидрометеорологический университет, Россия, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79

³ ООО «Новые технологии», Россия, 196084, Санкт-Петербург, ул. Заозёрная, д. 8, к. 2, литера А

Для цитирования: Малафеев О. А., Чжан К., Зайцева И. В., Гаранин А. В. Проблемы поиска и преследования беспилотных летательных аппаратов с использованием теоретико-игрового подхода // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 744–760. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-744-760

Аннотация

Цель: оптимизация эффективности стратегий обнаружения и захвата четырехроторных беспилотных летательных аппаратов (квадрокоптеров). **Методы:** математическое моделирование, аппарат теории игр, венгерский метод решения задачи о назначениях, теория принятия решений, принцип динамического программирования, пакет Maple для решения примеров. **Результаты:** для выполнения условий решения задачи об оптимальных назначениях необходимо и достаточно, чтобы она была сбалансирована. Данную задачу о назначениях можно сбалансировать, введя необходимое количество фиктивных катеров или убегающих. После этого можно сформулировать и решить двойственную задачу об оптимальных назначениях. Полученную игру можно решить любым методом решения матричных игр. Таким образом можно определить политику преследования и поиска между беспилотными летательными аппаратами. **Практическая значимость:** все ускользнувшие квадрокоптерные БПЛА могут быть преследованы и успешно перехвачены с использованием разработанных моделей. Приведены примеры исследования математических моделей с помощью программного пакета Maple.

Ключевые слова: теория игр, квадрокоптер, модель, кооперативная теория игр, Simulink MPC-моделирование

Материалы и методы

Рассмотрим следующую ситуацию. Дозорное судно обнаруживает неизвестный подводный объект, который тут же скрывается в неизвестном направлении. Необходимо перехватить объект за минимально возможное время. Предположим, что дозорное судно не знает точно скорость объекта. Од-

нако известен дискретный набор скоростей, одна из которых является действительной скоростью скрывающегося. Далее дозорное судно будем называть преследователем, а неизвестный объект — убегающим и обозначать соответственно P и E .

Представим сначала алгоритм для нахождения времени поиска в условиях, когда

преследователю достоверно неизвестна скорость убегающего [8–10]. Предположим, что скорость преследователя намного больше скорости убегающего. В первоначальный момент времени обнаружения преследователь точно определяет местоположение убегающего. Таким образом, преследователю известно расстояние между ним и убегающим. Обозначим его через D_0 . Для нахождения времени поимки необходимо определить траекторию, по которой должен двигаться преследователь. Введем полярную систему координат ρ и φ таким образом, чтобы полюс, точка O , находился в точке обнаружения убегающего, а полярная ось проходила через точку, в которой находился преследователь. Тогда динамика убегающего описывается уравнениями:

$$\begin{aligned}\dot{\rho}^E &= v, \\ \dot{\varphi}^E &= 0.\end{aligned}$$

Преследователю точно неизвестна скорость, однако известно, что она выбирается из дискретного множества V^E . Максимально возможную скорость преследователя обозначим через V^P . Преследователь может гарантировать поимку, перебрав все элементы множества V^E . Первоначально преследователь делает предположение, что убегающий имеет скорость $v_1 \in V^E$. Для поимки убегающего в момент t_0 преследователь начинает движение со скоростью V^P в направлении на точку O и движется так до момента t_1 , в который игроки оказываются на одинаковом расстоянии от точки O , т. е. чтобы выполнялось равенство

$$\begin{aligned}\text{и} \quad \rho_1^P &= \rho_1^E \\ \int_{t_0}^{t_1} v_1 dt + V^P (t_1 - t_0) &= D_0.\end{aligned}$$

С момента t_1 преследователь должен двигаться, выбирая скорость так, чтобы постоянно находиться на таком же расстоянии от точки O , что и убегающий. Для этого скорость преследователя раскладывается на две составляющие: радиальную V_ρ и тангенциальную V_φ . Радиальная составляющая — скорость, с которой преследователь отдаляется от полюса, т. е.

$$V_\rho = \dot{\rho}.$$

Тангенциальная составляющая представляет собой линейную скорость вращения относительно полюса, т. е.

$$V_\varphi = \dot{\varphi}\rho.$$

Для того чтобы встреча произошла, радиальная составляющая скорости преследователя полагается равной скорости убегающего. Тогда для нахождения траектории преследователя необходимо решить систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{\rho} &= v_1, \\ \dot{\varphi}^2 \rho^2 &= (V^P)^2 - (v_1)^2.\end{aligned}$$

Начальными условиями для этой системы будут:

$$\begin{aligned}\varphi(t^*) &= 0, \\ \rho(t_1) &= v_1 t_1.\end{aligned}$$

Решая ее, находим:

$$\varphi(t) = \frac{\sqrt{(V^P)^2 - (v_1)^2}}{v_1} \ln \frac{v_1 t}{v_1 t_1},$$

$$\rho(t) = v_1 t.$$

Выразим время как функцию полярного угла:

$$t(\varphi) = t_1 \exp \left(\frac{v_1 \varphi}{\sqrt{(V^P)^2 - (v_1)^2}} \right).$$

Таким образом, траектория состоит из прямолинейных участков и участков логарифмической спирали. В [2] доказано, что при движении по спирали встреча произойдет за время, не превышающее времени прохождения одного витка. Тогда, если преследователь, обойдя виток спирали, не находит убегающего, значит, первоначальное предположение о скорости убегающего было неверным. Далее выбирается следующая скорость $v_2 \in V^E$. Значит, убегающий за время t_2 прошел расстояние $\rho_E(t_2) = v_2 t_2$, а преследователь $\rho_P(t_2) = v_1 t_2$. Если $\rho_P(t_2) > \rho_E(t_2)$, тогда расстояние между игроками будет равно $D_2 = \rho_P(t_2) - \rho_E(t_2)$, и для нахождения момента времени t_3 необходимо решить уравнение

$$\int_{t_2}^{t_3} v_2 dt + V^P (t_3 - t_2) = D_2.$$

Если $\rho_P(t_2) < \rho_E(t_2)$, значит, расстояние между игроками будет равно $D_2 = \rho_E(t_2) - \rho_P(t_2)$, и для нахождения момента времени t_3 необходимо решить уравнение

$$V^P (t_3 - t_2) - \int_{t_2}^{t_3} v_2 dt = D_2.$$

После движения по прямолинейному участку преследователь движется по спирали. Преследователю для уменьшения времени целесообразно упорядочить перебор скоростей по убыванию. Однако если это становится известно убегающему, он может двигаться с минимальной скоростью, что позволит максимизировать время поиска.

Таким образом, получается следующая игра. Множество стратегий убегающего — это множество комбинаций возможных скоростей его движения и направлений движения α . Множество стратегий преследователя — это множество всевозможных

перестановок элементов V^E . Матрица полученной игры состоит из элементов T , которые являются временем поимки [11–13].

Теперь предположим, что преследователь должен обнаружить n убегающих, для поимки каждого из которых требуется τ_{ij} часов. Для реализации перехвата имеется m катеров, каждый из которых направляется за убегающим. Известна матрица $A = \{\tau_{ij}\}$ — матрица эффективности выполнения поиска i -м катером j -го убегающего. Требуется построить такой план назначений $X = \{x_{ij}\}$, $i = 1..m, j = 1..n$, который минимизирует время поиска, при этом каждый катер назначают искать не более чем одного убегающего и каждого убегающего может искать не более чем один катер. Величины x_{ij} могут принимать только два значения:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{assigned } i \text{ boat for } j \text{ escaping} \\ 0, & \text{assigned } i \text{ boat for } j \text{ escaping} \end{cases}$$

Математическая формулировка задачи об оптимальных назначениях:

$$\begin{aligned} \min z &= \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \tau_{ij} \cdot x_{ij}; \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} &\leq 1, j = 1..n; \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} &\leq 1, i = 1..m; \\ x_{ij} &\geq 0. \end{aligned}$$

Для того чтобы задача об оптимальных назначениях имела оптимальное решение, необходимо и достаточно, чтобы количество катеров было равно количеству убегающих, т. е. $n = m$. При этом условия ограничения неравенства превращаются в равенства:

$$\begin{aligned} \min z = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tau_{ij} \cdot x_{ij}; \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = 1..n; \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1..n; \\ x_{ij} \geq 0. \end{aligned}$$

Если $n \neq m$, то задача о назначениях несбалансирована. Любую задачу о назначениях можно сбалансировать, введя необходимое количество фиктивных катеров или убегающих. Двойственная задача об оптимальных назначениях будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \max \omega = \max \left(\sum_{i=1}^n i + \sum_{i=1}^n i \right), \\ i + i \geq \tau_{ij}, i = 1..n, j = 1..n. \end{aligned}$$

Рассмотрим венгерский метод решения задачи о назначениях [14–20]

1. В исходной матрице A производительностей определим в каждой строке минимальный элемент и вычтем его из всех других элементов строки.

2. В матрице, полученной на первом этапе, найдем в каждом столбце минимальный элемент и вычтем его из всех других элементов столбца. Если после выполнения п. 1 и п. 2 не получено допустимое решение, необходимо выполнить:

а) в последней матрице проводится минимальное число горизонтальных и вертикальных прямых по строкам и столбцам, чтобы вычеркнуть все нулевые элементы;

б) находится минимальный невычеркнутый элемент, вычитается из всех остальных невычеркнутых элементов и прибавляется ко всем элементам, стоящим на пересечении проведенных в предыдущем пункте прямых;

с) если новое распределение нулевых элементов не позволяет построить допусти-

мое решение, повторяем п. 2, а в противном случае, переходим к п. 3.

3. Оптимальным назначениям будут соответствовать нулевые элементы, полученные в п. 2.

Рассмотрим еще один случай [21–25]. Предположим, что преследователь отправляет n катеров за одним убегающим. Убегающий имеет дискретный набор скоростей и направлений движений, и ему необходимо выбрать, как действовать, чтобы максимально увеличить время поимки. Другими словами, убегающий должен выбрать наилучший вариант действий или лучшую стратегию поведения. Воспользуемся теорией принятия решений. Каждый катер последовательно в случайном порядке пытается перехватить убегающего. Следовательно, имеем n шагов. Пусть находимся на шаге t . Необходимо определить вероятность победы в случае выбора стратегии t при условии, что она лучше всех предыдущих, т. е. вероятность, что она вообще лучше всех. Обозначим эту вероятность через g_t . Кроме того, определим вероятность, что последняя стратегия будет самой лучшей при условии, что пропускаем первые t стратегий и далее убегающий пользуется оптимальной стратегией. Эту вероятность обозначим через h_t . По принципу динамического программирования убегающий знает, как действовать оптимально, начиная с шага $t+1$. Оптимальная стратегия поведения: если на шаге t стратегия не лучше всех предыдущих, то ее нужно отвергнуть; если же она действительно лучше среди первых t , то необходимо сравнить g_t и h_t . Если $g_t \geq h_t$, то убегающий выбирает стратегию t ; если $g_t < h_t$, то переходим к следующей. Посчитаем g_t . Начнем с конца, т. е. $g_n, g_{n-1} \dots$. Если на шаге n стратегия оказалась лучше всех предыдущих, то вероятность $g_n = 1$. Рассмотрим

шаг $n - 1$. Эта стратегия лучше всех предыдущих. Вероятность проигрыша в случае, если убегающий выберет ее, будет вероятностью того, что последний лучше всех.

По условию стратегии упорядочены по возрастанию качества и равновероятно разбросаны по списку. Тогда вероятность самой лучшей стратегии оказаться на n -месте равна $1/n$. Следовательно, вероятность победы $g_{n-1} = 1 - \frac{1}{n} = \frac{n-1}{n}$. Найдем g_{n-2} . Пусть $n-2$ -стратегия оказалось лучшей среди всех предыдущих. Посчитаем вероятность того, что она действительно лучше всех, т. е. вероятность того, что ни n -стратегия, ни $n-1$ -стратегия не являются самыми лучшими. Вероятность $n-1$ -стратегии оказаться лучше $n-2$ -стратегии равна $\frac{1}{n-1}$. Вероятность, что $n-1$ -стратегия будет не лучше $n-2$ -стратегии, равна $1 - \frac{1}{n-1} = \frac{n-2}{n-1}$. Далее посчитаем условные вероятности победы.

Если $n-1$ -стратегия лучше $n-2$ -стратегии, то $n-1$ -стратегия — точно не самая лучшая среди всех n стратегий, т. е. вероятность победы равна 0. Если $n-1$ -стратегия хуже $n-2$ -стратегии, то тогда $n-2$ -стратегия является лучшей среди первых $n-1$ стратегий. Вероятность победить в этом случае равна $\frac{n-1}{n}$, т. е. g_{n-1} . Таким образом, $g_{n-2} = \frac{1}{n-1} \cdot 0 + \frac{n-2}{n-1} \cdot g_{n-1} = \frac{n-2}{n}$, а методом математической индукции можно доказать, что $g_t = \frac{t}{n}$ [2].

Найдём h_t . Это вероятность выбрать в конце концов самую лучшую стратегию, если дойти до шага t , пропустить эту стратегию, а дальше действовать по оптимальной стратегии. Таким образом, это вероятность победить, действуя оптимально, начиная с $t+1$ шага. По определению h_t для любой

стратегии поведения, при которой убегающий может делать свой выбор только с шага $t+1$, вероятность успеха не превосходит h_t в случае действия в соответствии с этой стратегией поведения. То есть для любого t $h_t \geq h_{t+1}$. Чем раньше действовать оптимально, тем больше вероятность победить.

Следовательно, h_t — монотонно невозрастающая функция. По выбранной стратегии поведения, если на шаге t вероятность $h_t > g_t$, то продолжаем перебор. Если $h_t \leq g_t$, то убегающий останавливается в случае, когда текущая стратегия лучше всех предыдущих, и продолжает перебор в противном случае. Пусть T — точка пересечения графиков, а t_1 — последнее целое число перед T . Очевидно, что $h_n = 0$. h_{n-1} — вероятность того, что E выберет лучшую стратегию, если пропустит $n - 1$. Это может произойти, только если последняя окажется лучше всех. Вероятность такого события равна $\frac{1}{n}$. Найдем h_{n-2} . Пусть убегающий пропустил стратегию $n-2$ и дальше действует оптимально. Тогда возможны два случая: $n-1$ является лучшей среди первых n -стратегий (вероятность этого равна $\frac{1}{n-1}$) и $n-1$ стратегия не является лучшей (вероятность равна $\frac{n-2}{n-1}$). Из первого случая следует, что убегающий выбирает n -стратегию, что соответствует оптимальному поведению. Вероятность победы в этом случае $g_{n-1} = \frac{n-1}{n}$. Из второго случая следует, что E пропускает n -стратегию. Тогда шансы на победу $h_{n-1} = \frac{1}{n}$, значит

$$h_{n-2} = \frac{1}{n-1} \cdot \frac{n-1}{n} + \frac{n-2}{n-1} \cdot \frac{1}{n} = \frac{(n-2) + (n-1)}{n \cdot (n-1)}.$$

Продолжая рассуждать аналогичным образом, получим [3]

$$h_t = \frac{t}{n} \left(\frac{1}{t} + \frac{1}{t+1} + \dots + \frac{1}{n-1} \right).$$

Проанализируем выражение $\frac{h_t}{g_t}$ для $t \geq t_1$:

$$\frac{h_t}{g_t} = \frac{1}{t} + \frac{1}{t+1} + \dots + \frac{1}{n-1}.$$

В [3] найдено число, которое соответствует точке пересечения на графике, равно $t = \frac{n}{e}$.

При этом $h_t = g_t = \frac{t}{n} = \frac{1}{e}$, т. е. вероятность успеха при $n \rightarrow \infty$ равна $\frac{1}{e} = 0,368$.

С помощью программного пакета Maple было решено несколько примеров [26–31].

Результаты исследования и обсуждение результатов

Пример 1. Пусть первоначальное расстояние между преследователем и убегающим было 200 км. Убегающий выбирает скорость из множества $V^E = \{8, 56, 78\}$, а направление — из множества $\alpha = \{23, 137, 182\}$. Максимальная скорость преследователя $V^P = 100$ км/ч. Тогда множество стратегий убегающего:

$$(\alpha_1, v_1), (\alpha_1, v_2), (\alpha_1, v_3), (\alpha_2, v_1), (\alpha_2, v_2),$$

$$(\alpha_2, v_3), (\alpha_3, v_1), (\alpha_3, v_2),$$

а множество стратегий преследователя:

$$(v_1, v_2, v_3), (v_1, v_3, v_2), (v_2, v_1, v_3), (v_2, v_3, v_1),$$

$$(v_3, v_1, v_2), (v_3, v_2, v_1).$$

Матрица полученной игры выглядит следующим образом (см. ниже).

Игру можно решить любым методом решения матричных игр. Предположим, что расстояние между убегающим БПЛА и поверхностью земли составляет 100 м. Убегающий БПЛА выбирает свою скорость из набора $V^E = \{8, 56, 78\}$ в качестве компоненты скорости по оси X и выбирает значение из набора $\alpha = \{23, 37, 82\}$ в качестве направления по оси Y. Максимальная скорость преследователя (другого БПЛА) обозначена как $V^P = 120$ м/мин:

$$(\alpha_1, v_1), (\alpha_1, v_2), (\alpha_1, v_3), (\alpha_2, v_1), (\alpha_2, v_2),$$

$$(\alpha_2, v_3), (\alpha_3, v_1), (\alpha_3, v_2).$$

На рис. 1 представлены девять стратегий моделирования убегающего беспилотного летательного аппарата.

11,7	11,7	819,8	$4,71 \cdot 10^6$	29547	$2,07 \cdot 10^6$
$3,62 \cdot 10^7$	$2,08 \cdot 10^{11}$	$7,24 \cdot 10^6$	$7,24 \cdot 10^6$	$9,12 \cdot 10^{10}$	$1,82 \cdot 10^{10}$
$2,53 \cdot 10^{15}$	$3,62 \cdot 10^{13}$	$2,53 \cdot 10^{15}$	$5,06 \cdot 10^{14}$	$3,17 \cdot 10^{12}$	$3,17 \cdot 10^{12}$
$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$7,71 \cdot 10^6$	$4,43 \cdot 10^{10}$	$2,78 \cdot 10^8$	$1,94 \cdot 10^{10}$
$1,06 \cdot 10^{41}$	$6,07 \cdot 10^{44}$	$2,11 \cdot 10^{40}$	$2,11 \cdot 10^{40}$	$2,66 \cdot 10^{44}$	$5,32 \cdot 10^{43}$
$1,3 \cdot 10^{77}$	$1,86 \cdot 10^{75}$	$1,3 \cdot 10^{77}$	$2,6 \cdot 10^{76}$	$1,63 \cdot 10^{74}$	$1,63 \cdot 10^{74}$
$4,09 \cdot 10^6$	$4,09 \cdot 10^6$	$2,86 \cdot 10^8$	$1,64 \cdot 10^{12}$	10^{10}	$7,19 \cdot 10^{11}$
$1,71 \cdot 10^{54}$	$9,84 \cdot 10^{57}$	$3,42 \cdot 10^{53}$	$3,42 \cdot 10^{53}$	$4,31 \cdot 10^{57}$	$8,62 \cdot 10^{56}$
$2,98 \cdot 10^{101}$	$4,26 \cdot 10^{99}$	$2,97 \cdot 10^{101}$	$5,95 \cdot 10^{100}$	$3,73 \cdot 10^{98}$	$3,73 \cdot 10^{98}$

Матрица для примера 1

Таким образом, оптимальной будет стратегия, изображенная на последнем рисунке.

Пример 2. Пусть преследователь обнаружил четырех убегающих. Первоначальное расстояние до каждого из них соответственно 100 км, 200 км, 50 км и 163 км. Преследователь имеет четыре катера для поимки убегающих. Максимальная скорость каждого катера соответственно 74 км/ч, 90 км/ч, 178 км/ч и 124 км/ч. Первый убегающий движется по прямой $\alpha_1 = 23$ со скоростью $v_1 = 23$ км/ч, второй — $\alpha_2 = 137$, $v_2 = 50$ км/ч,

третий — $\alpha_3 = 187$, $v_3 = 67$ км/ч, четвертый — $\alpha_4 = 50$, $v_4 = 70$ км/ч.

Тогда матрица для задачи о назначениях выглядит следующим образом:

1903	386	9,96	52
$1,15 \cdot 10^{71}$	$6,4 \cdot 10^{51}$	$1,3 \cdot 10^{34}$	$1,89 \cdot 10^{26}$
$5,6 \cdot 10^{172}$	$1,13 \cdot 10^{90}$	$2 \cdot 10^{32}$	$3,7 \cdot 10^{51}$
$2,4 \cdot 10^{63}$	$7,56 \cdot 10^{26}$	$1,28 \cdot 10^9$	$5,96 \cdot 10^{14}$

Решить игру можно венгерским методом. Определим политику преследования и поиска

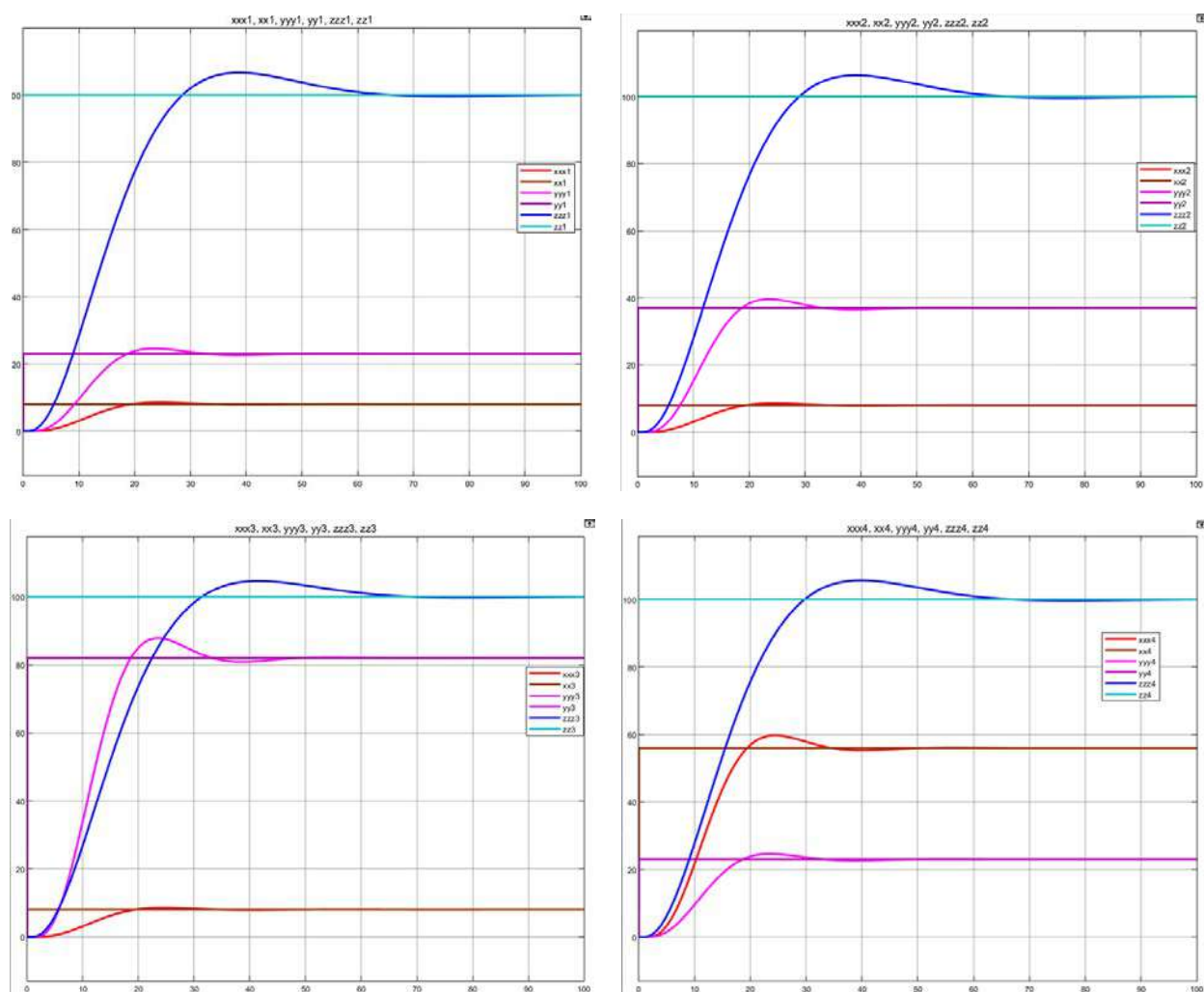


Рис. 1. Стратегии моделирования убегающего БПЛА (начало)

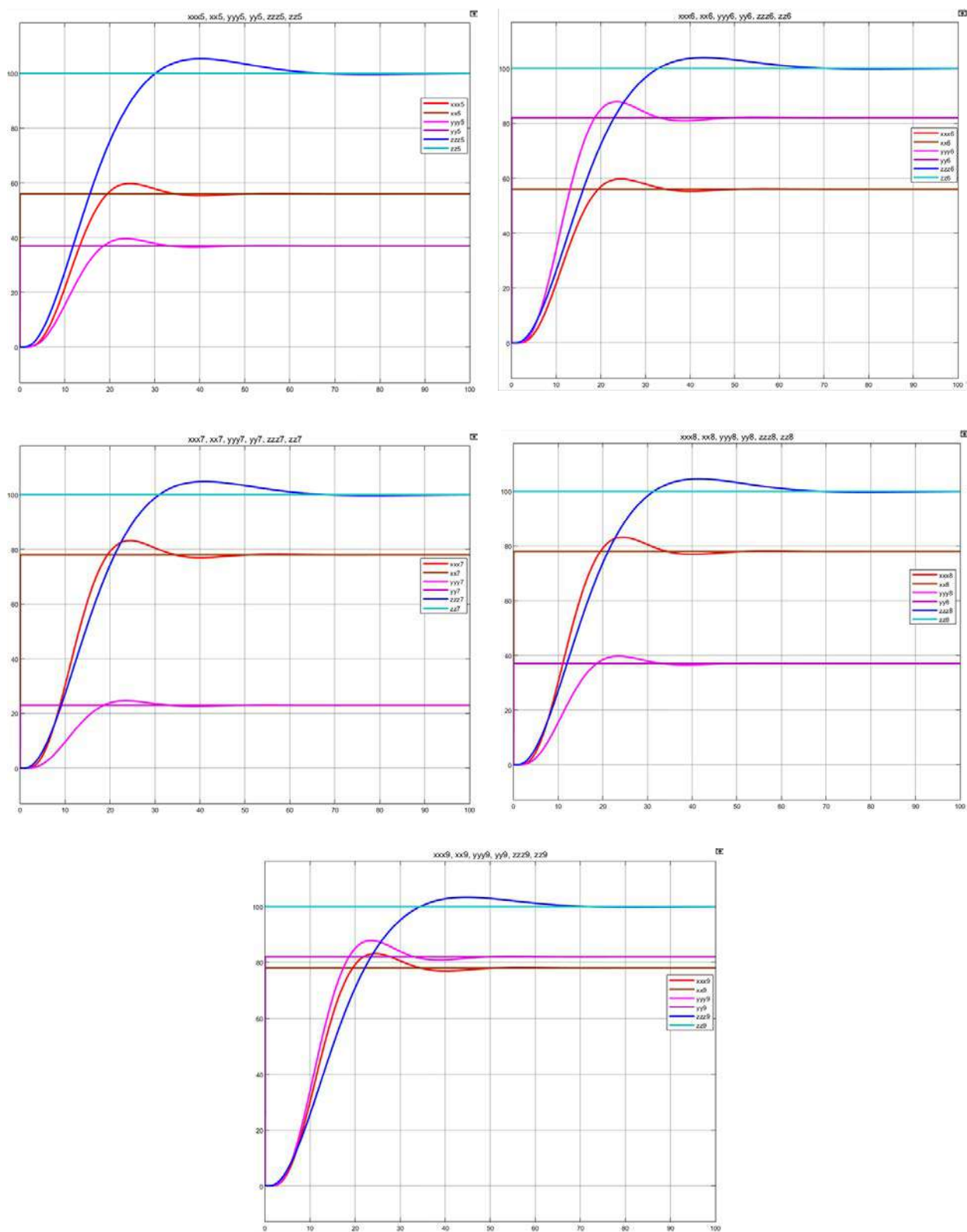


Рис. 1. Стратегии моделирования убегающего БПЛА (окончание)

между беспилотными летательными аппаратами. Допустим, что перехватывающий квадрокоптер сталкивается с четырьмя вторгшимися квадрокоптерами, которые представляют угрозу. У оператора есть четыре преследователя, предназначенных для преследования убегающего. Максимальная скорость каждого преследователя по осям XYZ составляет 74 км/ч, 90 км/ч, 178 км/ч и 124 км/ч соответственно.

Рассмотрим характеристики каждого вторгшегося квадрокоптера.

Первый квадрокоптер БПЛА вторжения:

— максимальная скорость по оси X:

23 м/мин;

— максимальная скорость по оси Y:

23 м/мин.

Высота: 100 м.

Второй квадрокоптер БПЛА вторжения:

— максимальная скорость по оси X:

50 м/мин;

— максимальная скорость по оси Y:

137 м/мин.

Высота: 200 м.

Третий вторгающийся квадрокоптер БПЛА:

— максимальная скорость по оси X:

67 м/мин;

— максимальная скорость по оси Y:

7 м/мин.

Высота: 50 м.

Четвертый квадрокоптер БПЛА вторжения:

— максимальная скорость по оси X:

70 м/мин;

— максимальная скорость по оси Y:

50 м/мин.

Высота: 163 м.

Учитывая максимальные скорости и высоты каждого вторгшегося квадрокоптера, матрица соответствия будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

На рис. 2 представлены изменения значений осей X, Y и Z дронов-преследователей и вторгающихся квадрокоптеров.

Таким образом, на последнем рисунке изображена оптимальная стратегия.

Пример 3. Пусть первоначальное расстояние между преследователем и убегающим было 50 км. Убегающий выбирает скорость из множества $V^E = \{4, 10, 16\}$, а направление — из множества $\alpha = \{8, 10, 16\}$. Максимальная скорость преследователя $V^P = 80$ км/ч. Тогда множество стратегий убегающего:

$$(\alpha_1, v_1), (\alpha_1, v_2), (\alpha_1, v_3), (\alpha_2, v_1), (\alpha_2, v_2), \\ (\alpha_2, v_3), (\alpha_3, v_1), (\alpha_3, v_2),$$

а множество стратегий преследователя:

$$(v_1, v_2, v_3), (v_1, v_3, v_2), (v_2, v_1, v_3), (v_2, v_3, v_1), \\ (v_3, v_1, v_2), (v_3, v_2, v_1).$$

Матрица полученной игры выглядит следующим образом:

0,73	0,73	1,6	6,75	2,6	5,79
1,5	6,2	0,92	0,92	5,28	3,32
4,83	2,19	4,83	3,03	1,18	1,18
0,98	0,98	2,17	9,12	3,54	7,81
3,12	13,1	1,96	1,96	11,2	7,06
16,45	7,45	16,45	10,3	4,01	4,01
1,33	1,33	2,93	12,3	4,78	10,56
6,64	27,95	4,17	4,17	23,96	15,04
55,99	25,37	55,99	35,14	13,65	13,65

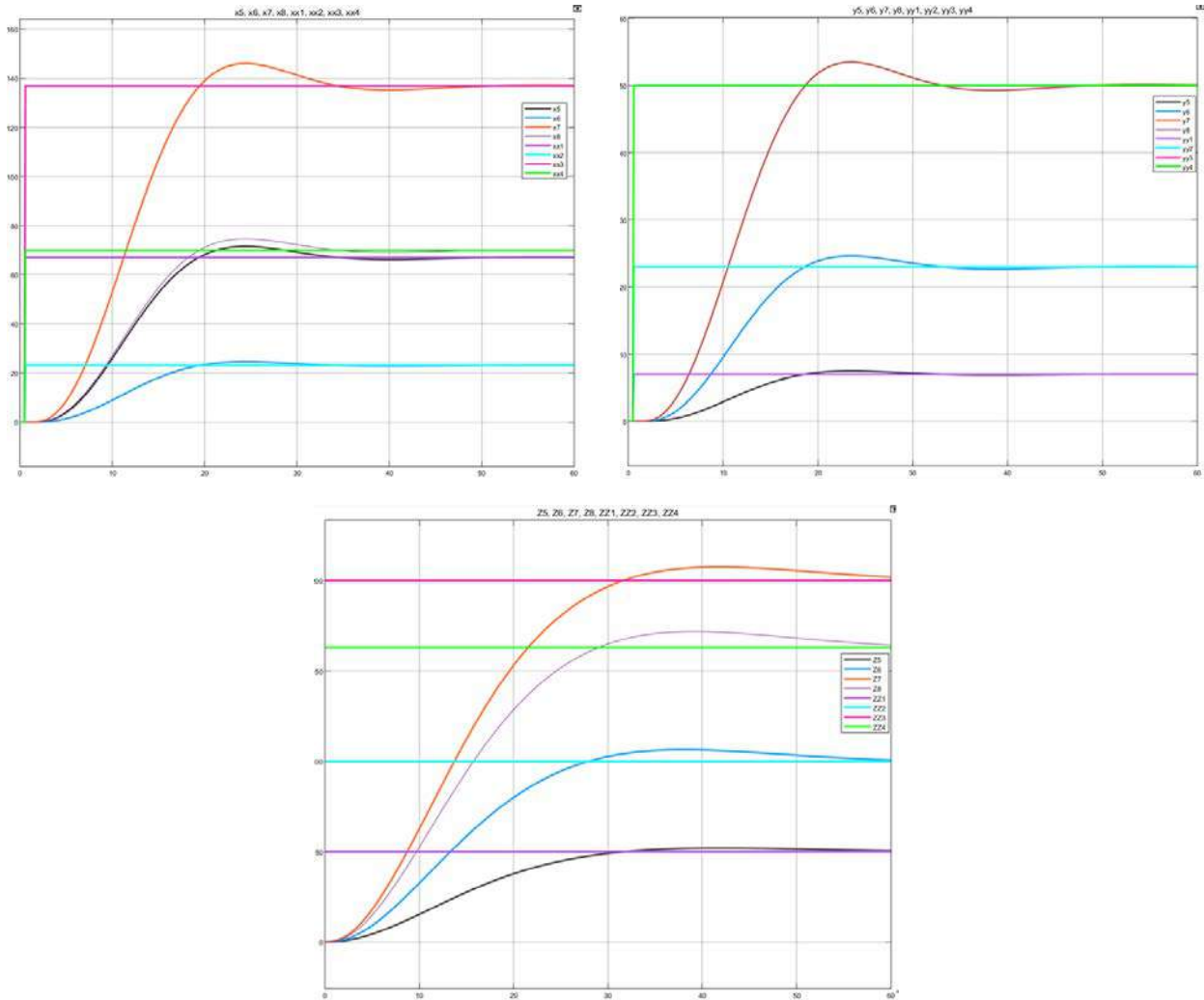


Рис. 2. Изменения значений осей X, Y и Z дронов-преследователей и вторгающихся квадрокоптеров

Чтобы смоделировать данную матричную игру между преследователем и убегаящим, можно представить ее в виде матрицы выигрышей, где строки представляют стратегии преследователя, а столбцы — стратегии убегаящего. Каждая ячейка матрицы будет содержать выигрыш преследователя в зависимости от выбранных стратегий обеих сторон.

Политику преследования и поиска между беспилотными летательными аппаратами

можно определить следующим образом. Обозначим V^E как множество скоростей убегаящего БПЛА по оси X, α — как множество направлений по оси Y, V^P — как максимальную скорость преследователя:

$$(\alpha_1, v_1), (\alpha_1, v_2), (\alpha_1, v_3), (\alpha_2, v_1), (\alpha_2, v_2), (\alpha_2, v_3), (\alpha_3, v_1), (\alpha_3, v_2).$$

На рис. 3 представлены девять стратегий моделирования убегаящего дрона.

Таким образом, отчетливо видно, что на последнем рисунке изображена оптимальная стратегия.

Пример 4. Пусть преследователь обнаружил четырех убегающих. Первоначальное расстояние до каждого из них соответственно 30 км, 11 км, 62 км и 8 км. Преследователь имеет четыре катера для поимки убегающих. Максимальная скорость каждого катера соответственно 60 км/ч, 65 км/ч, 95 км/ч и 105 км/ч. Первый убегающий движется по

прямой $\alpha_1 = 7$ со скоростью $v_1 = 7$ км/ч, второй — $\alpha_2 = 11$ и $v_2 = 11$ км/ч, третий — $\alpha_3 = 30$ и $v_3 = 30$ км/ч, четвертый — $\alpha_4 = 44$ и $v_4 = 44$ км/ч. Тогда матрица для задачи о назначениях выглядит следующим образом:

1,02	0,89	0,49	0,43
1,2	0,96	0,37	0,3
$2,3 \cdot 10^7$	$3,9 \cdot 10^6$	10758	3519,7
$3,14 \cdot 10^{19}$	$2,75 \cdot 10^{16}$	$5,6 \cdot 10^8$	$3,54 \cdot 10^7$

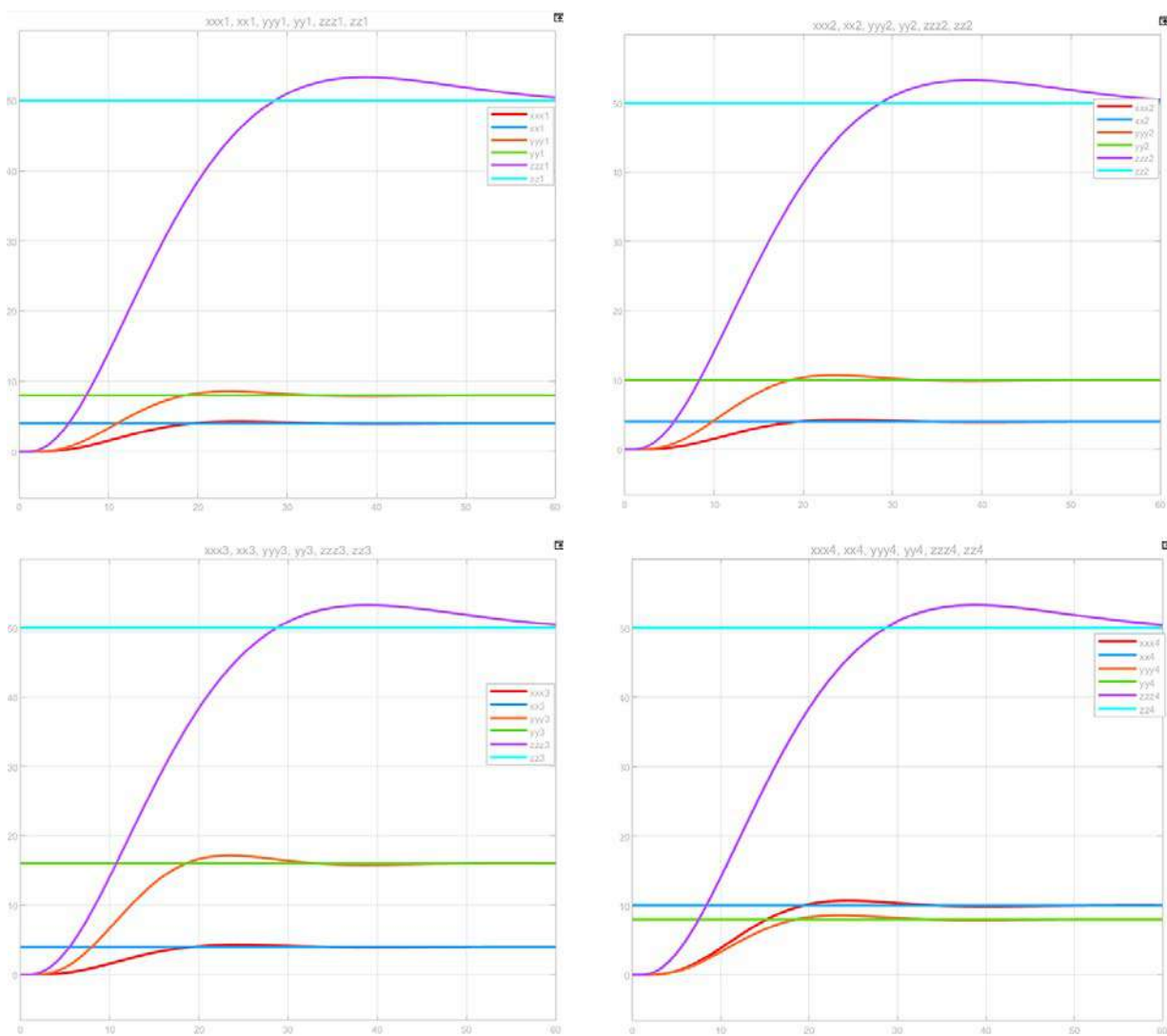


Рис. 3. Девять стратегий моделирования убегающего дрона (начало)

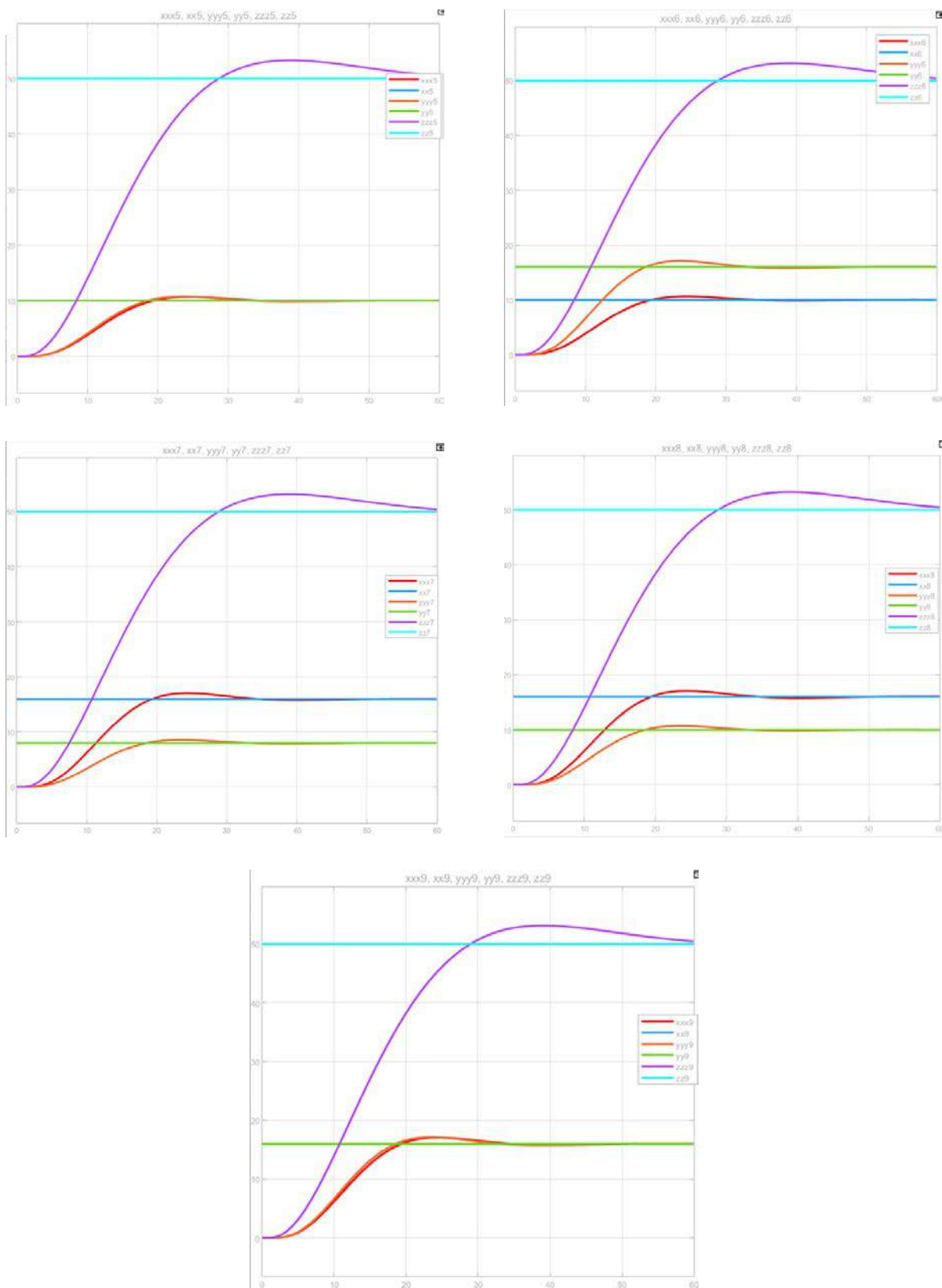


Рис. 3. Девять стратегий моделирования убагающего дрона (окончание)

Игру можно решить венгерским методом. Преобразуем этот пример в задачу преследования дрона-квадрокоптера. Предположим, перехватывающий квадрокоптер обнаруживает четыре вторгшихся квадрокоптера. Есть четыре преследователя, которые преследуют убегающего. Максимальная скорость каждого преследователя по оси XYZ составляет 31 м/мин, 12 м/мин, 63 м/мин и 9 м/мин соответственно.

Первый квадрокоптер БПЛА вторжения имеет максимальную скорость по оси X $v_{13} = 7$ м/мин, максимальную скорость по оси Y $\alpha_1 = 7$ м/мин, высота 30 м.

Второй квадрокоптер БПЛА вторжения имеет максимальную скорость по оси X

$v_{23} = 11$ м/мин, максимальную скорость по оси Y $\alpha_2 = 11$ м/мин, высота 11 м.

Третий вторгающийся квадрокоптер БПЛА имеет максимальную скорость по оси X $v_3 = 30$ м/мин, максимальную скорость по оси Y $\alpha_3 = 30$ м/мин, высота 62 м.

Четвертый квадрокоптер вторжения БПЛА имеет максимальную скорость по оси X $v_{34} = 44$ м/мин, максимальную скорость по оси Y $\alpha_4 = 44$ м/мин, высота 44 м.

На рис. 4 изображены изменения значений осей X, Y и Z дронов-преследователей и убегающих квадрокоптеров.

Таким образом, с помощью моделирования получена оптимальная стратегия, изображенная на последнем рисунке.

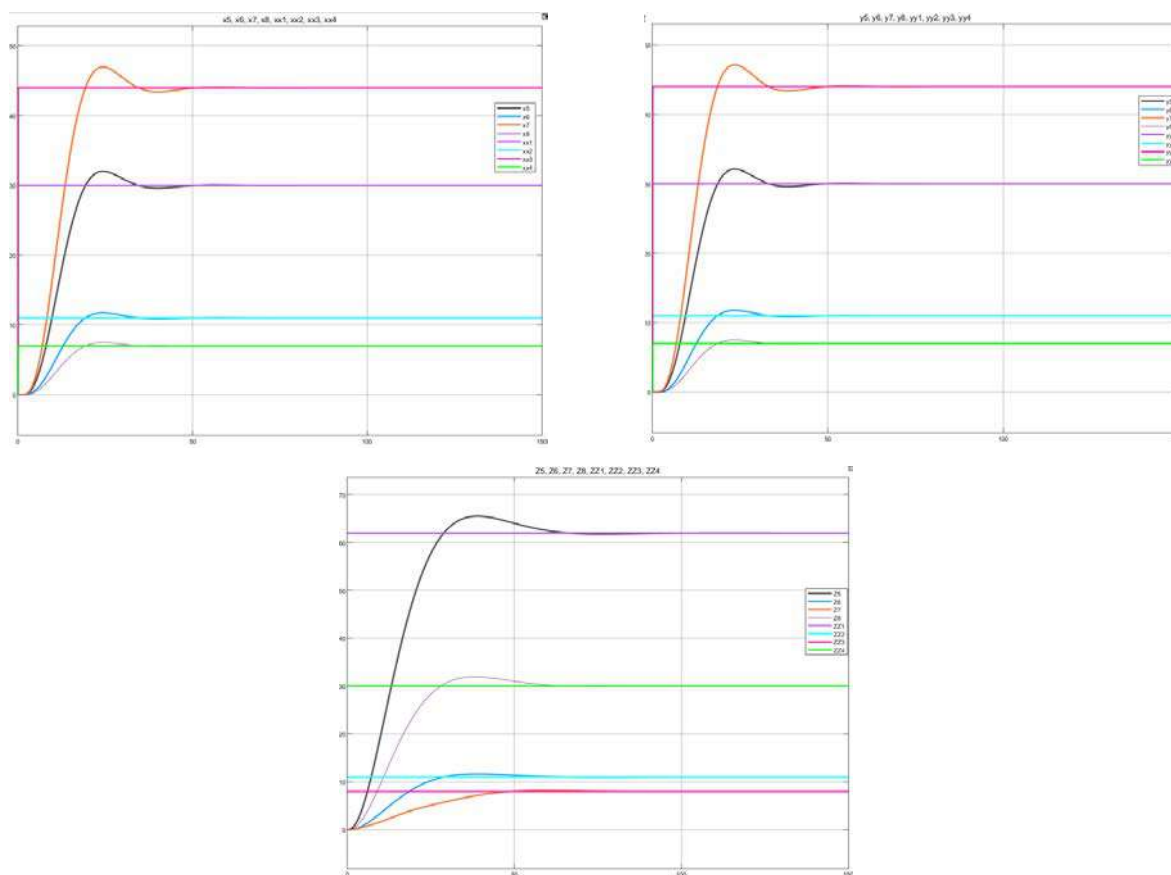


Рис. 4. Изменения значений осей X, Y и Z дронов-преследователей и убегающих квадрокоптеров

Заключение

Таким образом, разработаны динамические модели проведения инспекций, которые позволяют анализировать поиск и прогнозировать местонахождение в естественных условиях беспилотных летательных аппаратов, составлен алгоритм для нахождения времени поиска в условиях неопределенности. С помощью моделей при разумных параметрах преследования БПЛА с учетом вероятности успеха и эффективности перехвата, после расчета всех параметров движения БПЛА с использованием венгерского алгоритма, все ускользнувшие квадрокоптерные БПЛА могут быть преследованы и успешно перехвачены. При этом учитываются основные параметры, такие как скорость каждого перехватчика и совместимость между квадрокоптерами в лагере БПЛА-перехватчиков и БПЛА-убегающих. Математические динамические модели можно исследовать с помощью программного пакета Maple.

Библиографический список

1. Koopman B. O. Search and screening // Operation evolution group office of the chief of naval operations. Report № 56. Washington, 1946.
2. Хеллман О. Введение в теорию оптимального поиска / пер. с англ. Е. М. Столяровой. М.: Наука, 1985. 246 с.
3. Абчук В. А., Суздаль В. Г. Поиск объектов. М.: Советское радио, 1977. 336 с.
4. Староверов О. В. Об одной задаче поиска // Теория вероятностей и ее применение. 1963. Т. 8, № 2. С. 196–201.
5. Kelin M. Note a sequential search // Naval research Logistic Quarterly. 1968. Vol. 15, № 3.
6. Koopman B. O. Theory of search: I. Kinematic bases // Operations Reseach. 1956. Vol. 4, № 3.
7. Koopman B. O. Theory of search: III. The optimum distribution of searching efforts // Operations Research. 1957. Vol. 5, № 5.
8. Алферов Г. В., Малафеев О. А., Мальцева А. С. Теоретико-игровые модели поиска подвижного объекта при инспектировании // Проблемы механики и управления: нелинейные динамические системы, 2014. С. 11–19.
9. Алферов Г. В., Малафеев О. А., Мальцева А. С. Модель проведения антикоррупционных инспекций // Управление социально-экономическим развитием регионов: проблемы и пути их решения: сборник научных статей 4-й Международной научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2014. С. 20–24.
10. Malafeyev O., Kun Zhang. Problems of search and pursuit of unmanned aerial vehicles using the game-theoretic approach. Arxiv: 2305.19832.
11. Лапшин В. П. Кинематические основы теории поиска // Морской сборник. 1962. № 8.
12. Charnes A., Cooper W. Theory of search: optimal distribution of search effort // Management Science. 1958. Vol. 5, № 1.
13. MacQueen J., Miller R. G. Optimal persistence polices // Operations Research. 1960. Vol. 8, № 3.
14. Posner E. C. Optimal search procedures // IEEE Transactions of Information Theory. 1963. Vol. 9, № 3.
15. Дубровин К. О., Сиротин П. А. Время пребывания цели в районе поиска // Морской сборник, 1965. № 6.
16. Морз Ф. М., Кимбелл Д. Е. Методы исследования операций / пер. с англ. И. А. Полетаева и К. Н. Трофимова, под ред. А. Ф. Горохова. М.: Советское радио, 1956. 308 с.
17. Брэм Дж. А. Игра с поиском N-области для 2 игроков // Отчет OIRM 31, 1963.
18. Нейтс М. Ф. Многоэтапная поисковая игра // Журнал СИАМ. 1963. Т. 11, № 2.
19. Джонсон С. М. Поисковая игра // Достижения в теории игр. Издательство Принстонского университета, 1964.
20. Danskin J. M. A theory of reconnaissance // Operations Research. 1963. Vol. 10, № 3.

21. Айзекс Р. Дифференциальные игры / пер. с англ. В.И. Аркина, Э.Н. Симаковой; под ред. М.И. Зеликина. М.: Мир. 1967. 479 с.
22. Зеликин М. И. Об одной дифференциальной игре с неполной информацией // ДАН СССР. Серия «Математика, физика». 1972. Т. 202, № 5.
23. Альперн С. Поисковая игра с подвижным укрытием на круге // Дифференциальные игры и теория управления. Нью-Йорк: Марсель Деккер, 1974.
24. Форман Дж.К. Принцесса и чудовище на круге // Дифференциальные игры и теория управления. Нью-Йорк: Марсель Деккер, 1974.
25. Форман Ю.Г. Дифференциальные поисковые игры с мобильным хидером // Журнал СИАМ по управлению и оптимизации. 1977. Т. 15, № 5.
26. Хальперн Б. Робот и задача преследования кролика // The American Math. 1969. Т. 76, № 2.
27. Гал С. Поисковые игры с подвижным и неподвижным хадером // Журнал СИАМ по управлению и оптимизации. 1979. Т. 17, № 1.
28. Фицджеральд Ч. Дифференциальная игра «Принцесса и чудовище» // Журнал СИАМ по управлению и оптимизации. 1979. Т. 17, № 6.
29. Уилсон Д.Д. Дифференциальные игры без информации // Журнал СИАМ по управлению и оптимизации. 1977. Т. 15, № 2.
30. Mathematical model of network flow control / I.V. Zaitseva [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. “1st International Conference on Innovative Informational and Engineering Technologies, ПЕТ 2020”, 2020. P. 012036.
31. Алферов Г.В. Генерация стратегии робота в условиях неполной информации о среде // Проблемы механики и управления: нелинейные динамические системы. 2003. № 35. С. 4–24.
32. Григорьева К.В., Иванов А.С., Малафеев О.А. Статическая коалиционная модель инвестирования инновационных проектов // Экономическое возрождение России. 2011. № 4. С. 90–98.

Дата поступления: 01.05.2024

Решение о публикации: 05.06.2024

Контактная информация:

МАЛАФЕЕВ Олег Алексеевич — докт.

физ.-мат. наук, профессор; o.malafeev@spbu.ru

ЧЖАН Кунь — аспирант; z282250684@mail.ru

ЗАЙЦЕВА Ирина Владимировна — канд.

физ.-мат. наук, доцент; i.zaitseva@rshu.ru

ГАРАНИН Антон Владимирович — технический

директор; garanin@nt-smt.ru

Problems of search and pursuit of unmanned aerial vehicles using the game-theoretic approach

O. A. Malafeev¹, K. Zhang¹, I. V. Zaitseva², A. V. Garanin³

¹ St. Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 190034, Russian Federation

² Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaya str., St. Petersburg, 192007 Russian Federation

³ New Technologies LLC, 196084, St. Petersburg, Zaozernaya str., 8/2, letter A

For citation: Malafeev O. A., Zhang K., Zaitseva I. V., Garanin A. V. Problems of search and pursuit of unmanned aerial vehicles using the game-theoretic approach // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 744–760. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-744-760

Abstract

Currently, the application of mathematical modeling theory is widely used in various fields and, among other things, can be used to prevent illegal actions. This study examines scenarios involving a single pursuer tracking a single evader, as well as situations involving multiple pursuers pursuing multiple evaders. The authors formulate this problem as a search and pursuit problem for four-rotor unmanned aerial vehicles (UAVs) or quadcopters. The solution to the problem is based on game theory, as it provides a mathematical framework for modeling and studying strategic interactions involving multiple decision makers. The authors consider a game where the set of strategies of the runner is the set of possible combinations of speeds and directions of his movement, and the set of strategies of the pursuer is the set of all possible permutations of the elements of his speeds. The matrix of the resulting game consists of elements that are the time of capture. A mathematical problem on the optimal assignments of searching and pursuing unmanned aerial vehicles is formulated and solved.

Purpose: optimizing the effectiveness of strategies for detecting and capturing four-rotor unmanned aerial vehicles (quadcopters). **Methods:** methods of mathematical modeling, game theory apparatus, Hungarian method of solving the problem of assignments, decision theory, the principle of dynamic programming, the Maple package for solving examples were used. **Results:** In order to fulfill the conditions for solving the problem of optimal assignments, it is necessary and sufficient that it is balanced. This assignment problem can be balanced by entering the required number of fictitious boats or escaping boats. After that, it is possible to formulate and solve the dual problem of optimal appointments. The resulting game can be solved by any method of solving matrix games. In this way, it is possible to determine the policy of harassment and search between drones. **Practical importance:** All escaped quadcopter UAVs can be chased and successfully intercepted using the developed models. Examples of the study of mathematical models using the Maple software package are given.

Keywords: game theory, quadcopter, model, cooperative game theory, Simulink MPC modeling

References

1. Koopman B. O. Search and screening // Operation evolution group office of the chief of naval operations. Report № 56. Washington, 1946.
2. Hellman O. Vvedenie v teoriyu optimal'nogo poiska // per. s angl. E. M. Stolyarovoj. M.: Nauka. 1985. 246 s. (In Russian)
3. Abchuk V. A., Suzdal' V. G. Poisk ob'ektov. M.: Sovetskoe radio, 1977. 336 s. (In Russian)
4. Staroverov O. V. Ob odnoj zadache poiska // Teoriya veroyatnostej i ee primenenie. 1963. T. 8, № 2. S. 196–201. (In Russian)
5. Kelin M. Note a sequential search // Naval research Logistic Quarterly. 1968. Vol. 15, № 3.
6. Koopman B. O. Theory of search: I. Kinematic bases // Operations Reseach. 1956. Vol. 4, № 3.
7. Koopman B. O. Theory of search: III. The optimum distribution of searching efforts // Operations Reseach. 1957. Vol. 5, № 5.
8. Alferov G. V., Malafeev O. A., Mal'ceva A. S. Teoretiko-igrovye modeli poiska podvizhnogo ob'ekta pri inspektirovanii // Problemy mekhaniki i upravleniya: nelinejnye dinamicheskie sistemy. 2014. S. 11–19. (In Russian)
9. Alferov G. V., Malafeev O. A., Mal'ceva A. S. Model' provedeniya antikorrupcionnyh inspekcij // Upravlenie social'no-ekonomicheskim razvitiem regionov: problemy i puti ih resheniya: sbornik nauchnyh statej 4-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii / Yugo-Zap. gos. un-t. Kursk, 2014. S. 20–24. (In Russian)
10. Malafeyev O., Kun Zhang. Problems of search and pursuit of unmanned aerial vehicles using the game-theoretic approach. Arxiv: 2305.19832.
11. Lapshin V. P. Kinematicheskie osnovy teorii poiska // Morskoj sbornik, 1962. № 8. (In Russian)
12. Charnes A., Cooper W. Theory of search: optimal distribution of search effort // Management Science, 1958. Vol. 5, № 1.

13. MacQueen J., Miller R. G. Optimal persistence polices // *Operations Research*. 1960. Vol. 8, № 3.
14. Posner E. C. Optimal search procedures // *IEEE Transactions of Information Theory*. 1963. Vol. 9, № 3.
15. Dubrovin K. O., Sirotin P. A. Vremya prebyvaniya celi v rajone poiska // *Morskoj sbornik*, 1965. № 6. (In Russian)
16. Morz F. M., Kimbell D. E. Metody issledovaniya operacij / per. s angl. I. A. Poletaeva i K. N. Trofimova, pod red. A. F. Gorohova. M.: Sovetskoe radio, 1956. 308 s. (In Russian)
17. Brem Dzh. A. Igra s poiskom N-oblasti dlya 2 igrokov // *Otchet OIRM 31*, 1963. (In Russian)
18. Nejts M. F. Mnogoetapnaya poiskovaya igra // *Zhurnal SIAM*. 1963. T. 11, № 2. (In Russian)
19. Dzhonson S. M. Poiskovaya igra // *Dostizheniya v teorii igr*. Izdatel'stvo Prinstonskogo universiteta, 1964. (In Russian)
20. Danskin J. M. A theory of reconnaissance. *Operations Research*. 1963. Vol. 10, № 3.
21. Ajzeks R. *Differencial'nye igry* / Per. s angl. V. I. Arkina, E. N. Simakovoj; pod red. M. I. Zelikina. M.: Mir. 1967. 479 s. (In Russian)
22. Zelikin M. I. Ob odnoj differencial'noj igre s nepolnoj informaciej // *DAN SSSR. Seriya "Matematika, fizika"*, 1972. T. 202, № 5. (In Russian)
23. Al'pern S. *Poiskovaya igra s podvizhnym ukrytiem na krughe* // *Differencial'nye igry i teoriya upravleniya*. N'yu-Jork: Marsel' Dekker, 1974. (In Russian)
24. Forman Dzh. K. *Princessa i chudovishche na krughe* // *Differencial'nye igry i teoriya upravleniya*. N'yu-Jork: Marsel' Dekker, 1974. (In Russian)
25. Forman Yu. G. *Differencial'nye poiskovye igry s mobil'nym hiderom* // *Zhurnal SIAM ob upravlenii i optimizacii*. 1977. T. 15, № 5. (In Russian)
26. Hal'pern B. *Robot i zadacha presledovaniya krolika* // *The American Math*. 1969. T. 76, № 2. (In Russian)
27. Gal S. *Poiskovye igry s podvizhnym i nepodvizhnym haderom* // *Zhurnal SIAM ob upravleniyu i optimizacii*. 1979. T. 17, № 1. (In Russian)
28. Ficzheral'd CH. *Differencial'naya igra "Princessa i chudovishche"* // *SIAM ob upravlenii i optimizacii*. 1979. T. 17, № 6. (In Russian)
29. Uilson D. D. *Differencial'nye igry bez informacii* // *SIAM ob upravlenii i optimizacii*. 1977. T. 15, № 2. (In Russian)
30. *Mathematical model of network flow control* / I. V. Zaitseva [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. "1st International Conference on Innovative Informational and Engineering Technologies, IIET 2020". 2020. P. 012036.
31. Alferov G. V. *Generaciya strategii robota v usloviyah nepolnoj informacii o srede* // *Problemy mekhaniki i upravleniya: nelinejnye dinamicheskie sistemy*. 2003. № 35. S. 4–24. (In Russian)
32. Grigor'eva K. V., Ivanov A. S., Malafeev O. A. *Staticheskaya koalicionnaya model' investirovaniya innovacionnyh proektov* // *Ekonomicheskoe vozrozhdenie Rossii*. 2011. № 4. S. 90–98. (In Russian)

Received: 01.05.2024

Accepted: 05.06.2024

Author's information:

Oleg A. MALAFEYEV — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor;

o.malafeev@spbu.ru

Kun ZHANG — Postgraduate Student;

z282250684@mail.ru

Irina V. ZAITSEVA — PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor; i.zaitseva@rshu.ru

Anton V. GARANIN — Technical Director; garanin@nt-smt.ru

Proceedings of Petersburg Transport University



Scientific edition
Published since 1884
Under the present name it is published since 2004
Issued 4 times a year

ISSN 1815-588X



9 771815 588007