

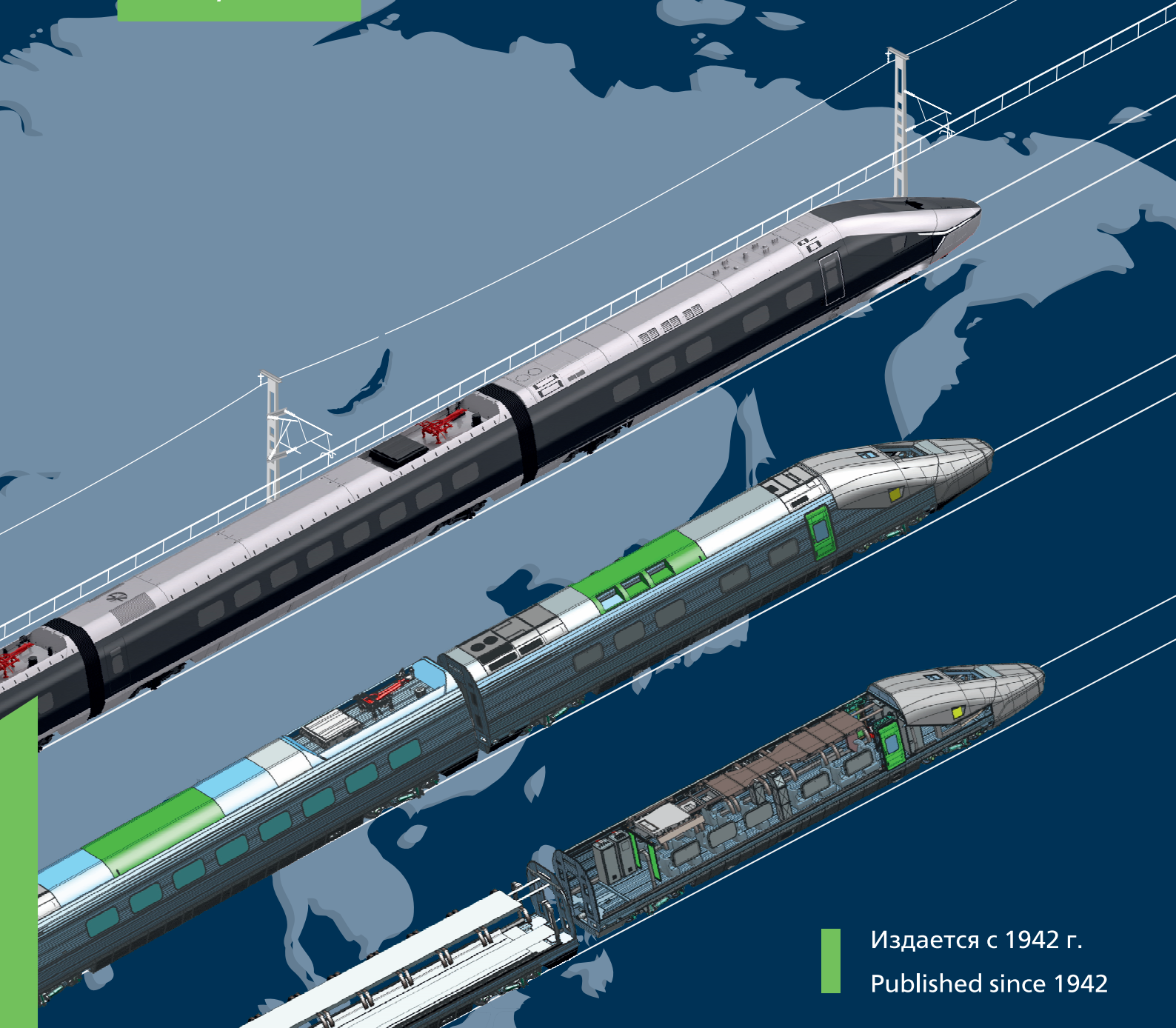


ISSN 2223 – 9731 (Print)
ISSN 2713 – 2560 (Online)



ВЕСТНИК НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL

Том 85, №1. 2026



Издается с 1942 г.
Published since 1942

ISSN 2223-9731 (Print)

ISSN 2713-2560 (Online)

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-1-92>

ВЕСТНИК НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА (ВЕСТНИК ВНИИЖТ)

RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL (VESTNIK VNIIZhT)

ТОМ 85, № 1. 2026

Учредитель:
АО «Научно-исследовательский
институт железнодорожного транспорта»

Адрес учредителя и редакции:
129626, Российская Федерация,
Москва, 3-я Мытищинская ул., 10, стр. 1
Тел.: +7 (495) 602-80-37, 602-81-10

Издается с 1942 г.
Периодичность: 4 номера в год
Подписной индекс: 70116
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-83067 от 11.04.2022

Отпечатано в типографии «Строки»
ИП Волков А. Е.
394086, Российская Федерация,
г. Воронеж, ул. Любы Шевцовой, д. 34

Founder:
Railway Research Institute

Founder and editorial address:
Bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St., Moscow, 129626,
Russian Federation
Tel.: +7 (495) 602 8037, 602 8110

Published since 1942
Periodicity: Quarterly
Subscription index: 70116
Registration Certificate
PI No. FS77-83067. 11.04.2022

Printed in the printing house "Stroki"
Individual Entrepreneur A. E. Volkov
34, Lyuby Shevtsovoy St., Voronezh, 394086,
Russian Federation

www.journal-vniizht.ru
journal@vniizht.ru

© АО «ВНИИЖТ», 2026

ВЕСТНИК ВНИИЖТ

Цель журнала — публикация результатов передовых научных исследований в области совершенствования транспортных, информационных технологий и технических средств железнодорожного транспорта. Журнал адресован исследователям, аналитикам и практикам железнодорожной и машиностроительной отраслей, а также широкому кругу читателей, интересующихся проблемами развития железнодорожного транспорта.

Научный рецензируемый журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» публикует оригинальные научные статьи, ранее не публиковавшиеся в других изданиях.

Журнал предоставляет открытый доступ к полным текстам публикаций, исходя из следующего принципа: открытый доступ к результатам исследований способствует увеличению глобального обмена знаниями.

«Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

- 2.5.2. Машиноведение (технические науки)
- 2.5.3. Трение и износ в машинах (технические науки)
- 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
- 2.6.17. Материаловедение (технические науки)
- 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог (технические науки)
- 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки)
- 2.9.4. Управление процессами перевозок (технические науки)

ЖУРНАЛ ИНДЕКСИРУЕТСЯ И АРХИВИРУЕТСЯ В:

Едином государственном
перечне научных изданий
(«Белый список»)



Международной базе открытых
публикаций **Google Академия**



Russian Science Citation Index (**RSCI**)



Международной
электронно-библиотечной
системе **The European Library**



Международной
справочно-библиографической
системе **EBSCO**



Электронном каталоге
научно-технической литературы
ВИНИТИ РАН



Китайской платформе
наукометрических данных **Baidu**



Международной базе
Dimensions



Китайской платформе
наукометрических данных
**China National Knowledge
Infrastructure**



Директории журналов
открытого доступа (**DOAJ**)



Международной реферативной
базе **Ulrichsweb Global
Serials Directory**



Агентстве регистрации
цифровых идентификаторов
(**CrossRef**)



Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



Право на оригинал-макет и оформление принадлежит учредителю журнала, авторское право на статьи — авторам

RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL

The aim is to publish the results of research insights in the field of improving transport and information technologies and technical means of railway transport. The journal is addressed to researchers, analysts and practitioners of the railway and engineering industries, as well as to a wide range of readers interested in the problems of railway transport development.

The scientific peer-reviewed Russian Railway Science Journal publishes original scientific articles, which have not been previously published.

The journal provides direct open access to full text issues — open access to research results contributes to the increase of global knowledge sharing.

The Russian Railway Science Journal is included in the List of peer-reviewed scientific journals published by the Attestation Commission in which major research results from dissertations of Candidate of Science and Doctor of Science degrees are to be published. Scientific specialties and corresponding branches of science are:

- 2.5.2. Machine science (technical sciences)
- 2.5.3. Friction and wear in machines (technical sciences)
- 2.6.1. Metal science and heat treatment of metals and alloys (technical sciences)
- 2.6.17. Materials science (technical sciences)
- 2.9.2. Railway track, survey and design of railways (technical sciences)
- 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification (technical sciences)
- 2.9.4. Transportation process management (technical sciences)

THE JOURNAL IS INDEXED AND ARCHIVED IN:

Russian Centre for Science
Information White List



Google Scholar

Russian Science Citation Index
(RSCI)

Russian Science
Citation Index

The European Library

EBSCO Information Services



Russian Institute for Scientific
and Technical Information
(VINITI RAS)



Baidu



Dimensions

China National Knowledge
Infrastructure (CNKI)



Directory of Open Access Journals
(DOAJ)



Ulrichsweb Global Serials
Directory



Digital Object Identifier Registration
Agency (CrossRef)



Journal materials are available under the Creative Commons Attribution 4.0 License



The right to the original layout and design belongs to the founder of the journal, the right of authorship to the articles belongs to the authors

Главный редактор

Косарев Александр Борисович, д-р техн. наук, проф., научный руководитель института — ученый секретарь, АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

Заместитель главного редактора

Карасев Михаил Николаевич, канд. юрид. наук, директор научно-образовательного центра, АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 337912, <https://orcid.org/0009-0008-5190-409X>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Абдурахманов Одил Каландарович, д-р экон. наук, проф., ректор, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан, Author ID: 813993, <https://orcid.org/0009-0008-8033-4153>

Бессоненко Сергей Анатольевич, д-р техн. наук, доцент, СГУПС, Новосибирск, Российская Федерация, Author ID: 719058, <https://orcid.org/0000-0001-5782-1596>

Бородин Андрей Федорович, д-р техн. наук, проф., АО «ИЭРТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 279058, <https://orcid.org/0000-0002-3466-6818>

Верескун Владимир Дмитриевич, д-р техн. наук, проф., ректор, РГУПС, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, Author ID: 513710, <https://orcid.org/0000-0002-9547-8167>

Глюзберг Борис Эйнихович, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 298472, <https://orcid.org/0000-0003-2430-7894>

Гуламов Абдулазиз Абдуллаевич, д-р экон. наук, проф., проректор по учебной работе, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан, Author ID: 583321, <https://orcid.org/0000-0002-4702-7468>

Дунаев Олег Николаевич, д-р экон. наук, проф., МГИМО, Москва, Российская Федерация, Author ID: 315899, <https://orcid.org/0000-0002-0593-1029>

Ерофеев Михаил Николаевич, д-р техн. наук, проф., ИМАШ РАН, Москва, Российская Федерация, Author ID: 836604, <https://orcid.org/0000-0002-1048-3574>

Захаров Сергей Михайлович, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 731500, <https://orcid.org/0000-0003-0077-8376>

Крюков Андрей Васильевич, д-р техн. наук, академик Российской академии транспорта, чл.-корр. АН ВШ РФ и Российской инженерной академии, ИРГУПС, Иркутск, Российская Федерация, Author ID: 238950, <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

Кудрявцев Сергей Анатольевич, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РААСН, ДВГУПС, Хабаровск, Российская Федерация, Author ID: 614674, <https://orcid.org/0000-0001-9438-5033>

Локтев Алексей Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, проф., РУТ (МИИТ), Москва, Российская Федерация, Author ID: 16528, <https://orcid.org/0000-0002-8375-9914>

Москвичев Олег Валерьевич, д-р техн. наук, доцент, директор института управления и экономики, ПривГУПС, Самара, Российская Федерация, Author ID: 388509, <https://orcid.org/0000-0002-3423-1451>

Науменко Сергей Николаевич, д-р техн. наук, АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 722006, <https://orcid.org/0000-0002-6097-9375>

Незевак Владислав Леонидович, д-р техн. наук, доцент, ОмГУПС, Омск, Российская Федерация, Author ID: 393961, <https://orcid.org/0000-0002-1205-1994>

Овчаренко Сергей Михайлович, д-р техн. наук, доцент, ректор, ОмГУПС, Омск, Российская Федерация, Author ID: 211825, <https://orcid.org/0000-0002-2985-3934>

Покровская Оксана Дмитриевна, д-р техн. наук, доцент, ГУУ, Москва, Российская Федерация, Author ID: 592347, <https://orcid.org/0000-0001-9793-0666>

Шаумаров Саид Санатович, д-р техн. наук, проф., проректор по научной работе и инновациям, Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан, Author ID: 914211, <https://orcid.org/0000-0001-8935-7513>

Шимановский Александр Олегович, д-р техн. наук, проф., Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь, Author ID: 481473, <https://orcid.org/0000-0001-8550-1725>

Шур Евгений Авелевич, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 764128, <https://orcid.org/0000-0003-4248-195X>

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Виноградов Сергей Александрович, председатель, канд. техн. наук, генеральный директор АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

Горячева Ирина Георгиевна, д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАН, ИПМех РАН, Москва, Российская Федерация

Дынькин Борис Евгеньевич, д-р техн. наук, проф., почетный президент МАТУ АТР, ЮРГПУ (НПИ) им. М. И. Платова, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Колесников Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф., академик РАН, РГУПС, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Лапидус Борис Моисеевич, д-р экон. наук, проф., председатель Объединенного ученого совета ОАО «РЖД», Москва, Российская Федерация

Махутов Николай Андреевич, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РАН, ИМАШ РАН, Москва, Российская Федерация

Мачерет Дмитрий Александрович, д-р экон. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

Мугинштейн Лев Александрович, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

Назаров Олег Николаевич, канд. техн. наук, ОАО «РЖД», Москва, Российская Федерация

Розенберг Ефим Наумович, д-р техн. наук, проф., первый заместитель генерального директора АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация

Смолянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, проф., УрГУПС, Екатеринбург, Российская Федерация

РЕДАКЦИЯ

Анохов Игорь Васильевич, начальник научно-издательского отдела,

Сиротенко Игорь Васильевич, научный редактор,

Гиншпарт Михаил Маркусович, научный редактор,

Редина Анна Эдуардовна, редактор-корректор,

Сямина Александра Андреевна, корректор,

Агафонова Наталия Сергеевна, дизайнер-верстальщик

Поступившие в редакцию материалы не возвращаются. Гонорары не выплачиваются. Все статьи публикуются бесплатно.

Подписано к печати 19.03.2026. Формат бумаги 60х90 1/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 11,63. Тираж 300 экз. Заказ 75325. Цена свободная

Editor-in-Chief

Alexander B. Kosarev, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Scientific Adviser — Scientific Secretary of the Railway Research
Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 352781,
<https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

Deputy Editor-in-Chief

Mikhail N. Karasev, Cand. Sci. (Jur.), Director of the Science
and Education Centre, Railway Research Institute, Moscow,
Russian Federation, Author ID: 337912,
<https://orcid.org/0009-0008-5190-409X>

EDITORIAL BOARD

Odil K. Abdurakhmanov, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Rector
of the Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan,
Author ID: 813993, <https://orcid.org/0009-0008-8033-4153>

Sergey A. Bessonenko, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation,
Author ID: 719058, <https://orcid.org/0000-0001-5782-1596>

Andrey F. Borodin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Institute for Transport
Economics and Development, Moscow, Russian Federation,
Author ID: 279058, <https://orcid.org/0000-0002-3466-6818>

Vladimir D. Vereskun, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Rector of the Rostov State Transport University,
Rostov-on-Don, Russian Federation, Author ID: 513710,
<https://orcid.org/0000-0002-9547-8167>

Boris E. Glyzberg, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Railway Research
Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 298472,
<https://orcid.org/0000-0003-2430-7894>

Abdulaziz A. Gulamov, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Vice Rector
for Academic Affairs, Tashkent State Transport University, Tashkent,
Uzbekistan, Author ID: 583321, <https://orcid.org/0000-0002-4702-7468>

Oleg N. Dunaev, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Moscow State
Institute of International Relations, Moscow, Russian Federation,
Author ID: 315899, <https://orcid.org/0000-0002-0593-1029>

Mikhail N. Erofeev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Mechanical
Engineering Research Institute of the Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russian Federation, Author ID: 836604,
<https://orcid.org/0000-0002-1048-3574>

Sergey M. Zakharov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Railway Research
Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 731500,
<https://orcid.org/0000-0003-0077-8376>

Andrey V. Kryukov, Dr. Sci. (Eng.), Academician
of the Russian Academy of Transport, Corresponding member
of the Russian higher school Academy of sciences and Russian
Academy of Engineering, Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russian Federation, Author ID: 238950,
<https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

Sergey A. Kudryavtsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Corresponding member of the Russian Academy of Architecture
and Construction Sciences, Far Eastern State Transport University,
Khabarovsk, Russian Federation, Author ID: 614674,
<https://orcid.org/0000-0001-9438-5033>

Alexey A. Loktev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor,
Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation,
Author ID: 16528, <https://orcid.org/0000-0002-8375-9914>

Oleg V. Moskvichev, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Director of the Institute of Management and Economics,
Volga State Transport University, Samara, Russian Federation,
Author ID: 388509, <https://orcid.org/0000-0002-3423-1451>

Sergey N. Naumenko, Dr. Sci. (Eng.), Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation, Author ID: 722006,
<https://orcid.org/0000-0002-6097-9375>

Vladislav L. Nezevak, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation,
Author ID: 393961, <https://orcid.org/0000-0002-1205-1994>

Sergey M. Ovcharenko, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Rector of the Omsk State Transport University, Omsk,
Russian Federation, Author ID: 211825,
<https://orcid.org/0000-0002-2985-393>

Oksana D. Pokrovskaya, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
State University of Management, Moscow, Russian Federation,
Author ID: 592347, <https://orcid.org/0000-0001-9793-0666>

Said S. Shaumarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector for
Research and Innovation, Tashkent State Transport University,
Tashkent, Uzbekistan, Author ID: 914211,
<https://orcid.org/0000-0001-8935-7513>

Alexandr O. Shimanovsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus,
Author ID: 481473, <https://orcid.org/0000-0001-8550-1725>

Evgeniy A. Schur, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation,
Author ID: 764128, <https://orcid.org/0000-0003-4248-195X>

EDITORIAL COUNCIL

Sergey A. Vinogradov, Chairman, Cand. Sci. (Eng.),
General Director of the Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

Irina G. Goryacheva, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences,
Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy
of Science, Moscow, Russian Federation

Boris E. Dynkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Honored President of the International Association of Transport
Universities of Asian-Pacific Countries, Platov South-Russian State
Polytechnic University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Vladimir I. Kolesnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences, Rostov State
Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Boris M. Lapidus, Dr. Sci. (Econ.), Professor,
Chairman of the Joint Scientific Council of the Russian Railways
Company, Moscow, Russian Federation

Nikolay A. Makhutov, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

Dmitriy A. Macheret, Dr. Sci. (Econ.), Professor,
Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation

Lev A. Muginshtein, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Railway Research
Institute, Moscow, Russian Federation

Oleg N. Nazarov, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head
of the Technical Policy Department, Russian Railways Company,
Moscow, Russian Federation

Efim N. Rosenberg, Dr. Sci. (Eng.), Professor, First Deputy
General Director of the Research and Design Institute
for Information Technology, Signalling and Telecommunications
in Railway Transportation, Moscow, Russian Federation

Alexander V. Smolyaninov, Dr. Sci. (Eng.), Professor
of the Wagon Department, Ural State University of Railway
Transport, Ekaterinburg, Russian Federation

EDITORIAL STAFF

Igor V. Anokhov, Head of the Scientific Publishing Department,

Igor V. Sirotenko, Scientific Editor,

Mikhail M. Ginchparg, Scientific Editor,

Anna E. Redina, Editor-proofreader,

Alexandra A. Syamina, Proofreader,

Nataliya S. Agafonova, Layout Designer

Received materials are not returned. Fees are not paid. All articles are published free of charge.

Signed to print on 19.03.2026. Format is 60x90 1/8. Offset printing. 11,63 printed sheets. 300 copies. Order No. 75325. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Научно-технические результаты разработки высокоскоростного электропоезда для железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург В. Е. Андреев, О. Н. Назаров, А. А. Кирейцев, А. Н. Галахов.....	9–23
---	------

Моделирование контактного взаимодействия колеса с неравномерным прокатом периодической формы и рельса профиля Р65 для высокоскоростного движения М. А. Морковников, Е. С. Ашпиз.....	24–37
--	-------

Натурное исследование максимального уровня внешнего шума подвижного состава С. Е. Ададунов, И. И. Гнатченко, Ю. В. Никольская, А. С. Пономарев, В. Е. Дегтярев, А. Ю. Панин.....	38–47
---	-------

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Взаимосвязи режимов управления вагонопотоками А. Ф. Бородин, В. В. Прозоров.....	49–62
--	-------

Разработка классификации грузовых контейнерных терминалов на основе анализа грузопотоков и назначений А. Н. Кириллов.....	63–76
---	-------

НАУЧНЫЕ ДИСКУССИИ: ГИПОТЕЗЫ, ТЕОРИИ, ОБСУЖДЕНИЕ

Вопросы пропуска транзитных грузовых поездопотоков на железных дорогах в условиях увеличивающихся объемов грузовых перевозок М. И. Мехедов, Л. А. Мугинштейн.....	78–92
---	-------

CONTENTS

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Scientific and technical outcomes development of high-speed electric train for Moscow – Saint Petersburg High-Speed Railway line

Vladimir E. Andreev, Oleg N. Nazarov, Alexander A. Kireytsev, Andrey N. Galakhov 9–23

Contact interaction simulation of uneven wheel rolling of periodic shape and R65 profile rail for high-speed movement

Matvei A. Morkovnikov, Evgeny S. Ashpiz 24–37

Field studies on external noise maximum noise level of rolling stock

Sergey E. Adadurov, Igor I. Gnatchenko, Yuliya V. Nikolskaya, Andrey S. Ponomarev, Vitaliy E. Degtyarev, Andrey Yu. Panin 38–47

TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

Interdependence of car traffic volumes operation modes

Andrey F. Borodin, Vladimir V. Prozorov 49–62

Development of cargo container terminal classification based on analysis of cargo traffic flows and destinations

Arseniy N. Kirillov 63–76

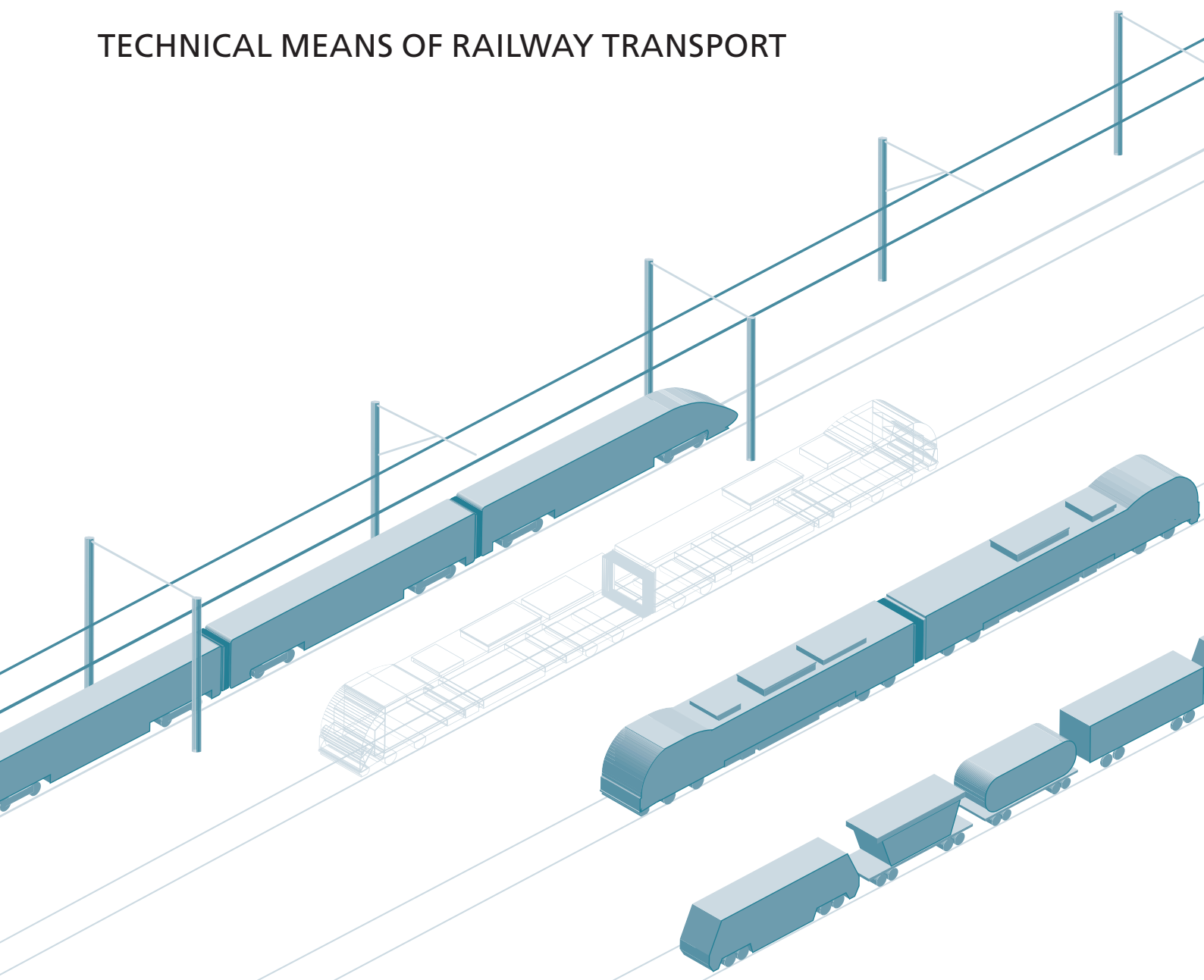
SCIENTIFIC DEBATES: HYPOTHESES, THEORIES, DISCUSSION

Issues of transit freight train traffic handling in conditions of freight traffic volumes increase

Mikhail I. Mekhedov, Lev A. Muginshtein 78–92

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 629.4.014.23

EDN: <https://elibrary.ru/hawxwp>DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-9-23>

Научная специальность: 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



Научно-технические результаты разработки высокоскоростного электропоезда для железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург

В. Е. Андреев¹, О. Н. Назаров¹✉, А. А. Кирейцев², А. Н. Галахов²¹Департамент технической политики ОАО «РЖД» (ЦТЕХ), Москва, Российская Федерация²Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта (АО «ИЦ ЖТ»), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены основные научно-технические проблемы при создании высокоскоростного электропоезда ЭВС360 для российских высокоскоростных железнодорожных магистралей и пути их решения. Приведены особенности технических решений, примененных в тяговом электрооборудовании и конструкции электропоезда. Обоснованы его ключевые технические и эксплуатационные характеристики.

Материалы и методы. При разработке высокоскоростного электропоезда и определении его параметров и характеристик были использованы методы математического моделирования. Движение по участку в режимах тяги и торможения было смоделировано с применением теории тяговых расчетов, расчет производится методом прямого интегрирования уравнений движения по времени. Аэродинамические расчеты проводились с использованием моделей турбулентности с вихревой вязкостью. Подтверждение соответствия параметров элементов электрооборудования нормативным требованиям выполнялось посредством механических, ресурсных электрических, тепловых и других видов испытаний.

Результаты. Основными результатами реализации ОАО «РЖД» и АО «ИЦ ЖТ» научно-технического проекта по созданию высокоскоростного электропоезда являются: математические модели, оптимизированные технические решения, конструкторская документация на электропоезд и его составные части, опытные образцы изделий, а также нормативная, технологическая и эксплуатационная документация.

Обсуждение и заключение. К настоящему времени выполнен значительный объем проектных, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию высокоскоростного электропоезда для российских высокоскоростных магистралей. Изготовлены опытные образцы основных элементов тягового электрооборудования, выполняются необходимые испытания. Для подтверждения соответствия требованиям и верификации расчетных эксплуатационных показателей высокоскоростного электропоезда запланированы испытания на участке Алабушево – Новая Тверь строящейся высокоскоростной магистрали Москва – Санкт-Петербург.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высокоскоростная магистраль, высокоскоростной электропоезд, технические требования, тяговые характеристики, тяга, тормозные характеристики, вагон, сопротивление движению, расход электроэнергии

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Андреев В. Е., Назаров О. Н., Кирейцев А. А., Галахов А. Н. Научно-технические результаты разработки высокоскоростного электропоезда для железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2026. Т. 85, № 1. С. 9–23. EDN: <https://elibrary.ru/hawxwp>.

Original article

UDK 629.4.014.23

EDN: <https://elibrary.ru/hawxwp>

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-9-23>

Scientific specialty: 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification



Scientific and technical outcomes development of high-speed electric train for Moscow – Saint Petersburg High-Speed Railway line

Vladimir E. Andreev¹, Oleg N. Nazarov¹✉,
Alexander A. Kireytsev², Andrey N. Galakhov²

¹Technical Policy Department of JSC Russian Railways,
Moscow, Russian Federation

²Engineering Centre of Railway Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article addresses the principal scientific and technical challenges encountered in the design, engineering, and staged testing of the EVS360 high-speed electric train, developed for Russian high-speed railways. It presents the distinctive features of the technical solutions implemented in the traction electrical equipment and overall train architecture, and provides a substantiation of its key technical and operational characteristics.

Materials and methods. Numerical simulation methods were employed during the design phase of the high-speed electric train to determine its parameters and performance characteristics. Traction and braking dynamics along the track section were modeled using a computational approach grounded in the theory of traction, wherein the equations of motion were directly integrated over time. Aerodynamic analyses were conducted using turbulence models based on the eddy viscosity concept. Verification of the compliance of electrical equipment components with applicable regulatory requirements was performed through a series of mechanical, electrical, thermal, and other relevant tests.

Results. The principal outcomes of the scientific and technical project undertaken by JSC Russian Railways and JSC Engineering Centre of Railway Transport, aimed at developing a high-speed electric train, comprise a set of mathematical models, optimized technical solutions, design and manufacturing documentation for the electric train and its constituent components, prototype samples of products, as well as normative, technological, and operational documentation.

Discussion and conclusion. To date, a substantial volume of design, research, and development work has been completed toward the creation of a high-speed electric train for Russian HSR. Prototype samples of the primary traction electrical equipment components have been manufactured and are currently undergoing the requisite testing. In order to validate compliance with specified requirements and verify the calculated operational performance characteristics of the high-speed electric train, subsequent full-scale field tests are scheduled to be conducted at the Alabushevo – Novaya Tver section of the first planned Moscow – Saint Petersburg HSR line.

KEYWORDS: high-speed railway, high-speed electric train, technical requirements, traction performance, traction, braking performance, car, motion resistance, power consumption

FOR CITATION: Andreev V. E., Nazarov O. N., Kireytsev A. A., Galakhov A. N. Scientific and technical outcomes development of high-speed electric train for Moscow – Saint Petersburg High-Speed Railway line. *Russian Railway Science Journal*. 2026;85(1):9–23. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-9-23>.

Введение. В Российской Федерации реализуется важнейший для транспортной системы страны проект строительства системы высокоскоростных железных дорог. Первая в этой системе высокоскоростная магистраль (далее — ВСМ) между Москвой и Санкт-Петербургом обеспечит приоритетные транспортные потребности населения, а также будет способствовать развитию внутренних грузоперевозок, экономическому росту территорий вдоль маршрута и формировать спрос на дальнейшее развитие системы ВСМ [1]. Данный проект получил одобрение Президента Российской Федерации и был включен в состав национального проекта «Эффективная транспортная система»¹.

Важнейшая составляющая проекта ВСМ и самая его наукоемкая часть — высокоскоростной электропоезд. Разработка нового подвижного состава, позволяющего решать новые и перспективные транспортные задачи, является логическим продолжением многолетнего опыта эксплуатации и создания отечественных скоростных и высокоскоростных электропоездов [2].

Разработка новой конструкции, изготовление и организация производства высокоскоростных электропоездов даже в условиях доступности лучших в мире технологий сопряжены с необходимостью решения сложнейших научно-технологических задач. Поэтому из нескольких десятков присутствующих на мировых рынках разработчиков и изготовителей пассажирского подвижного состава лишь некоторые компании могут предложить собственные решения для высокоскоростных перевозок. Анализ реализуемых в различных странах проектов создания поездов для ВСМ показал, что разработка и внедрение технологических платформ в области высокоскоростного подвижного состава — задача настолько технически сложная, капиталоемкая и рискованная, что даже в развитых странах мира она решается только крупными консорциумами ведущих исследовательских центров, промышленных компаний и университетов при ключевом финансовом и управленческом участии государства² [3–4].

Учитывая ключевые особенности российского электропоезда, такие как ширина колеи 1520 мм, широкий российский габарит подвижного состава Т (в соответствии с ГОСТ 9238–2022³), работоспособность при температурах окружающего воздуха до -40°C , эксплуатация на линиях, электрифицированных на переменном и постоянном токе, российские системы сигнализации и связи, можно уверенно утверждать, что на мировом рынке не представлено моделей высокоскоростного

подвижного состава, которые даже отдаленно могли бы стать прототипами для российского проекта.

Цель статьи — представить проект высокоскоростного электропоезда, разработанного с учетом национальных требований и стандартов, а также его ключевые технические и эксплуатационные характеристики.

Научная новизна проекта состоит в комплексном системном решении, объединяющем взаимосвязанные прикладные исследования в области электротехники, материаловедения, теплофизики, аэродинамики, динамики и теории управления, результат которых — электропоезд, соответствующий установленным требованиям и способный эффективно, безопасно и надежно работать в условиях России.

Практическая значимость работы заключается в том, что в современных условиях поставленная задача — создать импортонезависимый высокоскоростной пассажирский подвижной состав собственными силами — является сложной комплексной проблемой, требующей от научных организаций, разработчиков и машиностроителей преодоления ряда взаимосвязанных вызовов.

Общая концепция проекта. В основу концепции нового электропоезда вошли ранее сделанные проработки конфигурации высокоскоростного электропоезда для линии ВСМ Москва — Екатеринбург [5]. Участие в этом проекте российских научных организаций позволило вести скоординированную работу по подготовке и обоснованию технических требований, а также по разработке нормативных документов.

ОАО «РЖД» выступило инициатором и заказчиком проекта разработки электропоезда в 2019 году, в декабре 2020 года было утверждено Техническое задание. Для этой задачи была сформирована команда управления проектом, разработка технических решений для электропоезда была поручена специально созданному конструкторскому бюро АО «ИЦ ЖТ» [6]. Конструирование высокоскоростного электропоезда опережало все другие работы по проекту ВСМ. В конце 2024 года был утвержден Технический проект электропоезда. Примерно к этому же времени окончательно сформировалась новая команда управления и общее видение всего проекта. Для его реализации было заключено концессионное соглашение, которое определило юридическую форму государственно-частного партнерства и базовые параметры транспортной системы ВСМ. С участием новых акционеров была утверждена финансовая модель проекта и общий график

¹ Утвердить паспорт национального проекта «Эффективная транспортная система» № 000005302 (ч. I, п. 9): протокол заседания членов президиума Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам от 20 декабря 2024 г. № 12пр.

² Китунин А.А. Развитие высокоскоростного железнодорожного движения в КНР: XX–XXI вв.: дисс. канд. историч. наук: 07.00.10. Санкт-Петербург, 2019. 290 с.

³ ГОСТ 9238–2022. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 декабря 2022 г. № 1416-ст. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 205 с.

работ. Заложенные в обновленную концепцию проекта решения частично повлияли на отдельные параметры и характеристики нового электропоезда, сохранив при этом уже принятую концепцию проектирования.

Основываясь на базовых параметрах проекта, отраженных в концессионном соглашении, для проектирования двухсистемного высокоскоростного электропоезда установлены следующие целевые показатели, включенные в техническое задание: максимальная скорость должна достигаться на участках с системой электроснабжения переменного тока напряжением 25 кВ частотой 50 Гц; скорость в эксплуатации на участках с системой электроснабжения постоянного тока напряжением 3 кВ — 250 км/ч. Ограничение скорости на постоянном токе связано с техническими особенностями системы электроснабжения, которая не позволяет обеспечить требуемую мощность для движения поездов на более высоких скоростях. К ключевым параметрам также относятся: пассажироместимость — 452 человека; номинальная ширина колеи — 1520 мм; работа при температурах наружного воздуха от минус 40 °С до плюс 40 °С; число вагонов — 8, с возможностью эксплуатации сдвоенных составов (8+8 вагонов); совместимость высокоскоростных электропоездов с инфраструктурой обычных железнодорожных линий.

Состав функциональных подсистем нового электропоезда на первый взгляд практически не отличается от современных серийно выпускаемых промышленностью типовых пригородных и скоростных электропоездов (динамика и прочность экипажа, токосъем, тяга, торможение, вспомогательное электроснабжение, микроклимат, пожаробезопасность, сигнализация, радиосвязь и пр.). Однако целевые условия эксплуатации на ВСМ формируют к каждой из этих подсистем новые специфические требования, предопределяющие необходимость кардинального изменения принятых разработчиками и промышленностью «серийных» как конструкторских, так и технологических подходов к проектированию и производству.

Обеспечение всех видов безопасности в соответствии с требованиями нормативных документов является ключевой задачей разработчиков электропоезда. В Технический регламент таможенного союза ТР ТС 002/2011⁴ были внесены изменения, гармонизированные с текущими изменениями нормативных документов. При разработке и изготовлении электропоезда и его составных частей должно быть обеспечено соответствие показателей требованиям

ТР ТС 002/2011⁵, подтвержденное результатами испытаний.

Эффективность высокоскоростной транспортной системы, в отличие от системы с обычными электропоездами, в значительной степени определяется несколькими ключевыми свойствами высокоскоростного электропоезда: массой (в том числе максимальной нагрузкой на ось), максимальной скоростью движения, аэродинамическими, тяговыми и тормозными характеристиками и удельным расходом электроэнергии.

Выбор конфигурации поезда и распределение оборудования в вагонах с учетом развески каждого вагона — оптимизационная многопараметрическая задача, которая решалась на первом этапе проектирования. Рассматривались различные варианты компоновки, в том числе и двенадцативагонные конфигурации поездов. Отмечалось, что данная конфигурация в большей степени отвечает базовым параметрам концессионного соглашения, однако из-за большего числа типов вагонов, из которых будет состоять электропоезд, потребуется больше времени на конструкторские работы и подготовку производства, что негативно повлияет на сроки реализации проекта. По этой причине участниками соглашения было принято и утверждено решение о продолжении работ в проекте ВСМ с использованием восьмивагонной конфигурации электропоезда.

Максимальная скорость движения. Одним из ключевых условий концессионного соглашения является возможность движения на отдельных участках ВСМ с максимальной скоростью 400 км/ч. Этот показатель являлся основным предметом дискуссий при обсуждении в 2014–2015 гг. По итогам была достигнута договоренность относительно формулировок в технических требованиях о максимальной скорости в эксплуатации и конструкционной скорости электропоезда на уровне 360 км/ч.

Кроме того, было зафиксировано требование провести испытания электропоезда на скоростях до 400 км/ч, чтобы подтвердить наличие достаточного конструктивного запаса для безопасной эксплуатации. Данную величину в документах определили как демонстрационную скорость. Такой подход соответствует установившейся практике железнодорожных компаний участников Международного союза железных дорог (МСЖД) при вводе в эксплуатацию новых высокоскоростных линий. Раздел 2.4 международного стандарта IRS 60661:2020 содержит рекомендации по выбору максимальной скорости движения при проведении

⁴ Технический регламент ТС «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» (ТР ТС 002/2011): утв. решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710 (с изменениями от 14 сентября 2021 г.). URL: https://rostransnadzor.gov.ru/storage/MTU_PO_DFO/TR ТС 002_2011.pdf (дата обращения: 04.02.2026).

⁵ Там же.

системных динамических интеграционных испытаний для проверки работоспособности и совместимости всех инфраструктурных подсистем и подвижного состава перед вводом в эксплуатацию вновь построенной или модернизированной высокоскоростной линии⁶. Среди прочих требований в стандарте имеются указания по проведению этих испытаний со скоростями вплоть до 110 % от установленной на линии допустимой скорости. Формально данный стандарт не действует на территории Российской Федерации, однако, принимая во внимание богатый опыт европейских и азиатских железных дорог в области высокоскоростного движения [7–8], требование необходимости достижения при испытаниях скорости 400 км/ч было принято для российского проекта и включено как в техническое задание на электропоезд ЭВС360, так и в задание на проектирование линии.

Масса электропоезда. Масса электропоезда относится к важнейшим параметрам эффективности транспортной системы, так же как и зависящая от нее максимальная осевая нагрузка. Проведенные за рубежом научные исследования по оценке влияния осевой нагрузки на показатели динамики экипажа и взаимодействия с высокоскоростной инфраструктурой показали исключительную важность данного показателя с точки зрения оптимального балансирования между требуемой мощностью электропоезда и устойчивостью экипажа на высоких скоростях [9–10]. Для успешной реализации проекта требуется определить предельные значения массы поезда и нагрузки на ось, учитывая их критическое значение для обеспечения безопасности и эффективности движения. При этом важно проанализировать влияющие факторы, которые должны быть учтены для достижения оптимальных технических характеристик подвижного состава.

Главным фактором, напрямую влияющим на увеличение массы поезда, является необходимость достижения скорости движения 360–400 км/ч, что в свою очередь требует значительного повышения тяговой мощности по сравнению с обычным скоростным подвижным составом, поскольку сопротивление движению существенно возрастает на высоких скоростях. Удельная тяговая мощность — это показатель энергооборуженности подвижного состава на единицу его массы, который определяет насколько эффективно электропоезд может преодолевать все виды сопротивления движению, включая профиль пути, механические потери, аэродинамические воздействия и др. Например, удельная тяговая мощность электропоезда ЭВС2 с конструкционной скоростью 250 км/ч состав-

ляет 12,3 кВт/т брутто. По результатам много-факторного моделирования аэродинамических процессов, расчета механических потерь в экипаже и тяговом приводе, а также тяговых расчетов было определено, что для реализации скоростей более 360 км/ч и выполнения базовых параметров концессионного соглашения необходимая удельная тяговая мощность электропоезда должна составлять не менее 17,5 кВт/т, что ведет к существенному увеличению массогабаритных показателей тягового и вспомогательного электрооборудования, размещаемого на электропоезде.

Для обеспечения финансовой устойчивости проекта после подписания концессионного соглашения было скорректировано требование к пассажироместимости поезда. Изменение числа мест для размещения пассажиров с 400 до 452 стало дополнительным фактором прямого влияния на увеличение массы поезда. Удельная пассажироместимость электропоезда достигла величины 2,17 пассажиров на метр длины состава, что на 8 % выше аналогичного показателя 2,01 пассажира на метр, достигнутого на электропоездах ЭВС1 и ЭВС2, что привело к необходимости установки дополнительного оборудования для размещения пассажиров, обеспечения параметров комфорта и микроклимата. В результате принятых решений общая масса оборудования увеличилась на 4,9 т, а общая расчетная масса пассажиров с багажом — на 5,2 т, при этом была сделана полная перекомпоновка пассажирских салонов четырех вагонов, внесены изменения в размещение оборудования.

Важным фактором является также отрицательное влияние увеличения максимальной нагрузки на ось на обеспечение безопасности при движении экипажа со скоростями 350 км/ч и более. Безопасность процесса взаимодействия колеса и рельса требует учета динамического нагружения экипажа при движении по жесткому пути с бетонным основанием, а также исключения возникновения резонансов в бетонных или металлических балках при движении по эстакадам [11–12].

За последние 10–15 лет специалисты европейских железных дорог достигли понимания о необходимости снижения массы и нагрузки на ось высокоскоростных электропоездов, наблюдается существенный прогресс в этой области: максимальная нагрузка на ось новых электропоездов уверенно преодолела рубеж 17 т и имеет тенденцию к дальнейшему понижению, внесены изменения в нормативы проектирования инфраструктуры в странах ЕС. В соответствии с решениями Европейской комиссии от 18 ноября 2014 г. и изменениями к ним

⁶ IRS-60661:2020. Railway application. High speed. Dynamic integration tests and trial operation before revenue operation. Edition 1, October 2020. 36 p. URL: <https://shop.uic.org/en/6-high-speed-trains-operation-maintenance/9572-railway-application-high-speed-dynamic-integration-tests-and-trial-operation-before-revenue-operation.html> (дата обращения: 04.02.2026).

от 10 августа 2023 г.^{7,8} для линий категории Р1 со скоростями движения 250–350 км/ч при проектировании объектов инфраструктуры установлено значение расчетной нагрузки не менее 17 т/ось. Исходя из этого требования, при проектировании инфраструктуры должна определяться расчетная величина нагрузки на ось, учитывающая типы эксплуатируемого на участке подвижного состава, на соответствие которой следует производить расчет мостов и эстакад с использованием динамического метода. Для подвижного состава ограничений по нагрузке на ось в нормативных документах ЕС не установлено.

Данные формулировки нацелены на то, чтобы исключить установление владельцами инфраструктуры возможных ограничений по допуску высокоскоростного подвижного состава различных собственников из-за несоответствия максимальной нагрузке на ось, особенно для подвижного состава старых типов с нагрузкой более 17 т/ось. При этом владельцем инфраструктуры могут устанавливаться ограничения скорости при пропуске отдельных типов подвижного состава по эстакадам, и разрешенная скорость для них должна определяться по результатам испытаний.

Среди российских специалистов в 2024–2025 гг. обсуждался вопрос об установлении норматива нагрузки на ось для выбора проектных решений объектов инфраструктуры. В результате было найдено компромиссное значение на уровне 18 т/ось. Такая нагрузка была обоснована результатами моделирования процессов взаимодействия электропоезда и инфраструктуры при его движении со скоростями до 400 км/ч с проектными характеристиками экипажной части на участках безбалластного пути и на эстакадах. Модель учитывала новые требования к пассажироваместимости, все ранее перечисленные факторы влияния, принятый для проекта ВСМ габарит Т, а также существующий уровень развития отечественных технологий.

Таким образом, в техническое задание на высокоскоростной электропоезд ЭВС360 было включено требование о необходимости обеспечить максимальную нагрузку на ось не более 18 т, тогда как для проектирования объектов инфраструктуры⁹ — не менее 18 т/ось. При этом перед разработчиками электропоезда поставлена задача найти оптимальные технические решения, которые позволят максимально снизить массу опытных электропоездов, и, по мере развития оте-

чественных технологий, в дальнейшем добиваться уже достигнутого в мировой практике целевого значения максимальной нагрузки 17 т/ось.

Командой разработчиков проделана работа по снижению массы тары электропоезда: пересмотрены компоновки салонов и расположение оборудования в вагонах, а также технические решения для практически всех комплектующих, определены имеющиеся запасы прочности, предложены варианты применения легких металлов и композиционных материалов. В итоге предложены новые конструкторские и технологические решения для многих составных частей: высоковольтных блоков защиты, тягового трансформатора, тягового и вспомогательного преобразователей, блока аккумуляторных батарей, блока тормозных резисторов, главных резервуаров, деталей интерьера, мебели, пассажирских кресел, внешних и внутренних дверей, санузлов, баков, трубопроводов, арматуры, крышевых и головных обтекателей, воздухозаборников, систем обеспечения микроклимата, компрессорных агрегатов, компонентов системы торможения, сцепных устройств, компонентов системы охлаждения тягового оборудования, межвагонных переходов. Этот перечень не является исчерпывающим. В табл. 1 для примера представлены наиболее энергоемкие элементы тягового электрооборудования электропоезда ЭВС360, приведена их мощность и масса в сопоставлении с аналогичными компонентами электропоезда ЭВС2 «Сапсан» (Siemens Velaro RUS), изготовленными в Германии. Результаты проделанной работы можно будет оценить после изготовления головного образца электропоезда. Ожидаемая разработчиками результирующая величина нагрузки на ось на опытных образцах не должна превысить 17,5 т.

Тяговое электрооборудование. В основной восьмивагонной составности схема соединения элементов тягового электрооборудования сконфигурирована в виде двух четырехвагонных моторвагонных электросекций (рис. 1). Каждая секция состоит из головного моторного (ГМ), трансформаторного немоторного (ПТ), моторного (М) и прицепного (П) вагонов. Схема состава электропоезда выглядит следующим образом: (ГМ + ПТ + М + П) + (П + М + ПТ + ГМ).

В составе восьмивагонного электропоезда ЭВС360 предусмотрено четыре моторных и четыре немоторных вагона, всего 16 моторных осей. Высоковольтное силовое и тяговое оборудование каждой секции

⁷ European Commission (2014) Commission Regulation (EU) No. 1299/2014 of 18 November 2014 on the technical specifications for interoperability relating to the “infrastructure” subsystem of the rail system in the European Union (Text with EEA relevance). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2014/1299/oj/eng> (дата обращения: 04.02.2026).

⁸ European Commission (2023) Commission Implementing Regulation (EU) 2023/1694 of 10 August 2023 amending Regulations (EU) No. 321/2013, (EU) No. 1299/2014, (EU) No. 1300/2014, (EU) No. 1301/2014, (EU) No. 1302/2014, (EU) No. 1304/2014 and Implementing Regulation (EU) 2019/777 (Text with EEA relevance). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1694/oj/eng> (дата обращения: 04.02.2026).

⁹ СТО РЖД 14.004-2025. Инфраструктура высокоскоростного железнодорожного транспорта. Технические нормы и требования к проектированию и строительству: утв. и введен в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 04 апреля 2025 г. № 747/п.

Таблица 1

Масса и мощность элементов тягового электрооборудования электропоезда ЭВС360 в сравнении с электропоездом ЭВС2*

Table 1

Mass and power of traction electrical equipment components of the EVS360 electric train in comparison with the EVS2 electric train*

Компонент электрооборудования	ЭВС2 «Сапсан» ¹		ЭВС360 ²	
	Мощность, кВт (кВА)	Масса, кг	Мощность, кВт (кВА)	Масса, кг
Трансформатор	5460	6200	6250	6500
Тяговый преобразователь с системой охлаждения и реактором сетевого фильтра	2700	6900	2800	4500
Тяговый электродвигатель	510	750	650	750
Блок тормозного резистора	850	1180	1800	2200
Вспомогательные преобразователи различного назначения	320	2830	270	1300
	160	1570	180	1100

* Источник: 1 — данные эксплуатационной документации на электропоезд ЭВС2, адаптированные авторами для сопоставимости с конфигурацией электрооборудования ЭВС360; 2 — по данным технического проекта электропоезда ЭВС360

* Source: 1 — data from the operational documentation for the EVS2 electric train, adapted by the authors for comparability with the equipment configuration of the EVS360; 2 — according to the technical design documentation for the EVS360 electric train

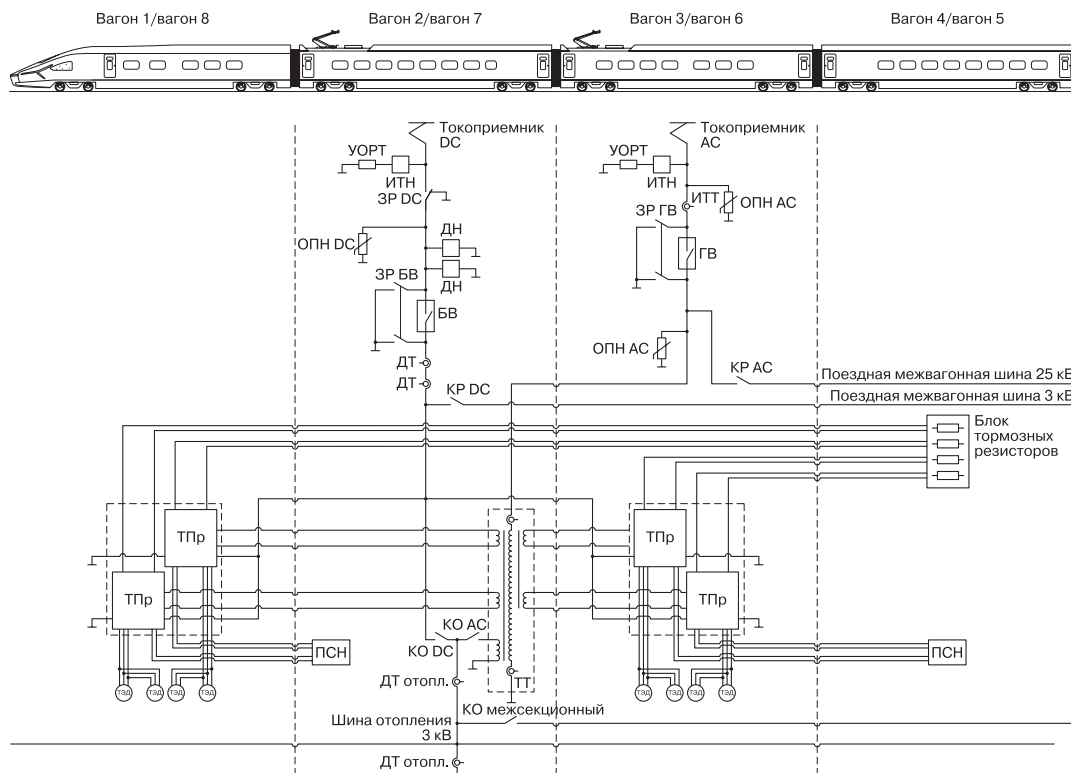


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема силовых цепей четырехвагонной секции электропоезда ЭВС360*:

БВ — быстродействующий выключатель постоянного тока; ГВ — главный выключатель переменного тока; ДН — датчик напряжения; ДТ — датчик тока; ЗР — заземляющий разъединитель; ИТН — измерительный трансформатор напряжения; ИТТ — измерительный трансформатор тока; КО — контактор отопления; КР — крышевой разъединитель; ОПН — ограничитель перенапряжений; ПСН — преобразователь собственных нужд; ТПр — тяговый преобразователь; ТТ — тяговый трансформатор; ТЭД — тяговый электродвигатель; УОРТ — устройство определения рода тока; АС — переменный ток; DC — постоянный ток

* Источник: данные авторов

Fig. 1. Principal electrical diagram of the power circuits of a four-car section of the EVS360 electric train*:

БВ — DC high-speed circuit breaker; ГВ — AC main circuit breaker; ДН — voltage sensor; ДТ — current sensor; ЗР — grounding switch; ИТН — voltage transformer; ИТТ — current transformer; КО — heating contactor; КР — roof disconnector; ОПН — surge arrester; ПСН — auxiliary power supply; ТПр — traction converter; ТТ — traction transformer; ТЭД — traction motor; УОРТ — power supply type detection device; АС — alternating current; DC — direct current

* Source: authors' data

включает по одному токоприемнику постоянного и переменного тока, два блока высоковольтного оборудования коммутации и защиты соответственно переменного и постоянного тока с устройствами автоматического определения рода тока, тяговый трансформатор, четыре тяговых преобразователя, восемь тяговых электродвигателей и блок тормозных резисторов. На каждом моторном вагоне установлено по четыре тяговых асинхронных электродвигателя и два тяговых преобразователя с отдельными каналами регулирования мощности каждой моторной тележки. Для обеспечения питания вспомогательных цепей в каждой секции предусмотрены два преобразователя собственных нужд различной конфигурации.

На втором и седьмом вагонах установлены токоприемники постоянного тока, на третьем и шестом — переменного тока. На крышах вагонов с токоприемниками также устанавливается высоковольтное оборудование коммутации и защиты, от которого получает питание тяговое электрооборудование вагонов. Оба токоприемника, как переменного, так и постоянного тока, соединены между собой соответствующими высоковольтными поездными межвагонными шинами, расположенными в крышечной части вагонов электро-

поезда. В случае неисправности части поездной цепи для возможности изолирования неисправных участков предусмотрены крышечные разъединители.

При питании электропоезда от тяговой сети переменного тока напряжение со вторичных обмоток тягового трансформатора подается на входы тяговых преобразователей, преобразователей собственных нужд и системы отопления. В режимах работы электропоезда от тяговой сети постоянного тока вторичные обмотки тягового трансформатора являются частью входного реактора сетевого фильтра, которые подключаются напрямую к промежуточному контуру тягового преобразователя.

Каждый тяговый преобразователь обеспечивает регулирование тягового момента и скорости вращения асинхронных тяговых двигателей. Тяговые электродвигатели одной тележки подключаются к инвертору напряжения, питающемуся от промежуточного контура преобразователя.

На рис. 2 представлены расчетные тяговые характеристики электропоезда при работе в режимах питания от тяговой сети переменного и постоянного тока, а также характеристики рекуперативного и реостатного торможения.

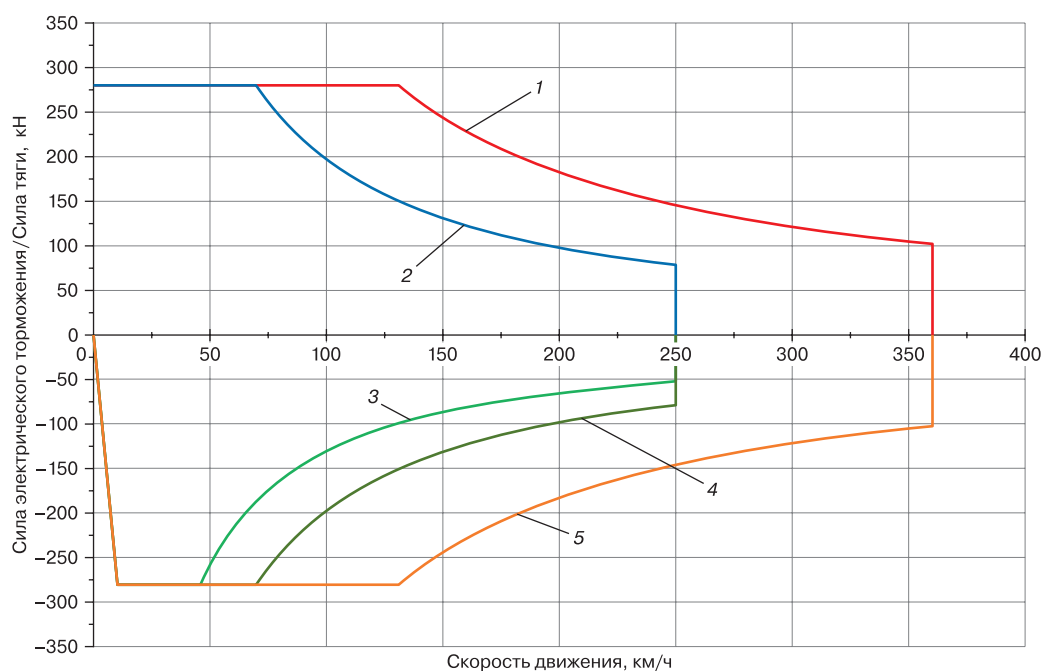


Рис. 2. Расчетные тяговые характеристики и характеристики электрического торможения электропоезда ЭВС360 при питании от тяговой сети переменного тока 25 кВ и постоянного тока 3 кВ*:

1 — тяговая характеристика на переменном токе; 2 — тяговая характеристика на постоянном токе; 3 — реостатное торможение; 4 — рекуперативное торможение на постоянном токе; 5 — рекуперативное торможение на переменном токе

* Источник: данные авторов

Fig. 2. Design traction and electric braking characteristics of the EVS360 electric train when powered from a 25 kV AC and 3 kV DC traction network*:

1 — traction characteristic on AC; 2 — traction characteristic on DC; 3 — rheostatic braking; 4 — regenerative braking on DC; 5 — regenerative braking on AC

* Source: authors' data

На этапе технического проектирования электропоезда разработчиком было установлено, что указанные характеристики реализуются при следующих параметрах тягового оборудования. Расчетная сила тяги, а также тормозная сила в режимах электрического торможения — 280 кН. Номинальная мощность на ободе колеса одиночного восьмивагонного электропоезда на участке постоянного тока — 5460 кВт, на участке переменного тока — 10 200 кВт. Передаточное отношение тягового редуктора — 2,56. При этом тяговые и тормозные показатели электропоезда, величины мощности, скорости, силы тяги и электрического торможения на ободе колесных пар должны обеспечиваться во всем диапазоне возможного изменения диаметра колес по кругу катания от 920 до 840 мм.

Силовые цепи электропоезда предполагают резервирование тяговых возможностей электропоезда при возникновении неисправностей токоприемника постоянного тока, крышевого разъединителя на постоянном токе, быстродействующего выключателя, токоприемника переменного тока, крышевого разъединителя на переменном токе, главного выключателя, тягового трансформатора, тягового преобразователя,

тягового электродвигателя и тормозного резистора на постоянном токе (рис. 3).

Моделирование движения электропоезда на проектируемой линии ВСМ-1 с использованием приведенных выше расчетных параметров и характеристик электропоезда подтвердило возможность выполнения всех основных требований технического задания. Расчетное значение среднего ускорения при разгоне полностью загруженного электропоезда при питании от тяговой сети переменного тока до скорости 100 км/ч составляет $0,455 \text{ м/с}^2$ при нормативе не менее $0,4 \text{ м/с}^2$. Движение с конструкционной скоростью 360 км/ч обеспечивается с остаточным ускорением более $0,05 \text{ м/с}^2$. Обеспечивается разгон незагруженного электропоезда до максимальной скорости 400 км/ч, а также трогание с места и движение на уклонах до 24‰. Значение пройденного пути при разгоне электропоезда в расчетных условиях загрузки из стоящего положения до конструкционной скорости 360 км/ч на прямом горизонтальном участке пути составит 37,2 км, время разгона — 533 с.

Тормозные характеристики. В рамках проекта особое внимание уделяется созданию необходимого оборудования, проведению полного цикла испытаний,

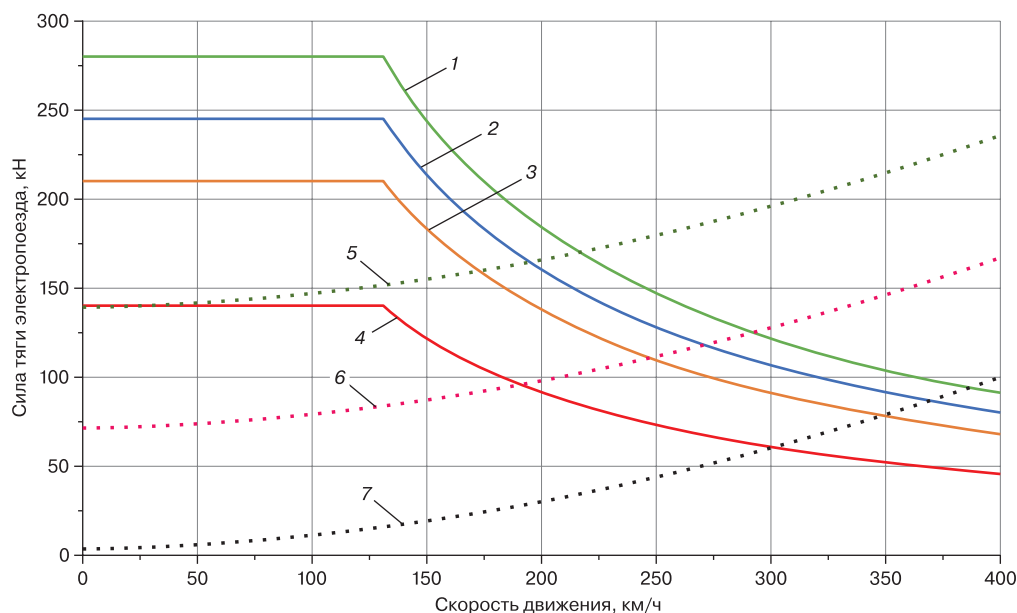


Рис. 3. Тяговые характеристики высокоскоростного электропоезда при питании от тяговой сети переменного тока при различных вариантах потери тяговой мощности в случае возникновения неисправностей электрооборудования, а также расчетная сила сопротивления движению полностью груженого электропоезда на площадке и уклонах 12‰ и 24‰*:

1 — сила тяги при 100 % мощности; 2 — при 87,5 % мощности; 3 — при 75 % мощности; 4 — при 50 % мощности; 5 — сопротивление движению на уклоне 24‰; 6 — на уклоне 12‰; 7 — на площадке (0‰)

* Источник: данные авторов

Fig. 3. Traction characteristics of a high-speed electric train when powered from an AC traction network under various scenarios of traction power loss due to electrical equipment failures, along with the calculated resistance to motion for a fully loaded electric train on a level track and on gradients of 12‰ and 24‰*:

1 — tractive effort at 100 % power; 2 — at 87,5 % power; 3 — at 75 % power; 4 — at 50 % power; 5 — resistance to motion on a 24‰ gradient; 6 — on a 12‰ gradient; 7 — on a level track (0‰)

* Source: authors' data

в том числе для выбора материалов фрикционной пары дискового тормоза «диск — тормозная колодка».

Электропоезд оснащается электродинамическим тормозом (рекуперативным и реостатным), автоматическим пневматическим тормозом, электропневматическим тормозом прямодействующего типа, автоматическим электропневматическим тормозом, стояночным пружинным тормозом.

Конфигурация автоматической пневматической тормозной системы восьмивагонного электропоезда включает систему управления тормозами (контроллер управления тормозами, кран резервного управления, систему «Эшелон», кнопку аварийного экстренного торможения, блок экстренного торможения, блок тормозного оборудования) и тормозные исполнительные механизмы (осевые и колесные тормозные диски, а также тормозные блоки с клещевыми механизмами на каждой колесной паре, рис. 4). Один из тормозных блоков каждой оси оборудован приводом стояночного тормоза.

Тормозные накладки имеют сборную конструкцию на несущем каркасе, который фиксируется в держателях накладки тормозного блока, и закрепленные на нем фрикционные элементы из порошкового металлокерамического материала на собственных каркасах.

До настоящего времени в России не производились необходимые материалы для фрикционных элементов — тормозных дисков и тормозных накладок, способных работать на скорости до 400 км/ч включительно. Несколько компаний предложили различные материалы и конструкции фрикционных элементов собственной разработки. Их испытания в различных

сочетаниях, проводимые на новом тормозном стенде, введенном в эксплуатацию в 2025 году на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ», позволят определить, как протекают термодинамические процессы в паре трения при различных условиях, а также отобрать наиболее перспективные решения для серийного изготовления. Расчетный динамический коэффициент трения между тормозным диском и накладкой для дальнейшего конструирования принят равным 0,32.

Система управления тормозами обеспечивает нормальный режим управления, пропорциональный режим управления и режим подъезда к тупику. В нормальном режиме система управления отдает приоритет электродинамическому тормозу, а пневматический тормоз, как замещающий, включается только при срыве электродинамического. При недостатке тормозной силы в нормальном режиме включается пропорциональный режим, в котором электродинамический тормоз на моторных осях работает совместно с пневматическим на немоторных осях. В режиме подъезда к тупику из условий обеспечения безопасности применяется только пневматический тормоз.

Система управления тормозами обеспечивает регулирование тормозной силы в зависимости от позиции тормозного контроллера и скорости движения электропоезда (табл. 2). При движении электропоезда со скоростью более 245 км/ч принято использовать пониженное значение тормозного усилия, что соответствует заданным ограничениям расчетной величины сцепления. Это позволит снизить риск возникновения юза из-за ухудшения сцепных свойств на высоких скоростях, а также снизить термическую нагрузку на тормозные диски.

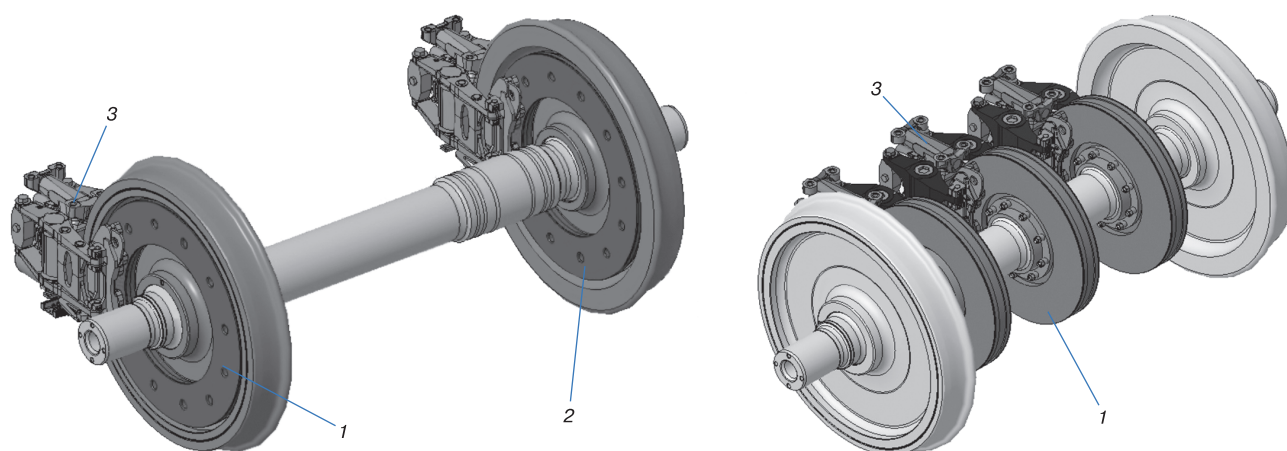


Рис. 4. Расположение тормозных дисков и тормозных блоков с клещевыми механизмами на моторной (слева) и немоторной (справа) осях*:
1, 2 — тормозные диски; 3 — тормозной блок

* Источник: данные авторов

Fig. 4. Arrangement of brake discs and brake blocks with calipers on a powered (left) and non-powered (right) axle*:
1, 2 — brake discs; 3 — brake block

* Source: authors' data

Таблица 2

Расчетные значения давлений в тормозных цилиндрах при экстренном торможении в зависимости от их размещения и скорости движения*

Table 2

Calculated pressure values in the brake cylinders during emergency braking as a function of their location and train speed*

Размещение тормозных цилиндров	Расчетное значение давления в тормозных цилиндрах в диапазоне скоростей, МПа	
	от 0 до 245 км/ч	от 246 до 360 км/ч
Моторные оси	0,37	0,29
Немоторные оси	0,34	0,24

* Источник: технический проект электропоезда ЭВС360

* Source: EVS360 electric train technical design documentation

Величина замедления электропоезда с максимальной загрузкой при экстренном торможении пневматическим тормозом новыми колесами диаметром 920 мм на прямом горизонтальном пути в зависимости от скорости движения приведена на рис. 5.

Моделирование процессов торможения электропоезда показало, что в режиме экстренного пневматического торможения при скорости начала торможения 360 км/ч расчетный тормозной путь электропоезда ЭВС360 составит 5644 м при нормативе не более 6140 м, а при скорости начала торможения 300 км/ч — 3791 м при нормативе не более 3900 м.

Аэродинамика. На высоких скоростях движения до 60 % тягового усилия поезда теряется на преодоление аэродинамического сопротивления и трения в типичных рабочих циклах. Поэтому важен рациональный подход к формообразованию высокоскоростного подвижного состава, учитывающий влияние аэродинамики воздушных масс в зонах головного обтекателя, ходовых частей, подвагонного оборудования, межавантных

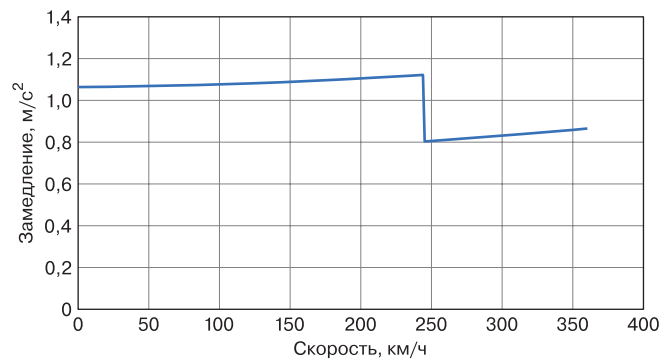


Рис. 5. Расчетная величина замедления электропоезда ЭВС360 при экстренном торможении пневматическим тормозом в зависимости от скорости движения*

* Источник: данные авторов

Fig. 5. Calculated deceleration rate of the EVS360 electric train during emergency braking with the pneumatic brake as a function of train speed*

* Source: authors' data

соединений, токоприемников и других выступающих элементов. Уменьшая только аэродинамическое сопротивление на 25 %, можно снизить расход электроэнергии на тягу от 8 до 15 % [13].

Основными стратегиями снижения сопротивления являются обтекаемость носовой и хвостовой части электропоезда, уменьшение срыва воздушного потока вокруг тележек, пантографа и кузова за счет установки направляющих, а также уменьшение поверхностного трения на крыше и боковых поверхностях кузовов вагонов (рис. 6).

При моделировании аэродинамики были определены основные принципы формообразования, позволившие снизить лобовое аэродинамическое сопротивление электропоезда ЭВС360. При разработке внешнего дизайна кузовов и элементов оборудования принимались

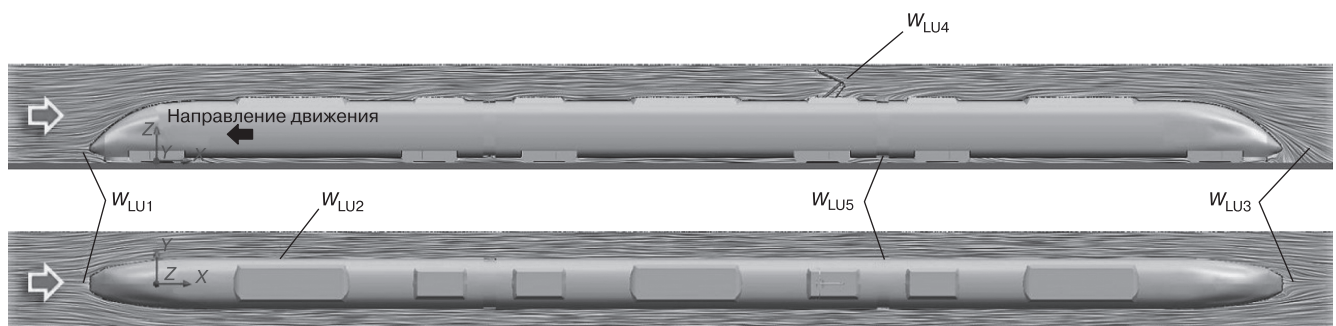


Рис. 6. Основные факторы, влияющие на аэродинамическое сопротивление движению при высоких скоростях*:

W_{LU1} — лобовое сопротивление; W_{LU2} — усилие сопротивления трению воздуха; W_{LU3} — отрыв потока от хвостовой части;

W_{LU4} — образование вихрей у токоприемника; W_{LU5} — усилие сопротивления в переходе между вагонами

* Источник: разработан авторами

Fig. 6. Main factors affecting aerodynamic drag at high speeds*:

W_{LU1} — nose pressure drag; W_{LU2} — skin friction drag; W_{LU3} — flow separation at the tail; W_{LU4} — vortex-induced drag at the current collector;

W_{LU5} — inter-car gap drag

* Source: authors' data

в расчет необходимость геометрической плавности линий и переходов между поверхностями, формирующими фронтальную маску и головной обтекатель, избегания щелей между поверхностями и угловыми переходами, расположения головной сцепки под носовым обтекателем, недопущения явных углублений и выступов на поверхности фронтальной маски, полного перекрытия фронтальной маской площади поперечного сечения кузова вагона (мидель) для предотвращения попадания набегающего воздуха внутрь элементов кузова. Согласно сделанным расчетам, перечисленные выше факторы позволят минимизировать энергопотребление и будут препятствовать образованию ледовых и снежных масс как на лобовой части электропоезда, так и в подвагонном и крышевом оборудовании.

Крышное оборудование, включая высоковольтные блоки защиты, антенны, разъединители, решено закрыть крышевыми обтекателями, выполненными из радиопрозрачных композитных материалов. Обтекатели частично прикрывают также ниши с токоприемниками, а внешний контур кареток токоприемников в сложном состоянии практически повторяет контур верхнего очертания кузова (рис. 7). Выбранный по результатам моделирования угол наклона лобовой поверхности фронтальной маски 22° относительно горизонтальной плоскости позволяет существенно снизить лобовое сопротивление и силы отрыва потока в хвостовой части. Угол наклона лобового стекла составляет 25° .

В соответствии с результатами исследований, изложенными в [14], следует, что полное перекрытие межвагонных промежутков практически ликвидирует срывные зоны и вихреобразование, приводит к уменьшению коэффициента аэродинамического сопротивления (C_x) на величину от $\Delta C_x = 0,06$ для трехвагонного и до $\Delta C_x = 0,15$ для десятивагонного поезда с хорошо обтекаемой головной и хвостовой частями.

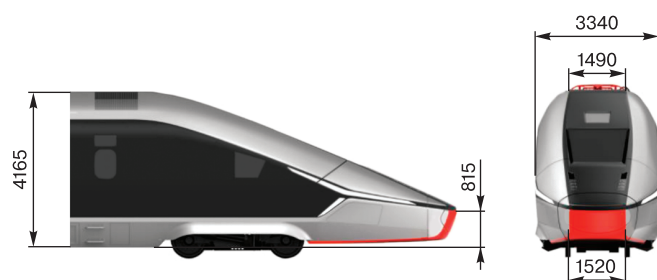


Рис. 7. Аэродинамическая форма лобовой части головного вагона электропоезда ЭВС360*

* Источник: данные авторов

Fig. 7. Aerodynamic shape of the front end of the EVS360 electric train's leading car*

* Source: authors' data

Однако, поскольку реализация этого решения представляет определенные технические сложности, в проекте предусматривается частичное перекрытие с равномерным отступом контура межвагонного перехода от внешнего контура кузова вагона менее чем на 30 мм.

После оптимизации конструкции электропоезда в соответствии с выбранными стратегиями, моделирование его аэродинамики показало, что расчетная величина аэродинамического сопротивления C_x для восьмивагонного электропоезда достигла значения 0,865 при скорости движения 360 км/ч, что соответствует современным характеристикам высокоскоростных поездов данного класса скорости и длины [15–16].

Сопротивление движению электропоезда. Проведенные мероприятия по оптимизации конструкции с учетом принятых технических решений по снижению аэродинамического сопротивления позволили определить расчетную величину сопротивления движению, учитывающую в том числе и аэродинамические процессы на высоких скоростях. Для целей тяговых расчетов в режимах тяги и электрического торможения могут быть приняты следующие характеристики основного удельного сопротивления движению электропоезда в режиме тяги и электрического торможения w'_o и в режиме выбега w_{ox} , Н/кН, определяемые по формулам:

$$w'_o = 0,621 + 0,0046 \cdot v + 0,000095 \cdot v^2; \quad (1)$$

$$w_{ox} = 0,621 + 0,0046 \cdot v + 0,000095 \cdot v^2 + (0,0815 + 0,0009 \cdot v), \quad (2)$$

где v — скорость движения электропоезда, км/ч.

При проследовании нейтральных вставок для обеспечения комфорта электрооборудование электропоезда переводится в режим электрического торможения для осуществления подпитки вспомогательных цепей. Поэтому для целей повышения точности тяговых расчетов целесообразно учитывать дополнительные потери скорости за время проследования нейтральных вставок из-за увеличения сопротивления движению в этом режиме. Величину дополнительного удельного сопротивления движению $w_{доп}$, Н/кН, при проследовании нейтральных вставок предлагается учитывать в соответствии с формулой:

$$w_{доп} = 3600 \cdot P_{сн} / (\eta_{ТЭД} \cdot \eta_{ТИ} \cdot \eta_{ПСН} \cdot 9,81 \cdot M \cdot v) = 0,739 \cdot P_{сн} / v,$$

где $P_{сн}$ — средняя мощность потребителей собственных нужд в поезде, кВт;

$\eta_{ТЭД}$ — коэффициент полезного действия тягового электродвигателя;

$\eta_{ТИ}$ — коэффициент полезного действия тягового инвертора;

$\eta_{\text{ПСН}}$ — коэффициент полезного действия преобразователя собственных нужд;

M — масса электропоезда, т.

Удельный расход электроэнергии. Для оценки энергетических показателей работы электропоезда ЭВС360 проведены варианты тяговые расчеты расхода электроэнергии в различных эксплуатационных условиях. В качестве крайних режимов (с точки зрения энергетических показателей) приняты режимы движения на расчетном участке протяженностью 678,1 км с расчетным профилем пути, аналогичным проекту ВСМ без промежуточных остановок и с 12 остановками на промежуточных платформах.

Расчеты выполнены с применением разработанной в АО «ИЦ ЖТ» расчетной математической модели методом прямого интегрирования уравнений движения по времени в заданных расчетных условиях и представленных выше расчетных тягово-энергетических характеристик электропоезда ЭВС360. В расчете принимались: число пассажиров в электропоезде — 452, расчетная масса электропоезда — 576 т, средняя мощность потребителей собственных нужд в поезде — 740 кВт. Моделирование проводилось на минимальное время хода (без учета эксплуатационных

запасов по времени), время стоянки на промежуточных остановочных пунктах в расчете не учитывалось. При проезде нейтральных вставок принималось в расчет дополнительное сопротивление движению от рекуперации энергии для потребителей собственных нужд, время проследования нейтральных вставок принималось равным 20 с.

На рис. 8 представлены диаграммы зависимостей удельного расхода электроэнергии для этих режимов в зависимости от минимального времени хода по участку.

По результатам расчетов установлено, что максимальная техническая скорость¹⁰ при движении без остановок и без эксплуатационного запаса составит 314 км/ч, а с нормативным эксплуатационным запасом 8–10 % — около 285 км/ч (соответствует времени хода около 2 ч 23 мин). Удельный расход электроэнергии при этом составит 55–60 Вт·ч/пасс-км, что примерно на 40–50 % выше среднего расхода электроэнергии электропоездами ЭВС1/ЭВС2 «Сапсан» в регулярной эксплуатации.

Минимальное время хода в режиме движения с 12 остановками в расчетных условиях движения составит не менее 2 ч 55 мин без учета времени стоянки

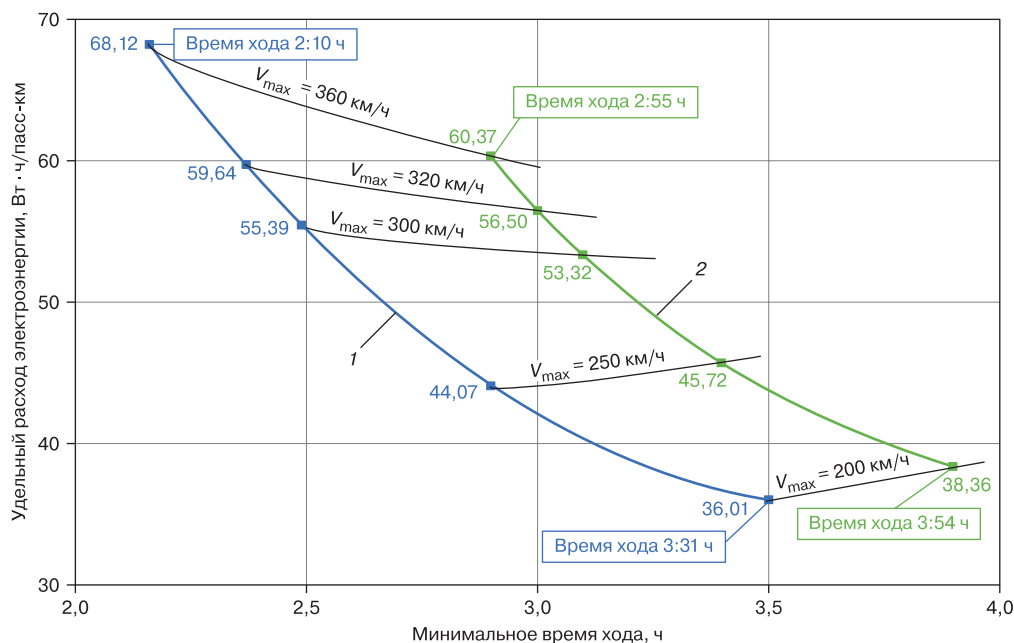


Рис. 8. Удельный расход электроэнергии на одно пассажирское кресло электропоезда ЭВС360 на расчетном участке протяженностью 678,1 км в режимах движения без остановок (1) и с 12 промежуточными остановками (2) в зависимости от минимального времени хода при различных допустимых скоростях движения (V_{max})*

* Источник: данные авторов

Fig. 8. Specific electric energy consumption per passenger seat for the EVS360 electric train operating on 678,1 km designed section in non-stop mode (1) and mode with 12 intermediate stops (2) as a function of minimum running time for various permissible speeds (V_{max})*

* Source: authors' data

¹⁰ Техническая скорость на железнодорожном транспорте — это средняя скорость движения поезда по перегону с учетом времени на разгон и замедление, но без учета времени стоянок на промежуточных станциях.

на промежуточных пунктах. Возможное расчетное графическое время хода на маршруте с остановками с учетом эксплуатационного запаса может составить примерно 3 ч 30 мин.

В результате проведенных работ определены расчетные значения тяговых, тормозных параметров и характеристик электропоезда ЭВС360, обеспечивающих соответствие проекта условиям и требованиям концессионного соглашения, которые были приняты для дальнейшего использования при конструировании электропоезда и его тягового электрооборудования, а также для внесения в стандарты и другие нормативные документы, регулирующие вопросы разработки высокоскоростных электропоездов.

Обсуждение и заключение. Выполнен значительный объем проектных, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию высокоскоростного электропоезда для российских высокоскоростных магистралей. Анализ результатов работы позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Принятые при разработке электропоезда ЭВС360 проектные решения, включая параметры, характеристики и алгоритмы работы тягового и тормозного оборудования, обеспечивают выполнение основных тягово-энергетических показателей, установленных требованиями технического задания и условиями концессионного соглашения.

2. Результаты моделирования аэродинамики электропоезда ЭВС360 позволили оптимизировать форму кузова и привести показатели воздушного сопротивления к значениям, обеспечивающим выполнение тягово-энергетических показателей. Коэффициент аэродинамического сопротивления C_x восьмивагонного электропоезда при скорости движения 360 км/ч составил 0,865.

3. По результатам проектирования электропоезда ЭВС360 подтверждена возможность обеспечить соответствие требованиям обеспечения максимальной нагрузки не более 18 т/ось. Имеется потенциал для ее дальнейшего снижения.

4. Определены расчетные тяговые, тормозные характеристики и величина удельного сопротивления движению электропоезда ЭВС360.

5. По результатам проведенных расчетов максимальная техническая скорость при движении без остановок без эксплуатационного запаса составит 314 км/ч. Удельный расход электроэнергии при этом составит 55–60 Вт · ч/пасс-км.

6. Для подтверждения соответствия требованиям и верификации расчетных эксплуатационных показателей высокоскоростного электропоезда запланированы испытания на участке Алабушево – Новая Тверь строящейся высокоскоростной магистрали ВСМ-1 Москва – Санкт-Петербург.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи, а также инженерам Чекмареву А. Е. и Загребельскому Д. А. за помощь в подготовке расчетных данных для анализа.

Acknowledgments: the authors express gratitude to the reviewers for useful comments that contributed to the improvement of the article, and engineers Chekmarev A. E. and Zagrebel'sky D. A. for assistance in calculated data analysis compilation.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и публикации данной статьи.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кобзев С. А. О реализации проекта строительства ВСЖМ-1 Москва – Санкт-Петербург // Железнодорожный транспорт. 2021. № 2. С. 5–9. EDN: <https://elibrary.ru/vmfydx>.
2. Kobzev S. A. The implementation of the Moscow – Saint Petersburg high-speed railway construction project. *Railway Transport*. 2021;(2):5–9. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vmfydx>.
3. Косарев А. Б., Назаров О. Н. Научная поддержка развития высокоскоростного движения // Железнодорожный транспорт. 2008. № 4. С. 23–26. EDN: <https://elibrary.ru/ilhkpx>.
4. Kosarev A. B., Nazarov O. N. Scientific support for the development of high-speed traffic. *Railway Transport*. 2008;(4):23–26. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ilhkpx>.
5. Киселев И. П., Назаров О. Н. Развитие высокоскоростного подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2019. № 7. С. 65–77. EDN: <https://elibrary.ru/xblncr>.
6. Kiselev I. P., Nazarov O. N. Development of high-speed rolling stock. *Railway Transport*. 2019;(7):65–77. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/xblncr>.
7. Киселев И. П., Бущев Н. С., Шулман Д. О. High-Speed Railways in the BRICS Countries. *BRICS Transport*. 2023;2(4):1–13. <https://doi.org/10.46684/2023.4.6>. EDN: <https://elibrary.ru/wcrpncg>.
8. Назаров О. Н. Оптимальные решения для ВСМ-2 Москва – Екатеринбург: выбор основных параметров высокоскоростного электропоезда // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2015. № 6. С. 16–22. EDN: <https://elibrary.ru/uygzpj>.
9. Nazarov O. N. The most appropriate solutions for Moscow – Yekaterinburg HSR Project: definition of the High-Speed EMU train key parameters. *Russian Railway Science Journal*. 2015;(6):16–22. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/uygzpj>.
10. Андреев В. Е. Engineering of an electric train for the first phase of the high-speed railway network in Russia. *BRICS Transport*. 2025;4(3):1–7. <https://doi.org/10.46684/2025.3.02>. EDN: <https://elibrary.ru/buyfaz>.
11. Mezher S. B., Connolly D. P., Woodward P. K., Laghrouche O., Pombo J., Costa P. A. Railway critical velocity — Analytical prediction and analysis. *Transportation Geotechnics*. 2016;6:84–96. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.09.002>.
12. Choi Y.-S., Shin B.-S. Critical speed of high-speed trains considering wheel-rail contact. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015;29:4593–4600. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-1004-2>.

9. Sun J., Chi M., Jiao W., Jiang Y., Li G., Shi J. Z. Modal parameters-based hunting stability analysis of high-speed railway vehicles considering full range of equivalent conicity. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*. 2022;236(3):422–439. <https://doi.org/10.1177/14644193221103211>.

10. Watson I., Ali A., Bayyati A. Energy efficiency of high-speed railways. *Advances in Environmental and Engineering Research*. 2022;3(4):055. <https://doi.org/10.21926/aer.2204055>.

11. Смирнов В.Н., Дьяченко Л.К. Учет резонансных явлений при проектировании мостов на ВСМ // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 6. С. 30–33. EDN: <https://elibrary.ru/rahnwh>.

Smirnov V.N., Dyachenko L.K. High-speed railway bridges design with resonant vibrations of elements “bridge-train” system. *Railway Track and Facilities*. 2021;(6):30–33. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/rahnwh>.

12. Zhai W., Wang S., Zhang N., Gao M., Xia H., Cai C., Zhao C. High-speed train–track–bridge dynamic interactions — Part II: experimental validation and engineering application. *International Journal of Rail Transportation*. 2013;1(1–2):25–41. <https://doi.org/10.1080/23248378.2013.791497>.

13. Чурков Н.А. Аэродинамика железнодорожного поезда: принципы конструирования подвижного состава, минимизирующие воздействия воздушной среды на железнодорожный поезд. М.: Желдориздат, 2006. 331 с. EDN: <https://elibrary.ru/qnunqv>.

Churkov N.A. *Railway train aerodynamics: principles of rolling stock design that minimize the effects of the air environment on a railway train*. Moscow: Zheldorizdat; 2006. 331 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/qnunqv>.

14. Кравец В.В., Кравец Е.В. Аэродинамика частично перекрытого межвагонного пространства скоростного поезда // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна. 2005. № 8. С. 61–69. EDN: <https://elibrary.ru/vvifdb>.

Kravets V.V., Kravets E.V. Aerodynamics partially closed receptacle space high-speed trains. *Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan*. 2005;(8):61–69. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vvifdb>.

15. Raghunathan R.S., Kim H.-D., Setoguchi T. Aerodynamics of high-speed railway train. *Progress in Aerospace Sciences*. 2002;38(6–7):469–514. [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(02\)00029-5](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(02)00029-5).

16. Kim S.-W., Kwon H.-B., Kim Y.-G., Park T.-W. Calculation of resistance to motion of a high-speed train using acceleration measurements in irregular coasting conditions. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2006;220(4):449–459. <https://doi.org/10.1243/0954409JRR74>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Евгеньевич АНДРЕЕВ,

канд. техн. наук, начальник Департамента технической политики ОАО «РЖД» (ЦТЕХ, 107174, Россия, г. Москва, Новая Басманная ул., 2/1, стр. 1), Author ID: 1045354, <https://orcid.org/0009-0006-4059-9654>

Олег Николаевич НАЗАРОВ,

канд. техн. наук, заместитель начальника Департамента технической политики ОАО «РЖД» (ЦТЕХ, 107174, Россия, г. Москва, Новая Басманная ул., 2/1, стр. 1), SPIN-код: 5569-8682, <https://orcid.org/0000-0001-6018-1454>

Александр Александрович КИРЕЙЦЕВ,

генеральный директор, АО «Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта» (АО «ИЦ ЖТ», 121205, г. Москва, инновационный центр Сколково, Большой бул., д. 40)

Андрей Николаевич ГАЛАХОВ,

главный конструктор по подвижному составу, АО «Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта» (АО «ИЦ ЖТ», 121205, г. Москва, инновационный центр Сколково, Большой бул., д. 40)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir E. ANDREEV,

Cand. Sci. (Eng.), Head of Technical Policy Department of JSC “Russian Railways” (107174, Moscow, bldg. 1, 2/1, Novaya Basmannaya St.), Author ID: 1045354, <https://orcid.org/0009-0006-4059-9654>

Oleg N. NAZAROV,

Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Technical Policy Department of JSC “Russian Railways” (107174, Moscow, bldg. 1, 2/1, Novaya Basmannaya St.), SPIN-code: 5569-8682, <https://orcid.org/0000-0001-6018-1454>

Alexander A. KIREYTSEV,

General Director, JSC “Engineering Center of Railway Transport” (121205, Moscow, Skolkovo Innovation Centre, 40, Bolshoi Blvd.)

Andrey N. GALAKHOV,

Chief Designer for Rolling Stock, JSC “Engineering Center of Railway Transport” (121205, Moscow, Skolkovo Innovation Centre, 40, Bolshoi Blvd.)

ВКЛАД АВТОРОВ

Владимир Евгеньевич АНДРЕЕВ. Обоснование направления исследования, формулировка цели и задач. Формирование выводов и предложений (20 %).

Олег Николаевич НАЗАРОВ. Разработка метода исследования, анализ полученных данных. Написание текста статьи. Формирование выводов и предложений (40 %).

Александр Александрович КИРЕЙЦЕВ. Методическое и научное сопровождение, научное редактирование статьи (20 %).

Андрей Николаевич ГАЛАХОВ. Обзор основных направлений исследования, сбор и структурирование исходных данных (20 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vladimir E. ANDREEV. Substantiation of the research direction, goals and objectives formulation. Conclusions and suggestions generation (20 %).

Oleg N. NAZAROV. Development of a research method, analysis of the obtained data. Article text writing. Conclusions and suggestions generation (40 %).

Alexander A. KIREYTSEV. Methodological and scientific support, scientific editing (20 %).

Andrey N. GALAKHOV. Overview of the main research directions, collection and structuring of the initial data (20 %).

Электронная версия статьи обновлена 08.07.2026. Печатная версия данного номера содержит первоначальный текст статьи без учета настоящих правок.

The online version of record was updated on 08.07.2026. The printed version of the issue contains the original text without the corrections.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 26.12.2025, рецензия от первого рецензента получена 19.01.2026, рецензия от второго рецензента получена 29.01.2026, принята к публикации 05.02.2026.

The article was submitted 26.12.2025, first review received 19.01.2026, second review received 29.01.2026, accepted for publication 05.02.2026.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 625.031.1

EDN: <https://elibrary.ru/kyxvvn>

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-24-37>

Научная специальность: 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог



Моделирование контактного взаимодействия колеса с неравномерным прокатом периодической формы и рельса профиля Р65 для высокоскоростного движения

М. А. Морковников✉, Е. С. Ашпиз

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. При движении поезда со скоростью выше 250 км/ч значительное влияние на путь оказывают неровности на колесе — как изолированные, так и непрерывные. В настоящем исследовании рассматривается влияние особого вида неравномерного проката, представляющего собой волнообразный износ поверхности катания колеса, описываемый гармоническими функциями. Целью работы является верификация конечно-элементной модели качения колеса по рельсу.

Материалы и методы. Методом конечных элементов определена величина эквивалентных напряжений и перемещений рельса профиля Р65 при различной глубине неравномерного проката волнообразной формы на скорости движения колеса 300 км/ч.

Результаты. Построена конечно-элементная модель взаимодействия колеса и рельса профиля Р65, позволяющая учитывать неравномерный прокат поверхности катания колеса. Проведена верификация модели по аналитическим зависимостям и по аналогичному исследованию. Проведено исследование влияния неравномерного проката на контактную силу между колесом и рельсом, а также графиков изменения контактной силы между колесом и рельсом при различной глубине неравномерного проката периодической формы. Показано, что на скорости движения 300 км/ч силовое воздействие от колеса на рельс увеличивается на 11 % при изменении глубины дефекта от 0 до 0,2 мм, в то время как перемещения и напряжения меняются менее значительно (на 8,5 %).

Обсуждение и заключение. Для валидации представленной конечно-элементной модели потребуется ее интеграция с моделью верхнего строения железнодорожного пути, данные по обмерам поверхности катания колесных пар и результаты их воздействия на путь. Особая необходимость возникает в измерениях в направлении круга катания, т. к. подобные результаты от отечественных авторов в открытом доступе почти не представлены. Приведенная модель может быть использована для анализа влияния неравномерного проката при высокоскоростном движении на динамику поведения элементов верхнего строения пути.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: колесо вагона, рельс Р65, качение колеса по рельсу, неравномерный прокат, отклонение от круглости, динамическое воздействие, высокоскоростное движение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Морковников М. А., Ашпиз Е. С. Моделирование контактного взаимодействия колеса с неравномерным прокатом периодической формы и рельса профиля Р65 для высокоскоростного движения // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2026. Т. 85, № 1. С. 24–37. EDN: <https://elibrary.ru/kyxvvn>.

Original article
UDK 625.031.1
EDN: <https://elibrary.ru/kyxvvn>
DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-24-37>
Scientific specialty: 2.9.2. Railway track, survey and design of railways



Contact interaction simulation of uneven wheel rolling of periodic shape and R65 profile rail for high-speed movement

Matvei A. Morkovnikov✉, Evgeny S. Ashpiz

Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. At speeds above 250 km/h, significant impact on the way have not only isolated, but also continuous irregularities. The research examines the effect of a specific type of uneven rolling, known as wavy wear of wheel thread described by harmonic functions. The aim of the study is to verify finite element model of wheel rolling along the rail.

Materials and methods. Finite-element method is the main tool to investigate the problem in question. The value of equivalent stresses and R65 profile rail displacements at different depth of uneven rolling of wave-type shape at 300 km/h wheel speed was determined.

Results. The authors designed finite-element model of interaction between wheel and R65 profile rail, which allows to consider uneven rolling of rail surface, and verified it using analytical dependencies and a similar study. A study was conducted on the effect of uneven rolling on contact force between wheel and rail. Contact force curve between wheel and rail at various depths of uneven rolling of periodic shape is presented. It is shown that force effect from wheel to rail at 300 km/h speed increases by 11 % with a change of defect depth from 0 to 0.2 mm, while displacements and stresses change is less significant (by 8.5 %).

Discussion and conclusion. Further validation of the presented finite element model would require its integration with railway superstructure, as well as data on the measurements of the rolling surface and measurement results of their impact on the track. It is also necessary to provide measurements in the direction of rolling circle, since such results are not publicly available. The presented model may be employed for the analysis of uneven wheel rolling effect on dynamic behaviour of high-speed main lines.

KEYWORDS: wagon wheel, R65 profile rail, uneven wheel rolling along the rail, out-of-roundness, circularity deviation, dynamic impact, high-speed movement

FOR CITATION: Morkovnikov M.A., Ashpiz E.S. Contact interaction simulation of uneven wheel rolling of periodic shape and R65 profile rail for high-speed movement. *Russian Railway Science Journal*. 2026;85(1):24–37. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-24-37>.

Введение. На текущий момент в нашей стране ведется реализация проекта строительства высокоскоростной железнодорожной магистрали ВСЖМ-1 Москва – Санкт-Петербург, которая требует пересмотра некоторых подходов к оценке взаимодействия колеса и рельса, сформированных еще в середине прошлого столетия на основе экспериментов при других условиях эксплуатации на меньших скоростях. При этом важной представляется оценка динамического воздействия на путь от непрерывных неровностей на поверхности катания колеса при высоких скоростях движения. Изучением влияния неравномерного проката на путь в последние годы занимаются в странах, где уже реализовано высокоскоростное движение [1–9], при этом такая неровность на колесах за рубежом исторически названа термином «полигональность» [1]. В приведенных работах авторами выявлено влияние глубины и длины волны неравномерного проката на контактную силу между колесом и рельсом при различных скоростях движения экипажа, а также рассмотрены возможные причины образования неравномерного проката периодической формы, которая проявляется в наличии волнообразного износа в окружном направлении обода колеса.

Под непрерывными неровностями на поверхности катания колеса в данной статье приняты отклонения формы продольного сечения колеса от идеальной окружности, которые имеют протяженность по всей длине круга катания и во время движения железнодорожного подвижного состава оказывают безударное циклическое воздействие на путь¹. К таким неровностям согласно отечественной нормативной документации² относятся кольцевая выработка, а также равномерный и неравномерный прокат. Последний характеризуется износом поверхности катания колеса, при котором форма колеса в окружном направлении отличается от идеального круга. В настоящем исследовании речь идет о неравномерном прокате, который в соответствии с руководящей документацией измеряется шаблоном в трех точках с шагом 500 мм по длине окружности колеса. Описанный метод измерения позволяет быстро диагностировать неравномерный прокат, но не отражает реальной формы поверхности катания колеса. Она может иметь на своей поверхности несколько впадин и горбов — то есть обладать волнообразностью с разной длиной волны подобно той, что встречается на рельсах³. Частным случаем этой волнообразности является овальность колеса, когда длина

волны непрерывной неровности равна половине длины окружности колеса. Хотя овальность и фигурирует в руководящем документе, в нем не описан тип дефекта, для которого длина волны непрерывной неровности по кругу катания составляет 1/3, 1/4 и т.д. от длины окружности колеса (полигональности). Современных исследователей интересует природа образования этого дефекта, его взаимосвязь с короткими неровностями на рельсе и его воздействие на путь и элементы экипажа, в основном применительно к высокоскоростному движению.

Ввиду активного развития высокоскоростного движения в нашей стране, представляется важным оценить величину воздействия волнообразного неравномерного проката поверхности катания колеса на путь, для чего необходимо рассмотреть теоретические основы этого воздействия и разработать численную модель.

Впервые сведения о форме поверхности катания колеса в окружном направлении в нашей стране были приведены профессором Г. М. Шахунянцем в 40-х гг. XX века⁴. По результатам нескольких обмеров поверхности катания колес ведущих осей паровоза была получена кривая, описывающая овальную форму поверхности катания колеса. На основе этого было предложено представлять форму поверхности катания колеса в окружном направлении с помощью ряда (1), при этом порядок n ограничивается некоторым конечным значением (например, для овальности $n = 2$).

$$\eta = e_0 + \sum_{n=1}^{\infty} e_n \cos(n\omega t) + d_n \sin(n\omega t), \quad (1)$$

где η — координата описания формы поверхности катания колеса, м;

n — индекс и порядок гармонической функции;

e_n, d_n — коэффициенты разложения неровности в ряд, м;

e_0 — постоянный член разложения (физический смысл — эксцентриситет), м;

ω — циклическая частота вращения колеса, рад/с;

t — время, с.

В последующем профессор М. Ф. Вериге [10] отмечал, что наиболее удобно представлять форму колес в пространственных координатах $\eta = \eta(s)$, где s — координата вдоль длины окружности. Информации о форме поверхности катания колес в окружном направлении для отечественных единиц подвижного состава на тот момент (в 1980-е гг.) не было, за исключением

¹ Шахунянец Г. М. Устройство железнодорожного пути: в 3 т. Т. 3. 2-е изд. М.: Трансжелдориздат, 1944. 483 с.

² РД ВНИИЖТ 27.05.01-2017. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм: утв. протоколом Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества 19–20 октября 2017 г. № 67. 242 с.

³ Алижан А. Влияние динамических процессов в системе «колесо — рельс» на образование волнообразных неровностей на поверхности катания рельсов: дисс. канд. техн. наук: 05.22.07. М., 2010. 154 с.

⁴ Шахунянец Г. М. Устройство железнодорожного пути.

работ [11–12], и, насколько известно авторам данной статьи, новых исследований не опубликовано и по сей день. Однако результаты обмеров неравномерного проката широко представлены в иностранных источниках для зарубежных единиц подвижного состава, в том числе высокоскоростного.

Примечательно, что в работе [11] приведено спектральное разложение в ряд Фурье результатов измерений поверхности катания колес пассажирских и грузовых вагонов, проведенных с помощью специального шаблона с точностью отсчета $\pm 0,005$ мм в точках поверхности среднего круга катания колес. Согласно результатам спектрального анализа, замеры показали наличие максимумов на номерах гармоник 2 и 6, т.е. обмеренные колеса по центральному кругу катания имели форму с преобладанием волн, которые составляли половину и шестую часть от полной длины окружности колеса.

В работе профессора В. Ф. Яковлева [12, с. 146] приведено исследование влияния волнообразных неровностей поверхности катания колеса на путь. Показано, что неровность с пятью полуволнами глубиной 3 мм оказывает значительное воздействие на путь: сила в контакте «колесо – рельс» при движении экипажа со скоростью 240 км/ч составляет 441 кН (45 тс).

Неровность такой глубины является, вероятно, теоретической, т.к. на практике волнообразные (синусоидальные) неровности колеса имеют глубину порядка десятых долей миллиметра.

Форму поверхности катания для колеса с полигональностью за рубежом, как и в нашей стране, принято задавать согласно выражению (1), а влияние на путь изучается как с помощью аналитических [2] и численных методов [3], так и экспериментально [4], либо с помощью смешанного подхода: эксперимент и модель [5]. Сложность моделей при этом варьируется значительно: так, например, в исследовании [5] авторы включили в модель термопластичные свойства материала колеса для изучения причин зарождения и развития неравномерного проката. В настоящей статье эти вопросы остаются вне предмета рассмотрения.

Проведено большое количество сплошных обмеров поверхности катания колес в Нидерландах [1], затем — в Германии и Швеции [2, 6]. В работе Дж. С. О. Нильсена и А. Йоханссона [6] собрана информация о различных видах отклонений от круглости поверхности катания колес в их продольном сечении. В частности, приведен пример деформированной формы колес немецких поездов ICE 2 (рис. 1).

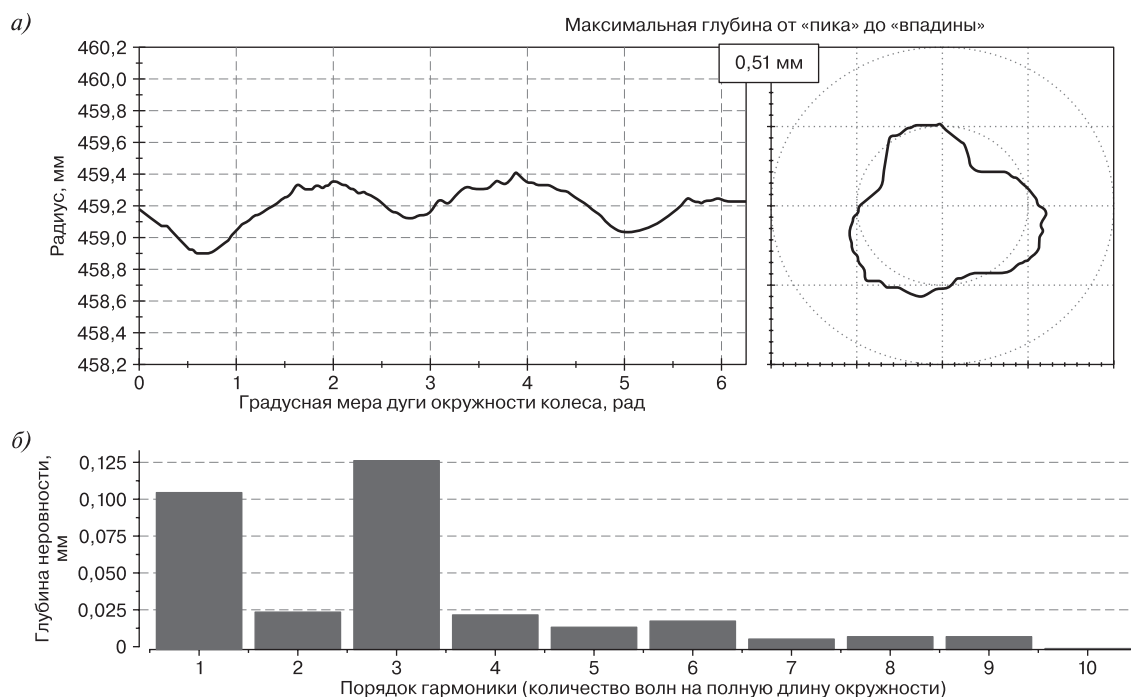


Рис. 1. Форма поверхности катания колесных пар подвижного состава ICE 2 (масштаб неровностей увеличен для наглядности)*:
а — развертка окружности колеса и циклическая диаграмма этой же окружности; б — спектр развертки окружности колеса (разложение в ряд Фурье по гармоникам)

* Источник: [6]

Fig. 1. Wheel irregular shape in its circumferential section for the ICE 2 rolling stock (the irregularity depth is exaggerated)*:
а — the display of wheel circumference and cyclic diagram of the same circle; б — the spectrum of the display of the wheel circumference (Fourier series expansion by harmonics)

* Source: [6]

Результаты измерений показали, что колесо имеет периодическую непрерывную неровность с длиной волны около 900 мм, что составляет 1/3 от длины окружности центрального круга катания колеса подвижного состава ICE, более современная модификация которого (ЭВС «Сапсан», платформа Siemens Velaro RUS) эксплуатируется на Октябрьской железной дороге. На рис. 1, б представлена амплитудно-частотная характеристика развертки колеса, при этом в качестве частоты используется порядок неровностей (число волн на полную длину окружности).

С начала 2010-х гг. появились исследования китайских ученых, в которых тематика волнообразности колес фигурирует также под термином «полигональность», при этом рассматривались как колеса вагонов метро, так и неровности на колесных парах высокоскоростного подвижного состава. Так, в обзорной статье [7] представлена форма окружности колеса по центральному кругу катания для поездов CRH3, построенных на базе платформы Siemens Velaro (рис. 2). По результатам замеров было выявлено, что поверхность катания колеса имеет четкую волнообразную форму с преобладанием гармоник 19-го порядка, т. е. на колесе было выявлено 19 волн (каждая по 152 мм) на полный круг катания. На рис. 2 по радиальному направлению круговой диаграммы отложена глубина измеренной неровности.

Примечательно, что форма колес одного и того же подвижного состава на китайских железных дорогах существенно отличается от результатов обмеров колес, полученных на европейских дорогах. Более того, преобладающая гармоника (т. е. количество волн) в форме

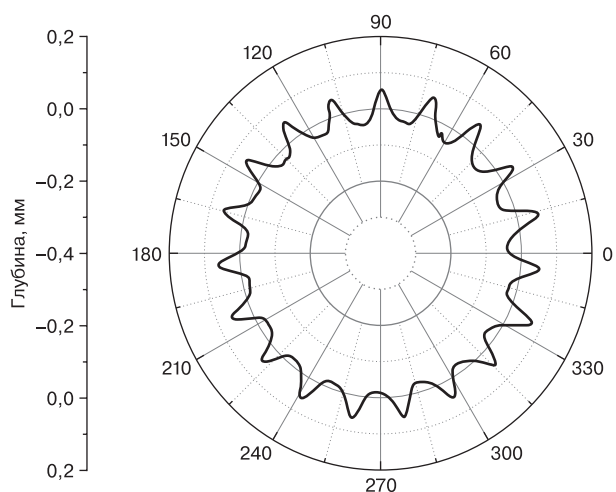


Рис. 2. Форма поверхности катания колеса подвижного состава CRH3 (масштаб неровностей увеличен для наглядности)*
* Источник: [7]

Fig. 2. Shape of wheel rolling for the CRH3 rolling stock (the irregularity depth is exaggerated)*
* Source: [7]

поверхности катания колеса может различаться в зависимости от типа экипажа, характеристик пути, скоростного режима и особенностей взаимодействия пути и подвижного состава: например, на железных дорогах КНР встречается волнообразный прокат не только с 19-ю волнами [7], но и с количеством волн, равным 23–24 [8]. Таким образом, для определения формы поверхности катания на отечественных единицах подвижного состава, в том числе зарубежного производства, имеет смысл провести собственные обмеры и сравнить результаты с приведенными в иностранных источниках.

Цель настоящего исследования — верификация конечно-элементной модели качения колеса по рельсу с учетом неравномерного проката волнообразной формы. Характер проката колеса подобен тому, что приведен в уже рассмотренных публикациях. В текущей работе рассматривается рельс профиля Р65 при эпюре шпал 1840 шт/км, поэтому в настоящем исследовании проводится качественная оценка работы предлагаемой модели в сравнении с зарубежными моделями. Численная верификация модели выполняется по растягивающим напряжениям в подошве рельса по аналитическим зависимостям. Далее исследуется изменение контактной силы между колесом и рельсом при скорости движения 300 км/ч в зависимости от глубины неравномерного проката периодической формы.

Материалы и методы. Аналитическая оценка воздействия на рельс движущегося колеса с непрерывной неровностью проблематична. Данная задача может быть решена с помощью численного моделирования с применением метода конечных элементов (далее — КЭ) в программном комплексе ABAQUS. При дальнейшем изучении данного вопроса использование КЭ модели может сократить количество натурных испытаний при условии, что модель была верифицирована и валидирована. В данной статье приведено описание разработки и верификации КЭ модели взаимодействия рельса и колеса с непрерывной неровностью. Валидация модели, однако, еще не проведена, и вопрос оставлен на рассмотрение в последующих работах после выполнения экспериментов на опытном полигоне ВСЖМ-1.

Предлагаемая модель включает в себя колесо, обрессоренную массу и рельс на дискретных опорах (рис. 3). Подобные модели широко представлены в литературе, но новизна заключается в том, что она впервые использована для исследования влияния полигональности колес на путь с рельсом Р65 и может быть в дальнейшем включена в более общую модель пути для более предметного исследования влияния колеса конкретного подвижного состава на конкретную конструкцию пути. Например, она может быть интегрирована с КЭ моделью безбалластной конструкции верхнего строения пути (далее — БВСП) как наиболее перспективной для ВСЖМ-1 Москва — Санкт-Петербург.

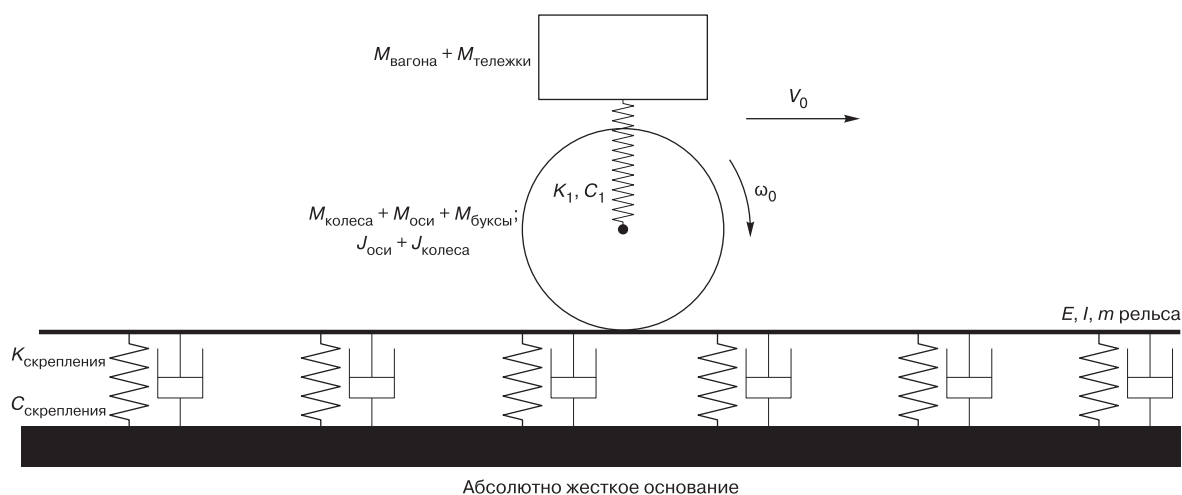


Рис. 3. Принципиальная схема КЭ модели взаимодействия колеса и рельса*:

$M_{\text{вагона}}$ — масса вагона, отнесенная к одному колесу; $M_{\text{тележки}}$ — масса тележки, отнесенная к одному колесу; $M_{\text{колеса}}$ — масса диска колеса; $M_{\text{оси}}$ — масса половины оси; $M_{\text{буксы}}$ — масса буксового узла; $J_{\text{оси}}$ — момент инерции оси колесной пары вокруг ее продольной оси; $J_{\text{колеса}}$ — момент инерции колеса колесной пары вокруг ее продольной оси; K_1 — жесткость первой ступени рессорного подвешивания; C_1 — коэффициент вязкого демпфирования первой ступени рессорного подвешивания; $K_{\text{скрепления}}$ — вертикальная жесткость дискретной опоры (промежуточного рельсового скрепления); $C_{\text{скрепления}}$ — коэффициент вязкого демпфирования дискретной опоры; E — модуль Юнга рельсовой стали; I — момент инерции сечения рельса Р65; m — погонная масса рельса; V_0, ω_0 — начальные поступательная и угловая скорости движения колеса

* Источник: данные авторов

Fig. 3. Finite element model functional diagram of wheel-rail interaction*:

$M_{\text{вагона}}$ — wagon mass, attributed to one wheel; $M_{\text{тележки}}$ — bogie mass, attributed to one wheel; $M_{\text{колеса}}$ — wheel disk mass; $M_{\text{оси}}$ — semi-axis mass; $M_{\text{буксы}}$ — axlebox mass; $J_{\text{оси}}$ — wheel pair axis moment of inertia around its longitudinal axis; $J_{\text{колеса}}$ — wheel disk moment of inertia around its longitudinal axis; K_1 — stiffness of the first stage of spring suspension; C_1 — viscous damping coefficient of the first stage of spring suspension; $K_{\text{скрепления}}$ — vertical rigidity of the discrete support (intermediate rail fastening); $C_{\text{скрепления}}$ — viscous damping coefficient of the discrete support; E — Young's modulus for rail steel; I — R65 profile rail cross-section moment of inertia; m — rail mass per unit length; V_0, ω_0 — initial translational and angular wheel velocities

* Source: authors' data

Масса вагона и масса тележки, отнесенные к одному колесу, представлены сосредоточенной массой на пружине. Подушечка рельса отсутствует, т. к. интерес представляет только вертикальное взаимодействие колеса и рельса при наличии непрерывных неровностей на колесе. Диаметр колеса равен 920 мм, длина отрезка рельса — 25 м. Свойства пружин и демпферов подрельсовых опор задавались согласно источнику верификации модели [8].

На рис. 4 представлены общий вид модели, разбитой на КЭ сетку, и граничные условия, накладываемые на определенные узлы.

По обоим торцам рельса должно было выполняться условие симметрии, при котором запрещались перемещения в продольном направлении. Это было необходимо, т. к. промоделирован участок конечной длины. Абсолютно жесткое основание было установлено по нижним точкам крепления опор рельса — в этих нижних точках были запрещены все перемещения, в то время как верхние точки дискретных опор были связаны с нижней поверхностью подошвы рельса. Центр колеса был «вырезан», т. к. малые элементы в этой области значительно уменьшали стабильный

шаг интегрирования (для решения задачи использовалась центрально-разностная схема Эйлера, которая обладает условной сходимостью). Недостающие масса и момент инерции вокруг оси вращения колеса задавались вручную так, чтобы необрессоренная масса равнялась 1050 кг. В данной задаче такая упрощенная модель колеса при сохранении его массово-инерционных характеристик была допустима, т. к. объектом рассмотрения являлся рельс.

В модели использованы восьмиузловые кубические элементы с одной точкой интегрирования. Сетка на рельсе в среднем обладает худшими показателями геометрического качества, чем сетка на колесе (табл. 1), однако на головке рельса в области контакта двух тел элементы имеют почти одинаковые показатели.

Элементы рельса с наименее правильной формой (т. е. не идеально кубической) находятся в области перехода шейки в подошву, однако их количество составляет не более 2% от общего числа элементов на рельсе. Ни перемещения, ни напряжения в этих элементах в данной задаче не рассматриваются, т. к. положение точек интереса было выбрано согласно исследованию [8].

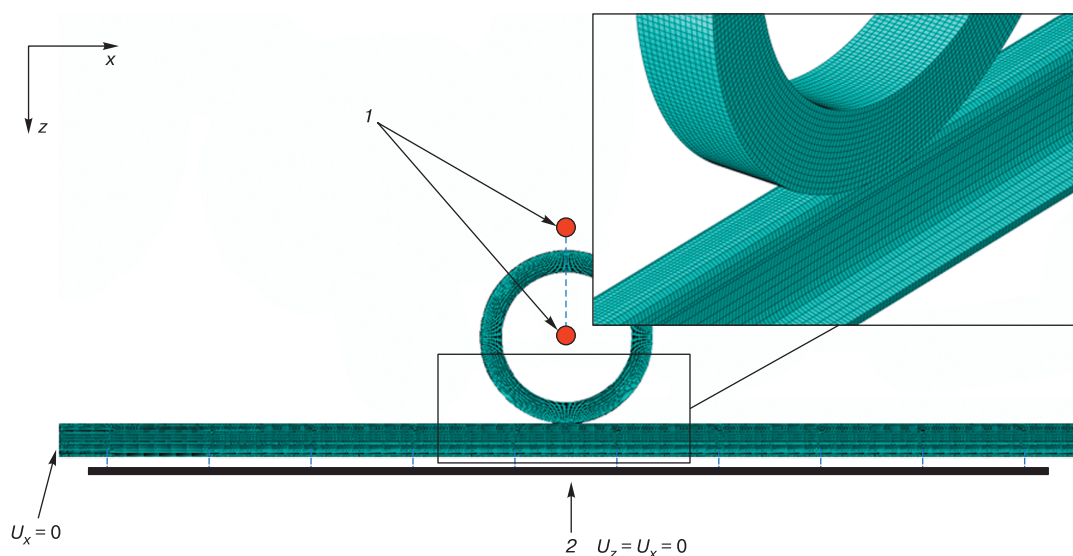


Рис. 4. КЭ сетка и граничные условия*:

1 — сосредоточенные массы (вагон, тележка и масса оси); 2 — абсолютно жесткое основание; U_x , U_z — перемещения узлов сетки

* Источник: данные авторов

Fig. 4. Finite element mesh and boundary conditions*:

1 — lumped masses (vehicle mass, bogie frame, wheel axle); 2 — rigid ground; U_x , U_z — mesh nodes motion

* Source: authors' data

Размер и качество сетки*

Mesh quality and size*

Параметр	Значение
Количество узлов, ед.	594 980
Стабильный шаг интегрирования, с	$2 \cdot 10^{-7}$
Средний максимальный угол граней элементов на колесе, град.	90,44
Средний минимальный угол граней элементов на колесе, град.	89,56
Средний максимальный угол граней элементов на рельсе, град.	102,83
Средний минимальный угол граней элементов на рельсе, град.	77,69

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

Представленная КЭ модель была создана для расчета контактных сил между колесом и рельсом во время качения колеса при наличии неравномерного проката на его поверхности катания. Прокат задавался на колесе на уровне геометрии, т.е. в модель вводилось уже изношенное колесо, которое впоследствии разбивалось на КЭ сетку, жестко привязанную к заранее заданной геометрии. Редактирование КЭ сетки осуществлялось только при соответствующем редактировании исходной геометрии колеса.

Таблица 1

Table 1

Расчет задачи выполнялся в два шага: на первом этапе осуществлялось статическое нагружение рельса колесом (при приложении силы тяжести), после чего на втором этапе выполнялось качение колеса по рельсу. Результаты статического расчета служили начальными условиями для динамического, где на колесо также задавались начальные поступательная и вращательная скорости.

Контактное взаимодействие рассчитывалось с помощью алгоритма так называемого жесткого контакта, описываемого выражением (2). Согласно этому алгоритму давление между сопрягаемыми поверхностями равно нулю при наличии зазора между ними; при касании поверхностей давление прямо пропорционально жесткости контакта, рассчитываемой исходя из упругих свойств материалов контактирующих поверхностей.

$$\begin{cases} p = 0, & \text{если } h > 0; \\ p = p_0, & \text{если } h = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где p — текущее контактное давление, Па;

p_0 — контактное давление при нулевом зазоре, Па;

h — зазор между контактирующими поверхностями, м.

В результате прямого интегрирования с помощью центрально-разностной схемы Эйлера после расчета в явном виде получены силы взаимодействия между колесом и рельсом, величины ускорения, скорости и перемещения узлов рельса и колеса. Контактное

взаимодействие рассчитывается с учетом наличия неравномерного проката, уже введенного в модель на этапе построения геометрии и разбиения ее на КЭ сетку. Таким образом, априори считается, что инерционные силы, возникающие при перекачивании колеса по волнам неравномерного проката на поверхности, вызовут дополнительное динамическое воздействие на рельс, что будет проверено далее.

Результаты исследования. В исследовании [8] приведены зависимости перемещений и эквивалентных напряжений по Мизесу от глубины неравномерного проката колеса (полигональности) в различных точках поперечного сечения рельса. Для выявления влияния глубины неравномерного проката на путь было реализовано качение колеса с неровностями по ровному рельсу в программном комплексе «Универсальный Механизм», из которого передавали результаты расчета контактных сил в КЭ комплекс ANSYS. В цитируемой работе авторами рассматривался неравномерный порядок с различным количеством волн на полную длину окружности колеса: 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 (в работе вместо количества волн говорится о порядке гармоники при разложении формы колеса в гармонический ряд). При этом зависимости контактной силы в паре «колесо – рельс», напряжений в рельсе и перемещений точек его сечения от глубины проката рассматривались только для порядка гармоники (количества волн), равного 6. Глубина неровности варьировалась от 0,01 мм до 0,12 мм, а скорость движения колеса задавалась постоянной (300 км/ч). Авторами работы [8] моделировался рельс СН60 с расстоянием между дискретными опорами рельса 0,65 м, представляющими его опирание на шпалах с эпюрой 1540 шт/км.

В настоящей работе рассмотрен только случай с шестью волнами на круг катания, т.к. цель работы состояла в оценке характера зависимости перемещений и напряжений рельса от глубины проката при неизменной скорости. Скорость движения принята такой же — 300 км/ч, однако глубина проката несколько отличается: от 0 мм (ровное колесо) до 0,2 мм с шагом 0,05 мм. Намеренно пропущен случай с глубиной проката 0,01 мм ввиду невозможности точно отразить в представленной модели геометрию волны с глубиной 0,01 мм на колесе диаметром 920 мм. Максимальное значение глубины проката, принятой к рассмотрению, было увеличено до 0,2 мм, т.к. прокат такой глубины допускается к эксплуатации на отечественных железных дорогах, что делает случай релевантным. Форма продольного профиля моделируемого колеса по центральному кругу катания представлена на рис. 5, порядок гармоники колеса (количество волн на полный круг катания) равен шести.

В данной работе, в отличие от [8], моделируется рельс Р65 с дискретными опорами рельса, имитирую-

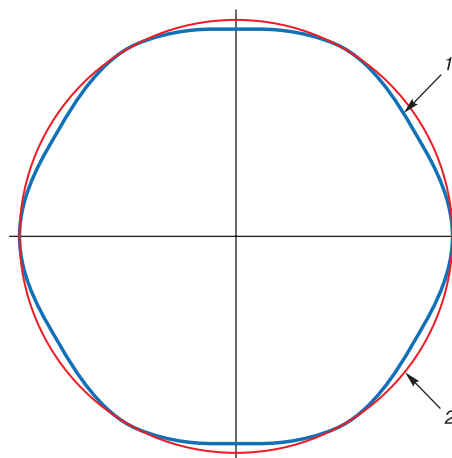


Рис. 5. Форма продольного профиля колеса при наличии неравномерного проката (масштаб волнообразных неровностей увеличен для наглядности)*:

1 — форма продольного сечения колеса с неравномерным прокатом при наличии шести волн на круг катания; 2 — форма продольного сечения абсолютно ровного колеса

* Источник: [8]

Fig. 5. Wheel circumferential irregularity shape (the irregularity depth is exaggerated)*:

1 — longitudinal wheel section shape with uneven wheel rolling at six waves per wheel rolling circle; 2 — longitudinal absolutely even wheel section shape

* Source: [8]

щими опирание на шпалах при эпюре 1840 шт/км, а не 1540 шт/км, как в исследовании, но упругие и демпфирующие характеристики самих опор приняты такими же. Остальные условия соответствовали [8] — отсутствуют подуклонка рельса и коничность колеса, реализуется движение колеса по прямому участку пути (табл. 2). Простота модели позволила установить общие зависимости перемещений и напряжений рельса от глубины волн неравномерного проката при минимальном количестве сторонних влияющих факторов. После успешной верификации простой модели в дальнейшем возможно ее усложнение за счет введения подуклонки, задания конического профиля колеса, моделирования подрельсового основания.

Таблица 2

Параметры КЭ модели для верификации*

Table 2

Finite element model parameters used for verification*

Параметр	Значение
Нагрузка на колесо, кН (тс)	88 (9)
Вертикальная жесткость скрепления, кН/мм	50 [8]
Коэффициент демпфирования скрепления, кН · м/с	20 [8]
Расстояние между опорами, м	0,543

* Источник: данные авторов; [8]

* Source: authors' data; [8]

На рис. 6 показаны изгибная форма рельса под статической нагрузкой 88 кН (9 тс) и распределение перемещений по сечению рельса Р65. Видно, что под нагрузкой от колеса перемещения по головке и по подошве отличаются на 4 % из-за деформаций самого сечения рельса. Элементы, узлы которых находятся в непосредственном контакте с колесом, были скрыты из отображения ввиду того, что эти узлы локально «продавливаются» значительно больше других узлов

(до 0,8 мм). Такое поведение обусловлено только особенностями приложения и передачи нагрузки от колеса на рельс в этих узлах и не имеет под собой физического смысла.

На рис. 7 показано графическое представление поля растягивающих и сжимающих напряжений по сечению рельса Р65 и численное значение напряжений по подошве. Здесь при отображении напряжений не были скрыты элементы по головке рельса, узлы которых

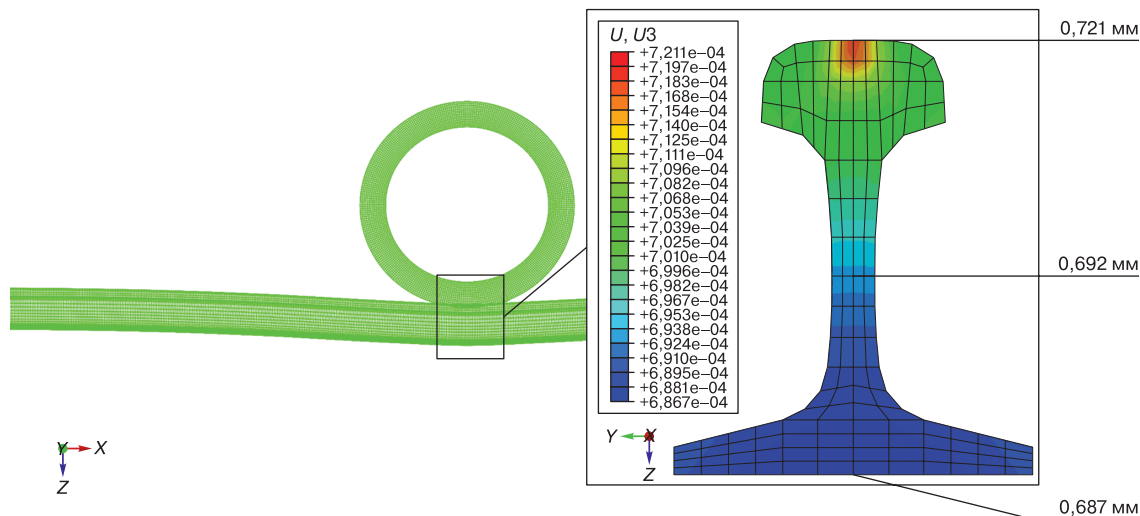


Рис. 6. Деформированная форма рельса Р65 под нагрузкой 88 кН (9 тс) и перемещения точек сечения рельса (масштаб деформаций увеличен)*
* Источник: данные авторов

Fig. 6. R65 profile rail deformed shape and its cross-section displacements under 88 kN (9 ton) force load (deformed shape scale is exaggerated)*
* Source: authors' data

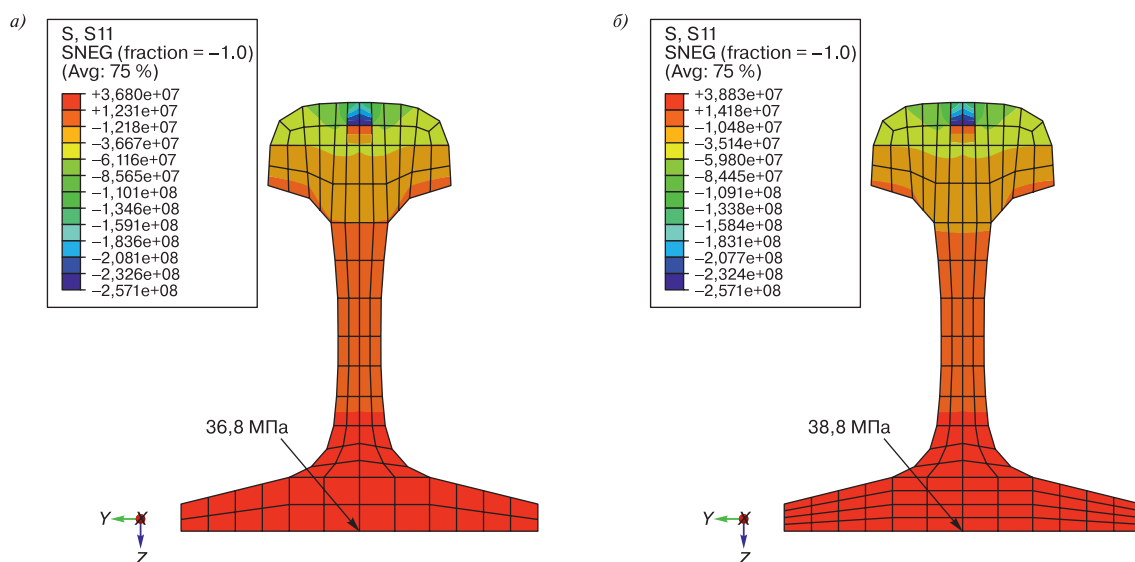


Рис. 7. Распределение нормальных напряжений, Па, по поперечному сечению рельса Р65 под нагрузкой 88 кН (9 тс) при наличии двух (а) и четырех (б) элементов в подошве*
* Источник: данные авторов

Fig. 7. Normal stress distribution (Pa) at the R65 profile rail cross-section under 88 kN (9 ton) load with two (a) and four (b) rail foot elements*
* Source: authors' data

находятся в непосредственном контакте с колесом. По этой причине наблюдается нарушение непрерывности поля напряжений посередине головки, где прикладывалась нагрузка — это обусловлено недостаточным размером сетки, которая была принята близкой к [8], а также тем, что при моделировании использовались линейные элементы, необходимые для проведения динамических расчетов в дальнейшем. Кроме того, отмечено, как изменяются напряжения по нижней поверхности подошвы рельса при увеличении количества элементов по ее толщине: при наличии двух элементов напряжения достигают значения в 36,8 МПа, в то время как при четырех элементах это значение возрастает до 38,8 МПа.

Таким образом, для верификации модели по аналитическому статическому расчету был выбран вариант с четырьмя элементами по толщине подошвы рельса. Напряжения в подошве σ_{Π} , Па, можно вычислить согласно формуле (3) из работы Н. М. Беляева⁵:

$$\sigma_{\Pi} = \frac{M_y}{I_y} y_{\Pi}, \quad (3)$$

где M_y — изгибающий момент в рассматриваемом сечении, Н·м;

I_y — момент инерции сечения рельса, м⁴;

y_{Π} — координата подошвы рельса от нейтральной линии, м.

Изгибающий момент в сечении, где прикладывается только статическая нагрузка, для балки на упругом основании вычисляется согласно выражению⁶ (4):

$$M_y = \frac{P}{4k}, \quad (4)$$

где P — вертикальная статическая сила, Н;

k — относительная жесткость пути, 1/м.

Относительная жесткость пути вычисляется согласно формуле⁷ (5):

$$k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EI_y}}, \quad (5)$$

где U — модуль упругости пути, Па;

E — модуль упругости стали, Па.

Модуль упругости пути можно найти согласно Методике оценки воздействия на путь⁸ с помощью выражения (6):

$$U = \sqrt[3]{\frac{P^4}{64 \cdot y^4 EI}}, \quad (6)$$

где y — прогиб рельса в рассматриваемом сечении, м;

I — момент инерции сечения рельса относительно его поперечной оси, м⁴.

Ввиду того, что вычисляются напряжения по низу подошвы рельса, прогиб сечения рельса также принимают по низу подошвы. Итоговые значения представлены в табл. 3.

Разница в значениях растягивающих напряжений между аналитическим и КЭ расчетами по низу подошвы рельса составила 1 % (0,4 МПа), если использовать результаты расчета с четырьмя элементами по толщине подошвы рельса. При использовании результатов расчета с двумя элементами разница составила 6,5 % (2,4 МПа). Показано, что наличие четырех элементов по толщине рельса предпочтительно для более точных вычислений, однако в дальнейших динамических расчетах было принято решение оставить два элемента по толщине подошвы для более полного соответствия с [8].

На рис. 8 показаны результаты расчетов перемещений точек A, B, C, D, E из работы [8] и результаты, полученные авторами настоящего исследования. Характер зависимости перемещений точек сечения рельса от глубины полигональности в обоих случаях носит линейный характер. Абсолютные значения перемещений, однако, получились различными ввиду разницы эпюры шпал, разных жесткостей рельса, разной нагрузки на колесо (в сопоставляемом исследовании нагрузка не указана), а также неполным совпадением положения точек вывода результатов.

Таблица 3

Результаты верификации модели по статическим расчетам*

Table 3

Verification results based on analytical solution*

Параметр	Значение
Вертикальная нагрузка P , кН (тс)	88 (9)
Прогиб рельса под вертикальной нагрузкой y , мм	0,688
Модуль упругости пути U , МПа	83
Изгибные напряжения по низу подошвы (аналитический расчет), МПа	39,2
Изгибные напряжения по низу подошвы (КЭ расчет, 4 элемента по толщине подошвы), МПа	38,8
Изгибные напряжения по низу подошвы (КЭ расчет, 2 элемента по толщине подошвы), МПа	36,8

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

⁵ Беляев Н. М. Сопротивление материалов. 15-е изд. М.: Наука, 1976. 608 с.

⁶ Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности: утв. расп. ОАО «РЖД» от 22 декабря 2017 г. № 2706/р.

⁷ Там же.

⁸ Там же.

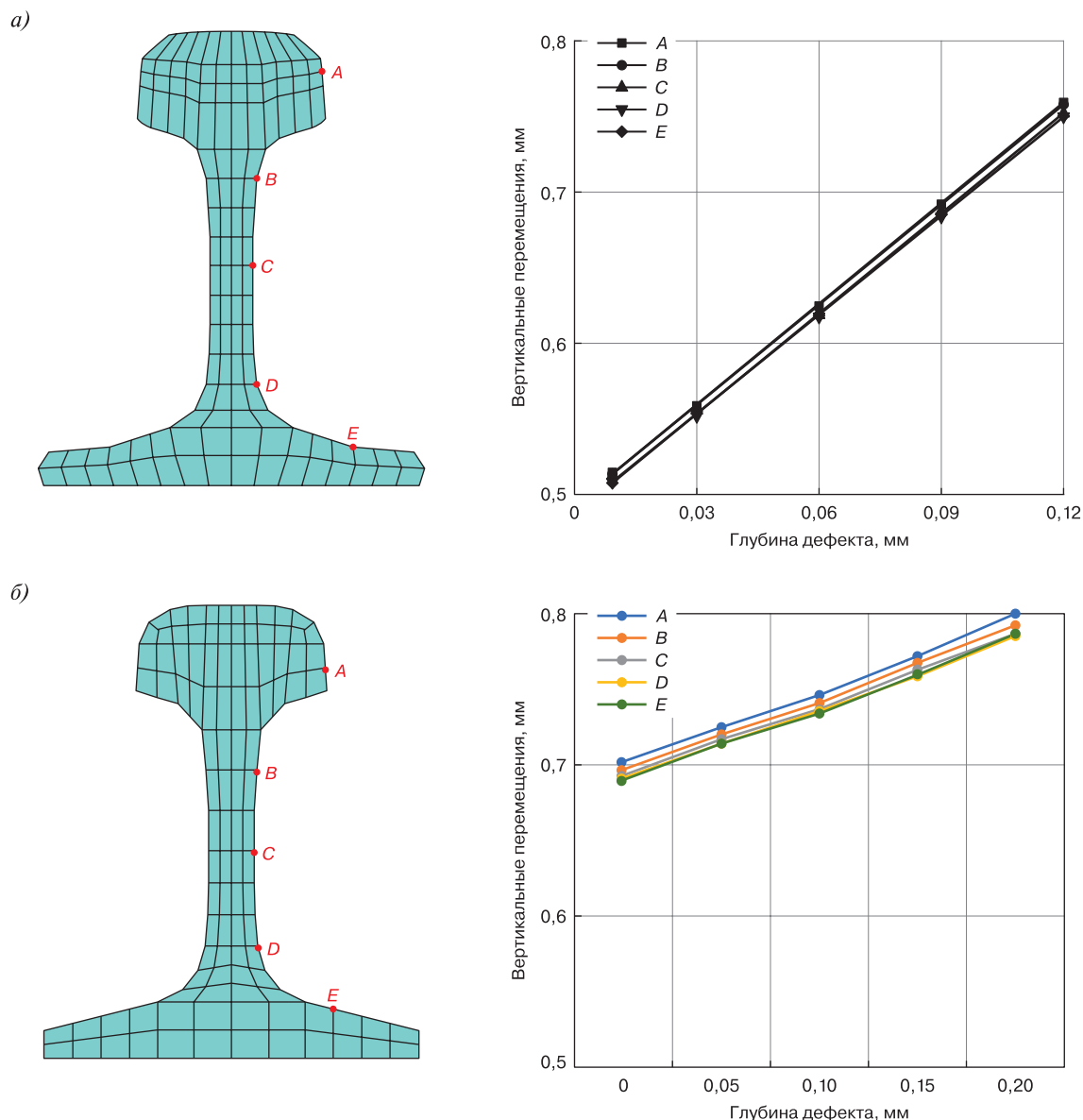


Рис. 8. Результат перемещений точек рельса Р65 под колесом с непрерывными неровностями при его движении со скоростью 300 км/ч*:
 а — результат из [8]; б — результат расчета модели в настоящем исследовании
 * Источник: данные авторов; [8]

Fig. 8. Displacements of the R65 profile rail cross-section under wheel with wavy wear travelling at the speed of 300 km/h*:
 а — result from [8]; б — model calculation result in the present study
 * Source: authors' data; [8]

Перемещения различных точек сечения рельса получились почти одинаковыми (разница между перемещениями точек *A* и *E* составляет не более 0,012 мм). Заметна значительно меньшая к неровностям на колесе «чувствительность» модели, разработанной в настоящем исследовании, по сравнению с моделью [8], наклон графиков составил 0,5 мм/мм против 2 мм/мм в цитируемом исследовании.

В тот же момент времени, когда определялись перемещения рельса, были найдены и эквивалент-

ные напряжения по Мизесу в точках *A*, *B*, *C*, *D*, *E* (рис. 9). Как и перемещения, напряжения в зависимости от глубины неравномерного проката для приведенной модели меняются менее значительно по сравнению с сопоставляемой работой (изменение в среднем составляет 8,5 % при увеличении глубины дефекта от 0,05 до 0,2 мм), при этом характер остается линейным, а различие между точкой *A* и другими точками сечения заметно меньше в сравнении с [8].

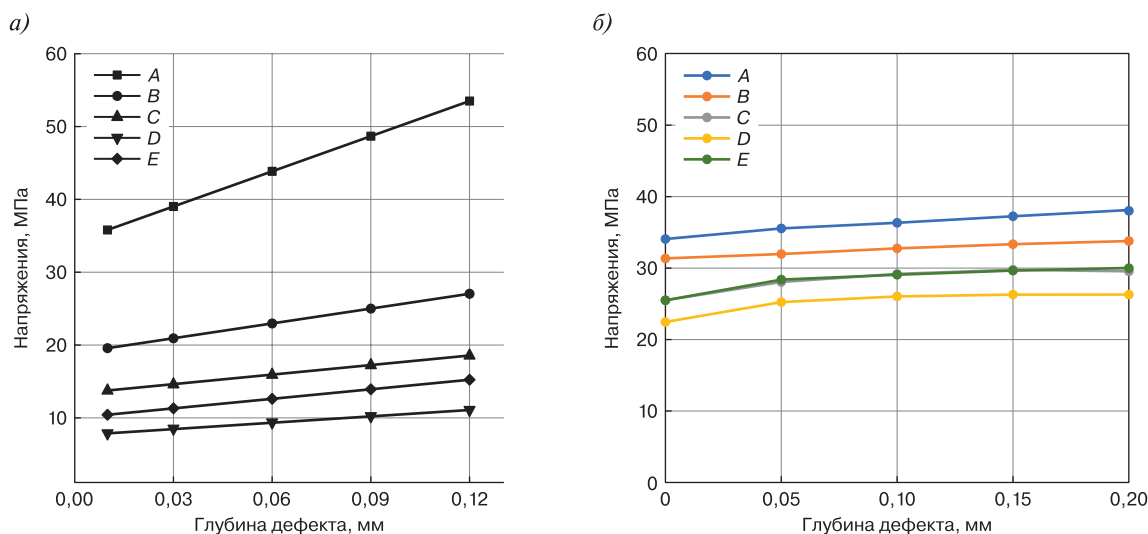


Рис. 9. Графики зависимости эквивалентных напряжений по Мизесу от глубины неравномерного проката в различных точках рельса профиля Р65 для скорости движения 300 км/ч*:
 а — результат из [8]; б — результаты настоящего исследования
 * Источник: данные авторов; [8]

Fig. 9. Dependency diagram of von Mises equivalent stress from wheel rolling depth across R65 profile rail cross-section for 300 km/h movement speed*:
 а — result from [8]; б — results of present study
 * Source: authors' data; [8]

Показано, что хотя и существуют численные различия между представленной в настоящем исследовании КЭ моделью и моделью из [8] ввиду неполного соответствия двух моделей (разный профиль рельса, эпюра шпал и величина необрессоренной массы), качественно зависимости описываются теми же законами: перемещения точек сечения рельса и эквивалентные напряжения в них изменяются линейно. Учитывая это,

авторами было проведено исследование зависимости величины колебаний контактной силы при качении колеса с неравномерным прокатом различной глубины по ровному рельсу при скорости движения 300 км/ч.

График вертикальной составляющей контактной силы при движении колеса с неравномерным прокатом, полученный по результатам расчета КЭ модели, представлен на рис. 10. Характер изменения этой

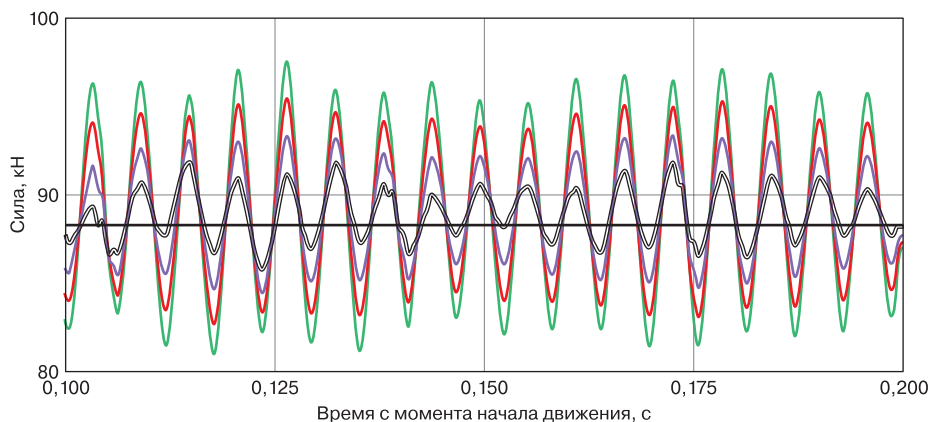


Рис. 10. Колебания вертикальной составляющей контактной силы между колесом и рельсом при движении колеса с неравномерным прокатом на скорости 300 км/ч по результатам расчета КЭ модели. Глубины проката*:
 — 0,2 мм; — 0,15 мм; — 0,1 мм; — 0,05 мм; — статическая нагрузка
 * Источник: данные авторов

Fig. 10. Wheel-rail vertical contact force oscillations under the impact of wheel with out-of-roundness moving at 300 km/h speed using results obtained with the presented finite-element model. Wheel rolling depth*:
 — 0.2 mm; — 0.15 mm; — 0.1 mm; — 0.05 mm; — static load
 * Source: authors' data

силы при наличии периодических непрерывных неровностей носит колебательный характер, при этом с увеличением глубины неровности размах колебаний увеличивается. При скорости движения 300 км/ч максимальное увеличение вертикальной контактной силы составило почти 11 % (до 97,5 кН) относительно статической нагрузки на колесо (88 кН).

Обсуждение и заключение. В исследовании представлена и косвенно верифицирована КЭ модель качения колеса для изучения влияния непрерывных неровностей (полигональности) на поверхность катания колеса применительно к рельсу Р65. Качественно зависимости совпадают с аналогичными зарубежными исследованиями, однако количественно различаются по ряду описанных выше причин. Приведенная в настоящем исследовании модель обладает большей жесткостью, чем модель, описанная в [8], ввиду иного сечения рельса (Р65 против СНН60), различной эпюры шпал (1840 шт/км против 1540 шт/км). Помимо большей жесткости, вероятно, могут существовать и другие, скрытые причины более низкой чувствительности рельса к воздействию полигональности для описанной в настоящем исследовании модели, однако проверка этого предположения требует дополнительного исследования. В дальнейшем приведенная модель может быть интегрирована в более общую модель, например, для БВСП, что позволит изучить влияние неравномерного проката на путь проектируемой магистрали ВСЖМ-1 Москва – Санкт-Петербург. Такая интеграция обеспечит проведение валидации представленной в настоящем исследовании модели взаимодействия колеса и рельса по натурным испытаниям на опытном полигоне. Еще одним потенциальным направлением работы может быть определение степени влияния неравномерного проката при высокоскоростном движении на поведение элементов верхнего строения пути, в частности, узла промежуточного рельсового скрепления. Помимо этого, интерес представляет установление взаимосвязи между волнообразным износом рельсов и неравномерным прокатом волнообразной формы на колесе с упором на высокоскоростное движение.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors express gratitude to the reviewers for useful comments that contributed to the improvement of the article.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Kaper H. P. Wheel corrugation on Netherlands railways (NS): origin and effects of “polygonization” in particular. *Journal of Sound and Vibration*. 1988;120(2):267–274. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(88\)90434-8](https://doi.org/10.1016/0022-460X(88)90434-8).
2. Brommundt E. A simple mechanism for the polygonalization of railway wheels by wear. *Mechanics Research Communications*. 1997;24(4):435–442. [https://doi.org/10.1016/S0093-6413\(97\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0093-6413(97)00047-5).
3. Wu X., Chi M., Wu P. Influence of polygonal wear of railway wheels on the wheel set axle stress. *Vehicle System Dynamics*. 2015;53(11):1535–1554. <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1063674>.
4. Fröhling R., Spangenberg U., Reitmann E. Root cause analysis of locomotive wheel tread polygonisation. *Wear*. 2019;432–433:102911. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.05.026>.
5. He C., Yang Z., Zhang P., Li S., Naeimi M., Dollevoet R., Li Z. A finite element thermomechanical analysis of the development of wheel polygonal wear. *Tribology International*. 2024;195:109577. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109577>.
6. Nielsen J. C. O., Johansson A. Out-of-round railway wheels — a literature survey. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2000;214(2):79–91. <https://doi.org/10.1243/0954409001531351>.
7. Tao G., Wen Z., Jin X., Yang X. Polygonisation of railway wheels: a critical review. *Railway Engineering Science*. 2020;28:317–345. <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00222-x>.
8. Chen M., Sun Y., Guo Y., Zhai W. Study on effect of wheel polygonal wear on high-speed vehicle-track-subgrade vertical interactions. *Wear*. 2019;432–433:102914. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.05.029>.
9. Song Y., Du Y., Zhang X., Sun B. Evaluating the effect of wheel polygons on dynamic track performance in high-speed railway systems using co-simulation analysis. *Applied Sciences*. 2019;9(19):4165. <https://doi.org/10.3390/app9194165>.
10. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М.: Транспорт, 1986. 559 с.
- Verigo M. F., Kogan A. Ya. *Vehicle-track interaction*. Moscow: Transport; 1986. 559 p. (In Russ.).
11. Коган А. Я. Расчеты железнодорожного пути на вертикальную динамическую нагрузку. Труды ВНИИЖТ. Вып. 502. М.: Транспорт, 1973. 80 с.
- Kogan A. Ya. *Railway track vertical dynamic loads calculations*. Proceedings of VNIIZHT. Moscow: Transport; 1973. 80 p. (In Russ.).
12. Профессор Всеволод Федорович Яковлев. Путь ученого. Избранные труды / науч. ред. В. А. Сидяков. М.: Трасса, 2005. 352 с.
- Professor Vsevolod F. Yakovlev. *The life path of the scientist. Selected Works* / ed. by V. A. Sidiakov. Moscow: Trassa; 2005. 352 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матвей Андреевич МОРКОВНИКОВ,

аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство»,
Российский университет транспорта
(РУТ (МИИТ)), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9),
<https://orcid.org/0009-0006-9906-4355>

Евгений Самуилович АШПИЗ,

д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Путь и путевое хозяйство», Российский университет транспорта
(РУТ (МИИТ)), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9),
SPIN-код: 5412-7662, <https://orcid.org/0000-0003-1334-2117>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Matvei A. MORKOVNIKOV,

Postgraduate, Track and Track facilities Department,
Russian University of Transport
(127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.),
<https://orcid.org/0009-0006-9906-4355>

Evgeny S. ASHPIZ,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Track and Track
facilities Department, Russian University of Transport
(127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.),
SPIN-code: 5412-7662, <https://orcid.org/0000-0003-1334-2117>

ВКЛАД АВТОРОВ

Матвей Андреевич МОРКОВНИКОВ. Поиск и анализ научной литературы, построение модели, проведение и анализ расчетов, написание текста статьи (70 %).

Евгений Самуилович АШПИЗ. Постановка целей и задач исследования, редактирование и подготовка текста статьи (30 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Matvei A. MORKOVNIKOV. Scientific literature search and analysis, model design, calculations performance and analysis, article writing (70 %).

Evgeny S. ASHPIZ. Goals and objectives setting, article editing and preparation (30 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 27.10.2025, рецензия от первого рецензента получена 19.11.2025, рецензия от второго рецензента получена 12.12.2025, рецензия от третьего рецензента получена 12.12.2025, рецензия от четвертого рецензента получена 15.12.2025, принята к публикации 16.01.2026.

The article was submitted 27.10.2025, first review received 19.11.2025, second review received 12.12.2025, third review received 12.12.2025, fourth review received 15.12.2025, accepted for publication 16.01.2026.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 628.517.2:629.423:629.424

EDN: <https://elibrary.ru/gcksby>

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-38-47>

Научная специальность: 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



Натурное исследование максимального уровня внешнего шума подвижного состава

С. Е. Ададунов¹, И. И. Гнатченко¹, Ю. В. Никольская¹✉,
А. С. Пономарев², В. Е. Дегтярев², А. Ю. Панин²

¹ООО «ВНИИЖТ-Инжиниринг»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (ВНИКТИ),
Коломна, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рост интенсивности движения поездов, ввод в эксплуатацию городских электропоездов, приближение жилой застройки к железнодорожным линиям обостряют проблему внешнего шума от железнодорожного подвижного состава. Для разработки мероприятий, направленных на снижение уровня внешнего шума, АО «ВНИИЖТ», ООО «ВНИИЖТ-Инжиниринг» и АО «ВНИКТИ» совместно проводят комплексные исследования шумового загрязнения окружающей среды. Поскольку нормативная база по внешнему шуму применительно к подвижному составу в течение многих лет не пересматривалась, необходима актуализация технических требований к основным типам электропоездов и тягового подвижного состава. В статье приведен краткий обзор осуществленных работ, направленных на создание классификатора внешнего шума подвижного состава.

Материалы и методы. Выполнены натурные испытания подвижного состава, в ходе которых были определены шумовые характеристики с фиксацией звукового давления при нахождении на стоянке, а также в движении с разными скоростями на прямых участках пути и в кривых.

Результаты. Приведены и проанализированы данные измерений внешнего шума электропоезда ЭС1П «Ласточка» на стоянке и при движении. Составлена база данных (сигнатур) внешнего шума и спектральных характеристик исследованного подвижного состава, на основании которой разработан классификатор шума тягового подвижного состава и электропоездов.

Обсуждение и заключение. Анализ максимального уровня шума электропоезда ЭС1П «Ласточка» показал, что влияние агрегатов подвижного состава на уровень его внешнего шума сказывается на скоростях до 80 км/ч, а на более высоких скоростях преобладает шум от зон контактов колес с рельсами. Разработанный классификатор станет основой для дальнейших работ, направленных на определение источника повышенного уровня шума конкретных агрегатов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный транспорт, подвижной состав, внешний шум, акустика, измерение внешнего шума

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ададунов С. Е., Гнатченко И. И., Никольская Ю. В., Пономарев А. С., Дегтярев В. Е., Панин А. Ю. Натурное исследование максимального уровня внешнего шума подвижного состава // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2026. Т. 85, № 1. С. 38–47. EDN: <https://elibrary.ru/gcksby>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 628.517.2:629.423:629.424

EDN: <https://elibrary.ru/gcksby>

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-38-47>

Scientific specialty: 2.9.3. Railway rolling stock, train traction and electrification



Field studies on external noise maximum noise level of rolling stock

Sergey E. Adadurov¹, Igor I. Gnatchenko¹, Yuliya V. Nikolskaya¹✉,
Andrey S. Ponomarev², Vitaliy E. Degtyarev², Andrey Yu. Panin²

¹VNIIZhT-Engineering,

Saint Petersburg, Russian Federation

²Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock,
Kolomna, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Train traffic growth, commissioning of commuter trains approximation of residential development to railway lines exacerbate the problem of external noise from railway rolling stock. In order to develop measures, aimed at reducing the external noise level, specialists of the Railway Research Institute, VNIIZhT-Engineering and Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock jointly conduct comprehensive studies on environmental noise pollution. Since the regulatory framework for external noise as applied to rolling stock is becoming obsolete, it is necessary to update the technical requirements for the main types of electric trains and traction rolling stock. The article provides a brief overview of the conducted work to create a rolling stock external noise classifier.

Materials and methods. Field tests, which determined noise characteristics with noise pressure recording, were performed at train stand, as well as in motion at different speeds on tangent level track and in curves.

Results. The authors presented and analysed measurements data of the ES1P “Lastochka” electric multiple unit train at train stand and in motion. A database (signatures) of external noise and spectral characteristics of the studied rolling stock has been compiled, based on which a noise classifier of traction rolling stock and electric trains has been developed.

Discussion and conclusion. Analysis of the maximum external noise level of the ES1P “Lastochka” electric multiple unit train showed that the influence of rolling stock components on the level of its external noise affects speeds up to 80 km/h, while at higher speeds noise from the contact zones of wheels with rails predominates. The developed classifier would form the basis for further work aimed at localising the increased noise level of specific units.

KEYWORDS: railway transport, rolling stock, external noise, acoustics, external noise measurement

FOR CITATION: Adadurov S.E., Gnatchenko I.I., Nikolskaya Yu.V., Ponomarev A.S., Degtyarev V.E., Panin A.Yu. Field studies on external noise maximum noise level of rolling stock. *Russian Railway Science Journal*. 2026;85(1):38–47. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-38-47>.

✉ u.nikolskaya@vniizht-en.ru (Yu. V. Nikolskaya)

Введение. Транспорт является одним из основных источников внешнего шума. Ежегодно растет число жалоб от жителей населенных пунктов на мешающее влияние шума от автомобильного и железнодорожного транспорта. Особенно это характерно для западных стран. Что касается железнодорожных линий, то по оценке Европейского агентства по окружающей среде (European Environmental Agency — EEA) в 2014 г. 13 % населения на пространстве ЕС страдает от шума, вызываемого движением поездов¹. В Западной Европе железнодорожный шум стоит на втором месте по негативному воздействию на окружающую среду, борьбе с шумом уделяется особое внимание [1–2]. В России подобные масштабные исследования не проводились, однако выполненная в 2006 г. оценка акустической ситуации в г. Санкт-Петербурге выявила, что приблизительно 10 % городской территории попадает в зону превышения уровней шума из-за железнодорожного транспорта [3].

ОАО «РЖД» как ответственный национальный железнодорожный перевозчик в своей деятельности стремится поддерживать высокий уровень экологической безопасности. В частности, в рамках целей и задач экологического развития компания осуществляет комплекс мер для снижения таких физических факторов воздействия на окружающую среду и здоровье человека, как внешний шум. Экологическая стратегия ОАО «РЖД»² предусматривает проведение комплексных исследований шумового загрязнения окружающей среды при эксплуатации железнодорожного подвижного состава с разработкой мероприятий, направленных на снижение уровня внешнего шума. В ходе их реализации предстоит выявить конкретные источники шума при обследовании железнодорожного подвижного состава, определить приоритетные направления и выбрать наиболее эффективные организационно-технические решения по снижению шума. План таких исследований формализован в утвержденной ОАО «РЖД» Дорожной карте³, определяющей цели и последовательность проведения научных исследований. В рамках данного исследования проанализирован обширный парк эксплуатируемого подвижного состава на железных дорогах. В дальнейшем планируется выполнение акустических испытаний для 35 типов тяговых подвижных единиц. Для каждой подвижной единицы испытания должны быть выполнены как на стоянке, так и в движении по прямому и кривому участку пути.

Методика испытаний. В рамках комплексных исследований были определены шумовые характеристики с фиксацией звукового давления подвижного состава. Измерения проводили шумомерами SVAN 958 и Экофизика-110А, основные характеристики которых представлены в табл. 1.

В эксплуатационных депо уровни внешнего шума подвижного состава измеряли при работе на стоянке на холостом ходу, при трогании с места и при торможении. Были зафиксированы показатели отдельных источников шума. У электровозов: шум тормозного компрессора, тягового трансформатора, климатических установок кабин машиниста, поднятия и опускания токоприемника, отпуска тормозов, вентилятора охлаждения ТЭД на максимальных оборотах.

Таблица 1

Характеристики применяемых в работе шумомеров*

Table 1

Application characteristics of noise meters*

Показатель	SVAN 958	Экофизика-110А
Количество каналов	Четыре; каждый канал может быть настроен на измерение шума или вибрации, независимо от других каналов	—
Частотный диапазон	от 1,0 Гц до 20 000 Гц; микрофон 1/2"	от 0,5 Гц до 50 000 Гц
Диапазон измерений	23–140 дБА	22–139,0 дБ (для ВМК-205, МК265); 150 дБ (для МК233, М201); 160 дБ (для МК401, МК301)
Класс точности по ГОСТ 17187–2010, ГОСТ Р 53188.1–2008 (МЭК 61672-1:2002), МЭК 61012:1990	Первый	Первый
Общая погрешность при измерении	<0,7 дБ	±0,4 дБ

* Источник: паспортные данные приборов SVAN 958 и Экофизика-110А

* Source: technical passport data of the devices SVAN 958 and Ekophysika-110A

¹ Reducing Railway Noise Pollution. DG IPOL study. Policy Department B: Structural and Cohesion policies. Transport and Tourism. Brussels, 2012. 130 p.

² Экологическая стратегия ОАО «РЖД» до 2030 года и на перспективу до 2035 года: утв. решением Совета директоров ОАО «РЖД» от 21 марта 2025 г. № 11.

³ Дорожная карта комплексных исследований шумового загрязнения окружающей среды при эксплуатации железнодорожного подвижного состава с разработкой мероприятий, направленных на снижение уровня внешнего шума: утв. заместителем генерального директора — главным инженером ОАО «РЖД» Храмцовым А. М. 24 марта 2023 г.

У тепловозов: шум тормозного компрессора, климатических установок кабин машиниста, дизеля при различных положениях контроллера машиниста, вентилятора охлаждения ТЭД на максимальных и минимальных оборотах, системы охлаждения блока тормозных резисторов, работы дизеля в режиме холостого хода. У электропоездов: шум тормозного компрессора, климатических установок, работы пантографа, открытия и закрытия дверей, разгона и торможения электропоезда.

Внешний шум во время движения измеряли при максимально разрешенных скоростях на прямых участках пути и в кривых (внешний и внутренний радиусы).

В ходе испытаний регистрировались:

- изменения во времени уровня звука (шума) локомотива L_{pA} в измерительных точках;
- максимальные значения звука (шума) при каждом замере L_{pAFmax} ;
- третьоктавные уровни звукового давления L_p ;
- эквивалентный уровень звука (шума) $L_{pAeq,T}$.

Условия проведения измерений в течение всего срока работ были сходными. Испытания проходили при сухой погоде, температуре окружающего воздуха

в диапазоне плюс 5,1–22,0 °С, атмосферном давлении 98,0–102,1 кПа (735–766 мм рт.ст.) и относительной влажности воздуха 29–81 %, скорость ветра в направлении, перпендикулярном железнодорожному пути, от 0,9 м/с до 2,6 м/с, в направлении вдоль железнодорожного пути — от 0,2 м/с до 0,8 м/с.

Для измерения шума единицы подвижного состава на стоянке использовали микрофоны, установленные на расстоянии 1,0 м от объекта исследований.

Измерения шума проводили одновременно с помощью трех микрофонов непрерывно за один проход вокруг единицы подвижного состава по следующим траекториям (рис. 1): траектория № 1 — уровень расположения главной рамы; траектория № 2 — уровень горизонтальной осевой линии; траектория № 3 — уровень верхней точки объекта.

Измерения шума подвижного состава в движении проводили в двух зонах: на расстоянии 25 м от оси пути с размещением микрофонов на штативе на высотах $(1,6 \pm 0,1)$ м и $(3,5 \pm 0,1)$ м от уровня верха головки рельса и на расстоянии 7,5 м от оси пути четырьмя микрофонами, размещенными на высотах 0 м,

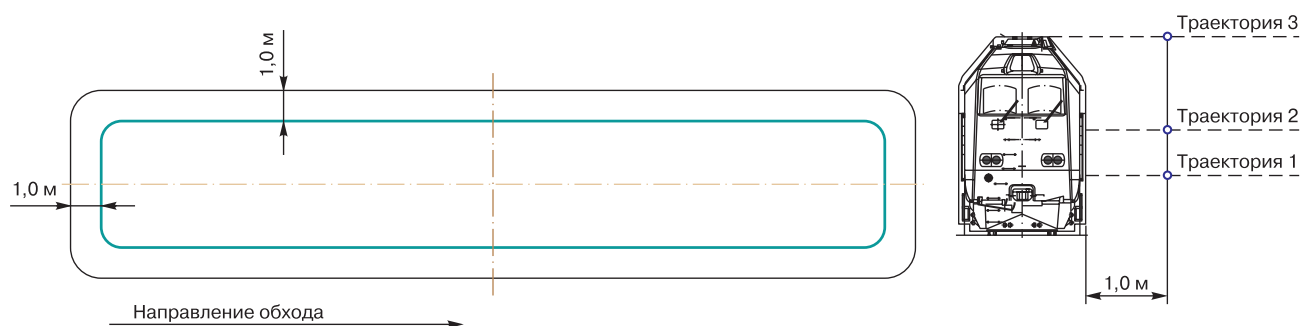


Рис. 1. Схема размещения микрофонов при измерениях шума подвижного состава на стоянке*

* Источник: данные авторов

Fig. 1. Layout of measuring equipment for noise measurements of rolling stock at train stand*

* Source: authors' data

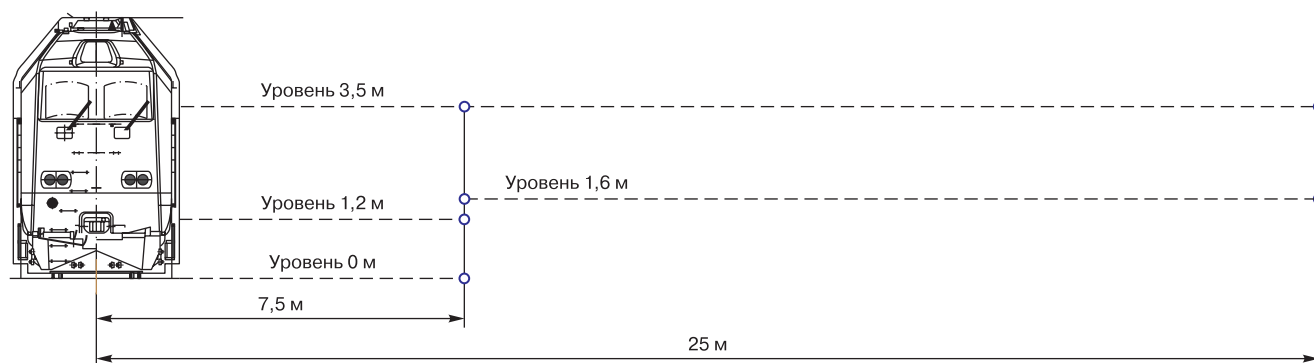


Рис. 2. Схема размещения точек измерения шума при движении подвижного состава*

* Источник: данные авторов

Fig. 2. Layout of noise measurement points during rolling stock movement*

* Source: authors' data

($1,2 \pm 0,1$) м, ($1,6 \pm 0,1$) м и ($3,5 \pm 0,1$) м от уровня верха головки рельса (рис. 2). На стоянке измерения проводились на расстояниях 1,0 м, для нормирования показателя внешнего шума расстояние составляло 25 м.

Результаты испытаний. Впервые в России составлена база данных (сигнатур) внешнего шума исследованного подвижного состава, образцы которой на примере

электропоездов ЭС104 «Финист» и ЭГ2Тв «Иволга» приведены в табл. 2. База сигнатур сведена в классификатор шума, где каждому показателю уровня внешнего шума от каждого агрегата присвоены код и нормируемое значение при его наличии. Образец классификатора шума для агрегатов тепловоза ЧМЭЗ на стоянке представлен в табл. 3.

Таблица 2

Образцы базы данных (сигнатур) электропоездов ЭГ2Тв «Иволга» и ЭС104 «Финист»*

Table 2

Database (signatures) data of EG2Tv “Ivolga” and ES104 “Finist” electric multiple unit trains*

Источник шума	Эквивалентный уровень звука (шума) L_{pAeq} , дБА		Максимальный уровень звука (шума) L_{pAFmax} , дБА		Положение микрофона	
	ЭГ2Тв «Иволга»	ЭС104 «Финист»	ЭГ2Тв «Иволга»	ЭС104 «Финист»	Расстояние, м	Высота по траектории
На стоянке						
Отпуск тормозов	73,4	61,0	78,7	65,3	1	№ 1
Компрессор	74,3	64,4	82,1	73,3	1	№ 1
Открытие/закрывание дверей	67,9	70,6	75,9	78,3	1	№ 1
Преобразователь	71,7	62,2	77,4	67,9	1	№ 1
Токоприемник	69,3	77,8	76,0	87,4	1	№ 3
Общий уровень шума	70,1	71,4	75,2	83,1	1	№ 1
В движении						
Разгон до скорости 25 км/ч	70,9	68,2	76,7	76,2	7,5	№ 1
Торможение со скорости 25 км/ч	61,1	55,9	69,4	62,2	7,5	№ 1
Движение на прямых участках со скоростью 80 км/ч	85,2	84,4	95,1	92,2	7,5	высота 1,2 м
Движение в кривых со скоростью 80 км/ч	84,7	79,9	88,9	85,5	7,5	высота 1,2 м

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

Таблица 3

Образец классификатора шума для агрегатов тепловоза ЧМЭЗ на стоянке*

Table 3

Sample noise classifier for ChME3 diesel locomotive units at train stand*

Код группы	Код подгруппы	Код класса	Код вида	Название групп (подгрупп)	Замеренный уровень звука (шума), L_{pAFmax} , дБА, на расстоянии 7,5 м на высоте траектории № 1 на стоянке
10	00	00	00	Узлы машин (механизмов)	—
11	01	00	00	Активные	—
11	01	03	00	Силовая установка тепловоза (дизели и дизель-генераторы)	—
11	01	03	01	Выпуск дизеля	79,5
11	01	03	05	ДВС	79,7
11	01	07	00	Компрессор	—
11	01	07	01	Компрессор поршневой	80,2
11	01	09	00	Вентилятор	—
11	01	09	01	Вентилятор холодильника	75,4

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

Анализ данных испытаний электропоезда ЭС1П «Ласточка». На основании данных о шумовых параметрах выполнен экспресс-анализ для определения источников излучения максимального уровня шума электропоезда.

Экспресс-анализом будем называть методику, при которой выполняют измерение эквивалентного и максимального уровня звука (шума) подвижной единицы при ее прохождении по участку пути.

Измерения шумовых параметров электропоезда ЭС1П-001 «Ласточка» при работе на стоянке проводили в депо Металлострой Дирекции скоростного сообщения ОАО «РЖД». На рис. 3 показано расположение оборудования головного вагона электропоезда, которое является источником шума.

Измерения максимального уровня внешнего шума во время движения проводили на перегоне Усад – Глубоково (Московская железная дорога, Горьковское направление) на прямом участке пути и в кривой радиусом 900 м, в сухую погоду при температуре окру-

жающего воздуха от $+5,1^{\circ}\text{C}$ до $+5,9^{\circ}\text{C}$ и атмосферном давлении от 98,10 до 98,12 кПа, скорость ветра в направлении, перпендикулярном железнодорожному пути, от 2,0 м/с до 2,9 м/с, в направлении вдоль железнодорожного пути — от 1,6 м/с до 3,7 м/с. При этом измерения проводили как внутри кривой, так и снаружи. На рис. 4–7 приведены данные по результатам измерений на стоянке и в движении.

Как видно из анализа данных, приведенных на рис. 4, основным источником шума во время стоянки является климатическая установка (рис. 3, поз. 3), а при движении (рис. 5–7) — зона контакта «колесо – рельс». Так, уровень внешнего шума электропоезда на стоянке (рис. 4) доходил до 68 дБА в районе расположения работающей климатической установки. На прямом участке пути при скорости около 100 км/ч (рис. 5) уровень внешнего шума достигал значения 90 дБА в зоне контакта колес с рельсами. Аналогичная картина наблюдается с показателями уровня внешнего шума при прохождении поездом кривого

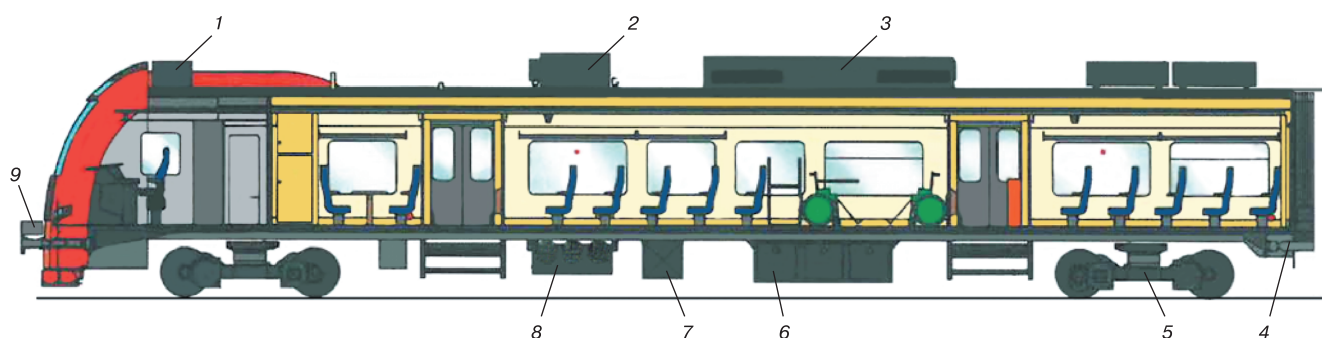


Рис. 3. Схема расположения потенциальных источников шума головного вагона электропоезда ЭС1П «Ласточка»*:
1 — климатическая установка кабины; 2 — установка охлаждения тягового преобразователя; 3 — климатическая установка салона вагона; 4 — беззазорное сцепное устройство (короткое); 5 — тележка моторная; 6 — тяговый преобразователь; 7 — контейнер высоковольтного оборудования; 8 — контейнер блока тормозного оборудования; 9 — автоматическая сцепка
* Источник: Руководство по эксплуатации 32303.0.00.000.000РЭ

Fig. 3. Layout of potential noise sources in the driving car of the ES1P “Lastochka” electric multiple unit train*:
1 — cabin climate control system; 2 — traction converter cooling system; 3 — car interior climate control system; 4 — short gapless coupling device; 5 — motor bogie; 6 — traction converter; 7 — high-voltage equipment container; 8 — brake equipment unit container; 9 — automatic coupling
* Source: User manual 32303.0.00.000.000РЭ

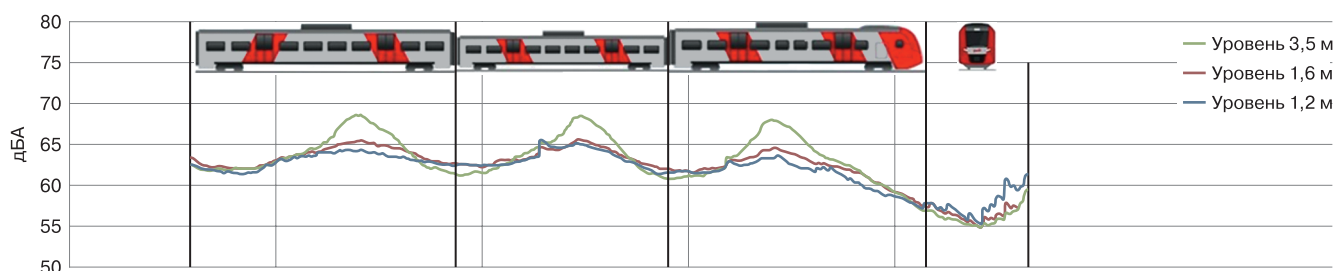


Рис. 4. Внешний шум во время стоянки, L_{pA} *
* Источник: данные авторов

Fig. 4. External noise at train stand, L_{pA} *
* Source: authors' data

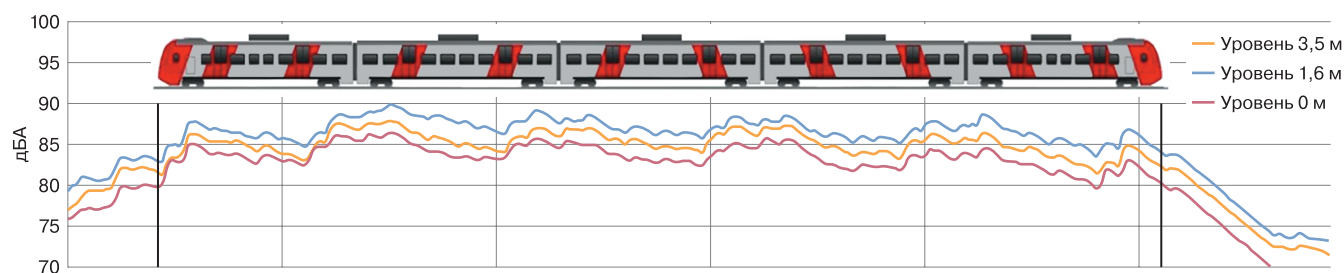


Рис. 5. Внешний шум на расстоянии 7,5 м при движении по прямому участку пути со скоростью 96 км/ч, L_{pA}^*

* Источник: данные авторов

Fig. 5. External noise at 7.5 m during movement at tangent level track at 96 km/h speed, L_{pA}^*

* Source: authors' data

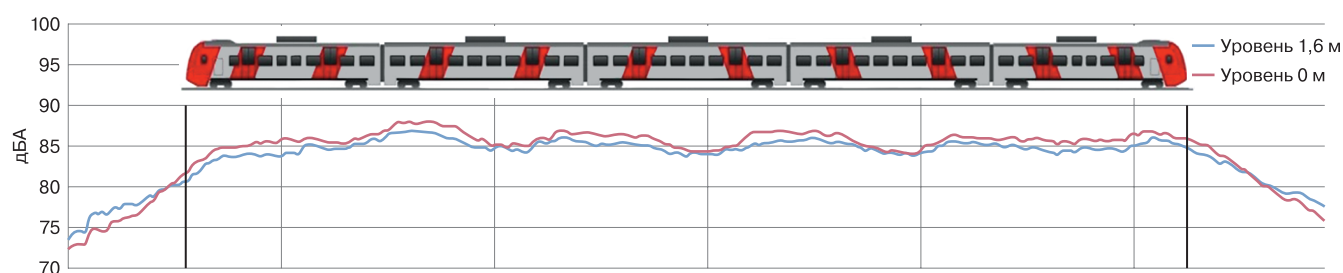


Рис. 6. Внешний шум на расстоянии 7,5 м при движении по кривому участку пути (внутри кривой) со скоростью 97 км/ч, L_{pA}^*

* Источник: данные авторов

Fig. 6. External noise at 7.5 m during movement at curved section of the track (inside the curve) at 97 km/h speed, L_{pA}^*

* Source: authors' data

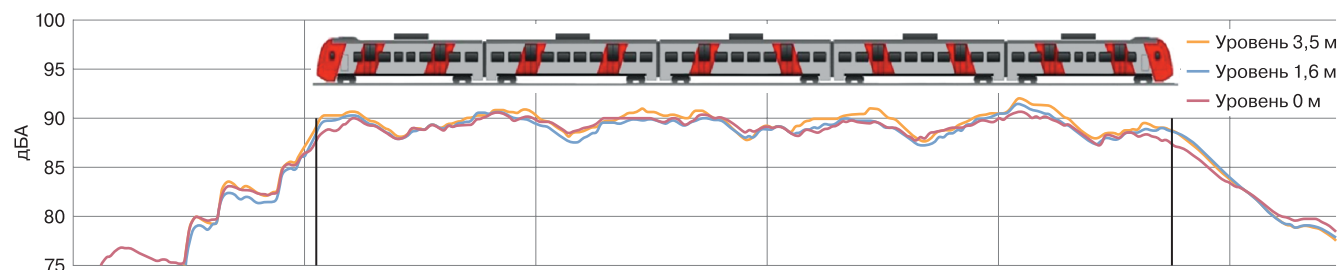


Рис. 7. Внешний шум на расстоянии 7,5 м при движении по кривому участку пути (снаружи кривой) со скоростью 120 км/ч, L_{pA}^*

* Источник: данные авторов

Fig. 7. External noise at 7.5 m during movement at curved section of the track (outside the curve) at 120 km/h speed, L_{pA}^*

* Source: authors' data

участка пути. Основными источниками шума являлись зоны контактов колес с рельсами. Особенно хорошо это прослеживается на осциллограмме, представленной на рис. 5. Измерения на уровне 0 м от головки рельса зафиксировали всплески максимального уровня внешнего шума именно от зон контактов колес с рельсами. При этом на скоростях 100–120 км/ч как снаружи (рис. 7), так и внутри кривой (рис. 6) уровень внешнего шума колебался в пределах 92–87 дБА.

Отметим, что при прохождении кривого участка пути примерно с той же скоростью, что и при движении по прямому (рис. 5), максимальный уровень шума, замеренный внутри кривой, был ниже на 3 дБА. Обобщенные данные измерений внешнего шума электропоезда ЭС1П «Ласточка» на стоянке и при движении представлены в табл. 4. Максимальный уровень внешнего шума электропоезда, измеренный на расстоянии 25 м при движении в прямых участках пути, не превышает нормативного требования 84 дБА⁴.

⁴ ГОСТ Р 55434–2013. Электропоезда. Общие технические требования: утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 мая 2013 г. № 116-ст. 57 с.

Таблица 4

Обобщенные данные измерений внешнего шума электропоезда ЭС1П «Ласточка» на стоянке и при движении*

Table 4

Integrated measurement data of external noise of the ES1P “Lastochka” electric multiple unit train at train stand and in movement*

Источник шума	Уровень шума		Измерительное расстояние, м	Показатель шума, приведенный к расстоянию 25 м	
	Эквивалентный $L_{pAeq,T}$, дБА	Максимальный L_{pAFmax} , дБА		Эквивалентный $L_{pAeq,T}$, дБА	Максимальный L_{pAFmax} , дБА
На стоянке					
Отпуск тормозов	68,8	75,0	Расстояние 1,0 м, высота по траектории № 1	40,8	47,0
Компрессор	74,5	92,0		46,5	64,0
Открывание/закрывание дверей	62,7	75,0		34,7	47,0
Преобразователь	63,6	65,5		35,6	37,5
Токоприемник	62,9	78,1	Расстояние 1,0 м, высота по траектории № 3	34,9	50,1
Общий уровень шума	76,2	92,3	Расстояние 1,0 м, высота по траектории № 1	48,2	64,3
В движении					
Разгон до скорости 25 км/ч	78,1	80,5	Расстояние 7,5 м, высота по траектории № 1	67,6	70,0
Торможение со скорости 25 км/ч	61,1	73,8	Расстояние 7,5 м, высота по траектории № 1	50,6	63,3
Движение на прямых участках со скоростью 96 км/ч	85,2	90,9	Расстояние 7,5 м, высота 1,2 м	74,7	80,4
Движение в кривых со скоростью 97 км/ч	85,9	87,4	Расстояние 7,5 м, высота 1,2 м	75,4	76,9

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

Поскольку российские стандарты нормируют уровень звука на расстоянии 25 м от оси пути, то данные, полученные при измерении на расстоянии 1,0 и 7,5 м от кузова подвижного состава, пересчитаны по формуле⁵:

$$L_{p(25)} = L_{p(1,0)} + 20 \lg \frac{1}{25 - 0,5b}, \quad (1)$$

где $L_{p(25)}$ — уровень звукового давления, приведенный к расстоянию 25 м от оси пути, дБ;

$L_{p(1,0)}$ — уровень звукового давления, измеренный на расстоянии 1,0 м от кузова, дБ;

b — ширина измеряемого подвижного состава, м.

Существует несколько теорий расчета общего уровня шума от движения подвижного состава [4–7]. Все они применимы при рассмотрении вопросов, которые являются целью настоящего исследования. В настоящей работе используется комбинация этих методов. Общий уровень шума рассчитывают как сумму уровней звукового давления от разных источников шума

по формуле энергетического сложения, приводимой в различных методиках, например Нижегородского государственного технического университета⁶ и в работе [9]:

$$L_{\Sigma} = 10 \lg(10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2} + \dots + 10^{0,1L_n}), \quad (2)$$

где L_{Σ} — суммарный уровень звукового давления от всех источников шума, дБ;

$L_1, L_2, \dots, L_n$ — уровень звукового давления 1-го, 2-го, ..., n -го источников шума, дБ.

Показатели максимального уровня шума, зафиксированного на расстоянии 7,5 м от подвижного состава, приведены к показателям на расстоянии 25 м от подвижного состава расчетным методом.

Анализ сигнатур шума агрегатов электропоездов ЭС104 «Финист», ЭГ2Тв «Иволга» и ЭС1П «Ласточка», представленных в табл. 2 и 4, позволяет сделать предварительный вывод о качестве агрегатов, установленных на рассматриваемом электроподвижном

⁵ ГОСТ Р 33321–2015. Железнодорожный подвижной состав. Устройства акустические сигнальные. Общие технические условия: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 сентября 2015 г. № 1317-ст. 11 с.

⁶ Трунова И. Г., Елькин А. Б., Смирнова В. М. Выбор и расчет средств защиты от шума и вибрации: учеб. пособие. Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2012. 116 с.

составе, в части их шумового излучения. Так, в рабочем режиме на стоянке некоторые агрегаты электропоезда ЭС1П «Ласточка» имеют худшие показатели по сравнению с электропоездами ЭС104 «Финист» и ЭГ2Тв «Иволга». В частности, его компрессор производит на 18,7 дБА более интенсивный шум, чем у электропоезда ЭГ2Тв «Иволга», и на 9,9 дБА — чем у электропоезда ЭС104 «Финист». Из-за этого общий уровень шума электропоезда ЭС1П «Ласточка» на 9,2 дБА выше, чем электропоезда ЭГ2Тв «Иволга», и на 17,1 дБА — чем электропоезда ЭС104 «Финист».

В режиме разгона до скорости 25 км/ч и торможения со скорости 25 км/ч электропоезд ЭС1П «Ласточка» имеет худшие показатели по уровню внешнего шума в среднем на 10 дБА для каждого режима относительно двух других рассматриваемых электропоездов. Однако при движении со скоростью 80 км/ч на прямых участках у электропоезда ЭС1П «Ласточка» на 1,3 дБА шум меньше, чем у электропоезда ЭГ2Тв «Иволга», и на 4,2 дБА — чем у электропоезда ЭС104 «Финист».

При движении в кривой радиусом около 400 м со скоростью 80 км/ч «Ласточка» создает шум на 1,5 дБА меньше электропоезда ЭС104 «Финист», но на 1,9 дБА больше, чем электропоезд ЭГ2Тв «Иволга».

Обсуждение и заключение. Анализ максимального уровня шума при натурных испытаниях электропоезда ЭС1П «Ласточка» показал, что при скорости движения до 80 км/ч наибольшее влияние на уровень его внешнего шума оказывают агрегаты головного вагона, а на более высоких скоростях преобладает шум от зон контактов колес с рельсами.

Оценивать работу отдельных агрегатов необходимо на основании данных, полученных при обходе подвижного состава по периметру, чтобы устранить влияние такого фактора, как взаимодействие колес подвижного состава с рельсами. Оценку максимального уровня внешнего шума от контакта колес с рельсами следует проводить на скоростях около 100 км/ч.

Создание сигнатур внешнего шума позволило перейти к следующему этапу работ — разработке математической модели программного комплекса для измерения и идентификации шумов от железнодорожного подвижного состава. На этом этапе предстоит также подготовить технические требования к аппаратному комплексу, способному посредством сравнения измеренного фактического максимального уровня внешнего шума с данными разработанного классификатора выявлять наличие неисправности агрегатов. Фиксирование отклонений от нормы шумового излучения агрегатами подвижного состава позволит предупредить машиниста об их неисправности и сократить число отказов первой и второй категорий, вызывающих задержку поездов. Кроме того,

будут обеспечены более комфортные условия проживания для населения селитебных территорий, прилегающих к железным дорогам.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Hecht M. Rollgeräusche bei Eisenbahnfahrzeugen. *Der Eisenbahningenieur*. 2010;(6):10–13.
2. Poss P., Jasper P. Der leise Dolomit-Shuttle. Lärmreduzierende Maßnahmen durch K-Sohlen und Radabsorber. *Der Eisenbahningenieur*. 2007;(2):30–34.
3. Иванов Н. И., Куклин Д. А. Проблема шума железнодорожного транспорта и пути ее решения // Защита населения от повышенного шумового воздействия. Сборник докладов III Всероссийской научно-практической конференции, 22–24 марта 2011 г. СПб.: ИННОВА, 2011. С. 108–123. EDN: <https://elibrary.ru/tcoqyj>.
4. Ivanov N. I., Kuklin D. A. The problem of noise in railway transport and solution approach. *Protection of the population from increased noise exposure: Proceedings of the Third All-Russian scientific and Practical Conference, 22–24 March, 2011*. Saint Petersburg: INNOVA; 2011. P. 108–123. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tcoqyj>.
5. Куклин Д. А., Матвеев П. В. Расчет внешнего шума поездов // Noise theory and practice. 2015. Т. 1, № 2(2). С. 47–51. EDN: <https://elibrary.ru/vkbvul>.
6. Kuklin D. A., Matveev P. V. Analysis of trains external noise. *Noise theory and practice*. 2015;1(2(2)):47–51. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vkbvul>.
7. Thompson D. J. *Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of Control*. Elsevier; 2009. 518 p.
8. Kouroussis G., Van Parys L., Conti C., Verlinden O. Prediction of environmental vibrations induced by railway traffic using a three-dimensional dynamic finite element analysis. *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*. 2011;7:1–19. <https://doi.org/10.4203/ccp.96.7>.
9. Schienenlärm Reduktion an der Quelle. *Zusammenhang zwischen Schienenbearbeitung und Lärm im Schienenverkehr* / bearbeitet von M. Hecht, G. Götz, Y. Baumgärtel. Technische Universität Berlin, Regionalverband Südlicher Oberrhein: Freiburg; 2017. 85 S.
10. Колесников И. В., Подуст С. Ф., Подуст С. С., Чукарин А. Н. Способы снижения шума и вибраций при проектировании, производстве и эксплуатации железнодорожного подвижного состава. М.: ВИНТИ РАН, 2015. 216 с. EDN: <https://elibrary.ru/wobvjh>.
11. Kolesnikov I. V., Podust S. F., Podust S. S., Chukarin A. N. *Methods for reducing noise and vibration in the design, production and operation of railway rolling stock*. Moscow: VINITI RAN; 2015. 216 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/wobvjh>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Евгеньевич АДАДУРОВ,

д-р техн. наук, профессор, генеральный директор, ООО «ВНИИЖТ-Инжиниринг» (197374, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Савушкина, 126, лит. Б, помещ. 17-Н), SPIN-код: 4077-1979, <https://orcid.org/0000-0001-6139-0338>

Игорь Иванович ГНАТЧЕНКО,

канд. техн. наук, заместитель генерального директора,
ООО «ВНИИЖТ-Инжиниринг» (197374, Россия,
г. Санкт-Петербург, ул. Савушкина, 126, лит. Б, помещ. 17-Н),
<https://orcid.org/0009-0008-6690-6290>

Юлия Владимировна НИКОЛЬСКАЯ,

начальник отдела экологии, ООО «ВНИИЖТ-Инжиниринг»
(197374, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Савушкина, 126, лит. Б,
помещ. 17-Н), <https://orcid.org/0009-0006-4578-3231>

Андрей Сергеевич ПОНОМАРЕВ,

заведующий лабораторией, отдел динамики,
Научно-исследовательский и конструкторско-технологический
институт подвижного состава (ВНИКИ, 140402, Россия,
г. Коломна, Московская обл., ул. Октябрьской революции, д. 410),
SPIN-код: 9534-5986

Виталий Евгеньевич ДЕГТЯРЕВ,

ведущий инженер, отдел динамики,
Научно-исследовательский и конструкторско-технологический
институт подвижного состава (ВНИКИ, 140402, Россия,
г. Коломна, Московская обл., ул. Октябрьской революции, д. 410),
SPIN-код: 7757-5017

Андрей Юрьевич ПАНИН,

инженер I категории, отдел комплексных испытаний,
Научно-исследовательский и конструкторско-технологический
институт подвижного состава (ВНИКИ, 140402, Россия,
г. Коломна, Московская обл., ул. Октябрьской революции, д. 410),
SPIN-код: 6128-7700

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey E. ADADUROV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Director, LLC VNIIZhT-Engineering
(197374, Saint Petersburg, 17-H, 126B, Savushkina St.),
SPIN-code: 4077-1979, <https://orcid.org/0000-0001-6139-0338>

Igor I. GNATCHENKO,

Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director,
LLC VNIIZhT-Engineering (197374, Saint Petersburg,
17-H, 126B, Savushkina St.), <https://orcid.org/0009-0008-6690-6290>

Yuliya V. NIKOLSKAYA,

Head of Ecology Department, LLC VNIIZhT-Engineering
(197374, Saint Petersburg, 17-H, 126B, Savushkina St.),
<https://orcid.org/0009-0006-4578-3231>

Andrey S. PONOMAREV,

Head of Laboratory, Dynamics Department, Scientific-Research
and Design-Technology Institute of Rolling Stock (140402,
Kolomna, 410, Oktyabrskoy revolyutsii St.), SPIN-code: 9534-5986

Vitaliy E. DEGTYAREV,

Leading Engineer, Dynamics Department, Scientific-Research
and Design-Technology Institute of Rolling Stock (140402,
Kolomna, 410, Oktyabrskoy revolyutsii St.), SPIN-code: 7757-5017

Andrey Yu. PANIN,

1st Category Engineer, Comprehensive Tests Department,
Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling
Stock (140402, Kolomna, 410, Oktyabrskoy revolyutsii St.),
SPIN-code: 6128-7700

ВКЛАД АВТОРОВ

Сергей Евгеньевич АДАДУРОВ. Общее руководство темой,
разработка идеи (25 %).

Игорь Иванович ГНАТЧЕНКО. Формулирование цели и задач,
обзор основных направлений исследований. Написание руко-
писи статьи в части исследований, проводимых АО «ВНИИЖТ»
и ООО «ВНИИЖТ-Инжиниринг» (15 %).

Юлия Владимировна НИКОЛЬСКАЯ. Подготовка данных, ре-
дактирование рукописи статьи в части исследований, проводи-
мых АО «ВНИИЖТ» и ООО «ВНИИЖТ-Инжиниринг» (10 %).

Андрей Сергеевич ПОНОМАРЕВ. Обоснование направления
исследований, руководство проведением испытаний и разра-
ботка методики, редактирование статьи в части исследований,
проводимых в АО «ВНИКИ» (25 %).

Виталий Евгеньевич ДЕГТЯРЕВ. Непосредственное участие
в проведении испытаний, аналитические расчеты (15 %).

Андрей Юрьевич ПАНИН. Расчет зависимостей и обрабо-
тка результатов, написание текста статьи в части исследований,
проводимых в АО «ВНИКИ» (10 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Sergey E. ADADUROV. General topic management, idea deve-
lopment (25 %).

Igor I. GNATCHENKO. Formulation of goals and objectives, review
of the main research directions. Manuscript writing in terms of the
research conducted at Railway Research Institute and LLC VNIIZhT-
Engineering (15 %).

Yuliya V. NIKOLSKAYA. Data preparation, manuscript editing in
terms of the research conducted at Railway Research Institute and
LLC VNIIZhT-Engineering (10 %).

Andrey S. PONOMAREV. Substantiation of the research direc-
tion, tests management and methodology development, editing of
the article in terms of the research conducted at Scientific-Research
and Design-Technology Institute of Rolling Stock (25 %).

Vitaliy E. DEGTYAREV. Direct participation in conducting tests,
analytical calculations (15 %).

Andrey Yu. PANIN. Calculation of dependencies and results process-
ing, article text writing in terms of research conducted at Scientific-
Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock (10 %).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант
рукописи.*

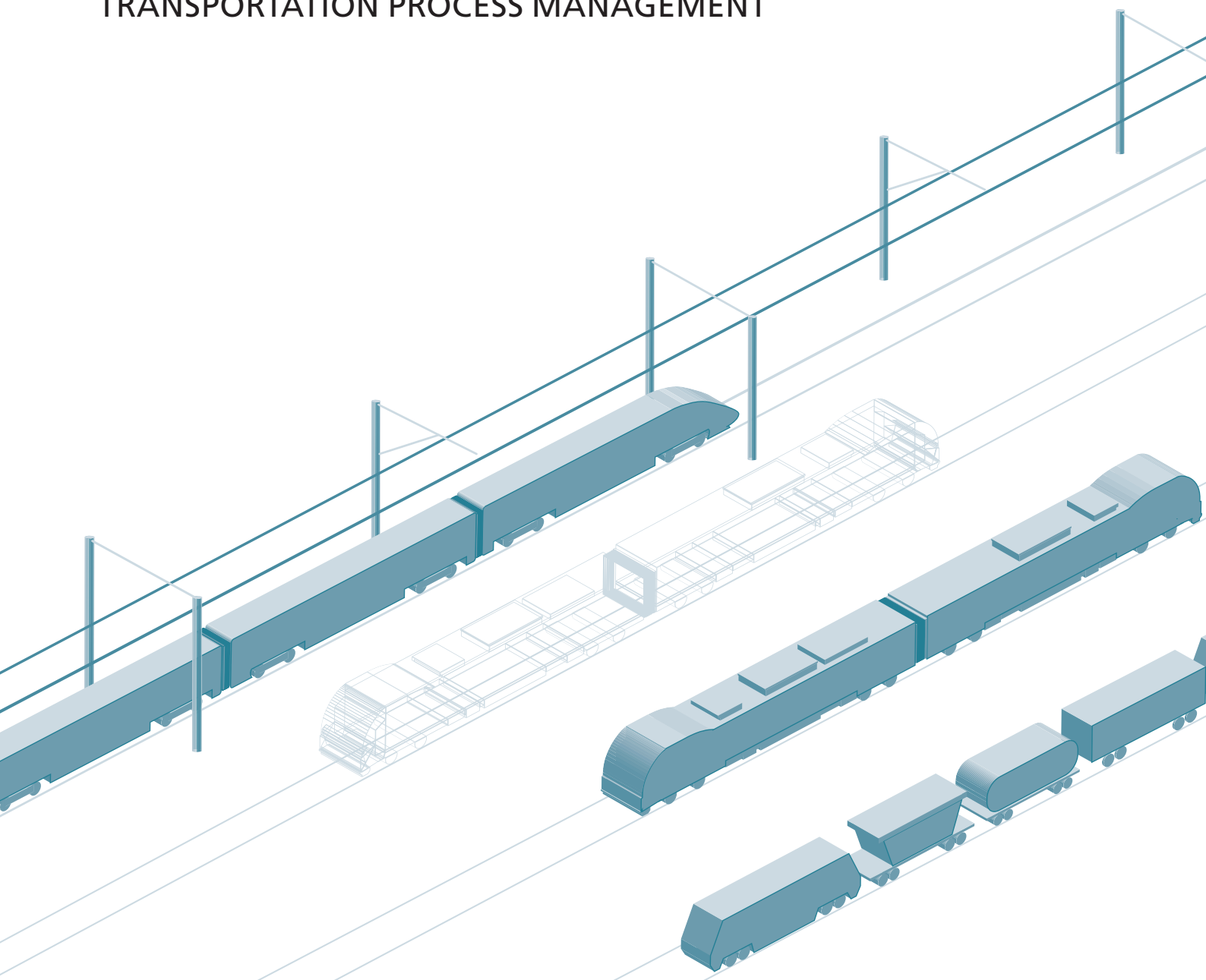
The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 29.09.2025, рецензия от первого рецен-
зента получена 21.10.2025, рецензия от второго рецензента получе-
на 22.10.2025, рецензия от третьего рецензента получена 05.11.2025,
принята к публикации 10.02.2026.

The article was submitted 29.09.2025, first review received 21.10.2025,
second review received 22.10.2025, third review received 05.11.2025,
accepted for publication 10.02.2026.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT



УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Оригинальная научная статья

УДК 656.222.3

EDN: <https://elibrary.ru/ictnyi>DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-49-62>

Научная специальность: 2.9.4. Управление процессами перевозок



Взаимосвязи режимов управления вагонопотоками

А. Ф. Бородин^{1, 2}✉, В. В. Прозоров^{1, 2}¹Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ),
Москва, Российская Федерация²Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Задачи организации вагонопотоков в условиях возможных изменений эксплуатационной обстановки имеют три режима решения (нормативный план формирования поездов, его периодические изменения и оперативные приказы), каждому из которых присущи своя структура целевых функций, настроечные характеристики управляемых переменных и ограничений, что является предметом данной статьи. Целью статьи является формализованная постановка задачи и поиск принципиальных методов ее решения в указанных режимах.

Материалы и методы. Используются методы и положения теории организации вагонопотоков, теории взаимодействия станционных процессов, теории множеств, теории графов, нелинейного математического программирования. Исходные данные для решения задач организации вагонопотоков представлены в виде структурированного набора взаимосвязанных сетевых моделей среднесуточных вагонопотоков и динамических данных о дислокации вагонов. Управляемыми переменными являются множества назначений грузовых поездов и путей следования, а также признаки прикрепления вагонопотоков к назначениям поездов и назначений к путям следования. На целевую функцию налагаются инфраструктурные, логистические и ресурсные ограничения, обладающие взаимозависимостью. Целевая функция расчета плана формирования, предусматривающая минимизацию среднесуточных затрат на продвижение вагонопотока, в парадигме жизненного цикла плана формирования дополнена компонентой, учитывающей затраты на переходы между периодами действия и режимами работы системы организации вагонопотоков.

Результаты. Необходимость корректировок плана формирования оценивается на основе сопоставления балансового и нормативного наличия вагонов рабочего парка на подразделении железнодорожной сети. В зависимости от этого соотношения, с учетом возможных структуры вагонопотока и ресурсного обеспечения, принципиально определен набор стратегий поиска решений по приведению системы организации вагонопотоков к нормативному состоянию.

Обсуждение и заключение. Представленные в работе положения являются основой для дальнейшей содержательной настройки используемой экономико-математической модели расчета плана формирования методом пошагового распределения вагонопотоков по сети допустимых назначений поездов для эффективного решения рассматриваемых задач.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вагонопоток, организация вагонопотоков, план формирования поездов, оперативное управление, рабочий парк вагонов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бородин А. Ф., Прозоров В. В. Взаимосвязи режимов управления вагонопотоками // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2026. Т. 85, № 1. С. 49–62. EDN: <https://elibrary.ru/ictnyi>.



TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

Original article
UDK 656.222.3
EDN: <https://elibrary.ru/ictnyi>
DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-49-62>
Scientific specialty: 2.9.4. Transportation process management



Interdependence of car traffic volumes operation modes

Andrey F. Borodin^{1, 2}✉, Vladimir V. Prozorov^{1, 2}

¹Institute of Economics and Development of Transport,
Moscow, Russian Federation

²Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The tasks of car traffic volumes operation in terms of possible changes of service conditions have three solution modes (normative train make-up plan, its periodic changes and operative orders), each of which has its own structure of objective functions, tuning characteristics of controlled variables and constraints, which is the subject of the article. The objective of the article is a formalised statement of the problem and the principal methods of its solution in these modes.

Materials and methods. The methods and provisions of the theory of car traffic volumes organisation, the theory of interaction of station processes, set theory, graph theory, and nonlinear mathematical programming are used. The initial data for solving the problems of the car traffic volumes organisation are presented in the form of a structured set of interdependent network models of average daily car traffic volumes and dynamic data on the location of cars. The controlled variables are the sets of goods train destinations and routes, as well as signs of attachment of car traffic volumes to train destinations and train destinations to routes. The objective function is subject to infrastructural, logistical and resource constraints that are interdependent. The objective function of the train make-up plan calculating provides for minimising the average daily cost of promoting car traffic. In the paradigm of the lifecycle of the car traffic volumes operation it is supplemented by a component that considers the cost of transitions between the periods of operation and operating modes of the car traffic volumes organisation system.

Results. The need for adjustments to the make-up plan is caused by a change in the flow structure or the availability of resources and is assessed based on a comparison of the working car fleet balance and normative on the railway network division. Depending on this ratio, the authors fundamentally define a set of strategies for finding solutions to normalisation the car traffic volumes organisation system.

Discussion and conclusion. The provisions presented in the article are the basis for further structural adjustment of the used economic and mathematical tools for calculating the train make-up plan by the method of step-by-step distribution of car traffic across a network of acceptable train assignments to effectively solve the defined tasks.

KEYWORDS: car traffic volume, car traffic volumes organisation, train make-up plan, operative management, working car fleet

FOR CITATION: Borodin A.F., Prozorov V.V. Interdependence of car traffic volumes operation modes. *Russian Railway Science Journal*. 2026;85(1):49–62. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-49-62>.

Введение. Технология организации вагонопотоков, определяющая порядок включения вагонов разных назначений в поезд и пропуска их по сети железных дорог, должна обеспечивать эффективную работу сети в условиях возможных отклонений фактических вагонопотоков от плановых и изменений эксплуатационной обстановки. В связи с этим, задачи организации вагонопотоков имеют три режима решения [1]:

- нормативный план формирования грузовых поездов, устанавливаемый ежегодно (далее — НПФ);
- периодические изменения (корректировки) плана формирования грузовых поездов (далее — ИПФ);
- оперативные приказы, устанавливаемые как на суточный план поездной работы, так и для определенных поездов в течение отчетных суток и работы диспетчерских смен (далее — ОПФ).

Основы используемых алгоритмических решений по организации сетевых вагонопотоков были сформулированы в [2]. Расчет плана формирования методом пошагового распределения вагонопотоков по сети допустимых назначений поездов позволяет одновременно производить как выбор назначений, так и путей их следования, обеспечивающих минимальные эксплуатационные расходы на продвижение вагонопотока. Для учета ряда ограничений в целевую функцию расчета вводятся повышающие или понижающие коэффициенты за превышение ресурсов и/или использование резервов, которые, гарантируя решаемость задачи, позволяют также определить перегруженные элементы сети или принудительно отклонить вагонопотоки отличным от оптимального по стоимости путем. Дальнейшие расчеты по корректировке плана формирования связаны с учетом других критериев эффективности (кроме минимума затрат на проследование и переработку), таких как допустимые сроки доставки грузов, улучшение использования станционных мощностей, повышение качества оперативного управления [3]. Учет этих условий предусматривает исключение мало-мощных назначений с длительными периодами накопления составов, создающими высокие риски несвоевременной доставки грузов, и выделение из сочетания рассчитанных назначений более дальних (т.е. повышение транзитности вагонопотоков) для снижения заполнения перерабатывающих способностей станций. Временные затруднения в эксплуатационной работе компенсируются различными мерами оперативного регулирования, которые вырабатываются на основании анализа выполнения перевозок с учетом изменений и допущенных нарушений плана формирования. Такие мероприятия оформляются оперативными приказами [4].

Жизненный цикл плана формирования поездов, представленный на рис. 1, отражает последовательность действий по его разработке и утверждению¹, которые соответствуют указанным режимам решения задач организации вагонопотоков. Ежегодная оптимизация НПФ, выполняемая с учетом полученных предложений по изменению технологии организации вагонопотоков (блок «Оптимизационные расчеты»), включает в себя согласование по сортировочным станциям и согласование с графиком движения поездов (блоки «Согласование <...>»), т.е. проверку соответствия ограничениям по перерабатывающей способности станций и пропускной способности участков железнодорожной сети, а также расчет показателей системы организации вагонопотоков. В ходе контроля технологии

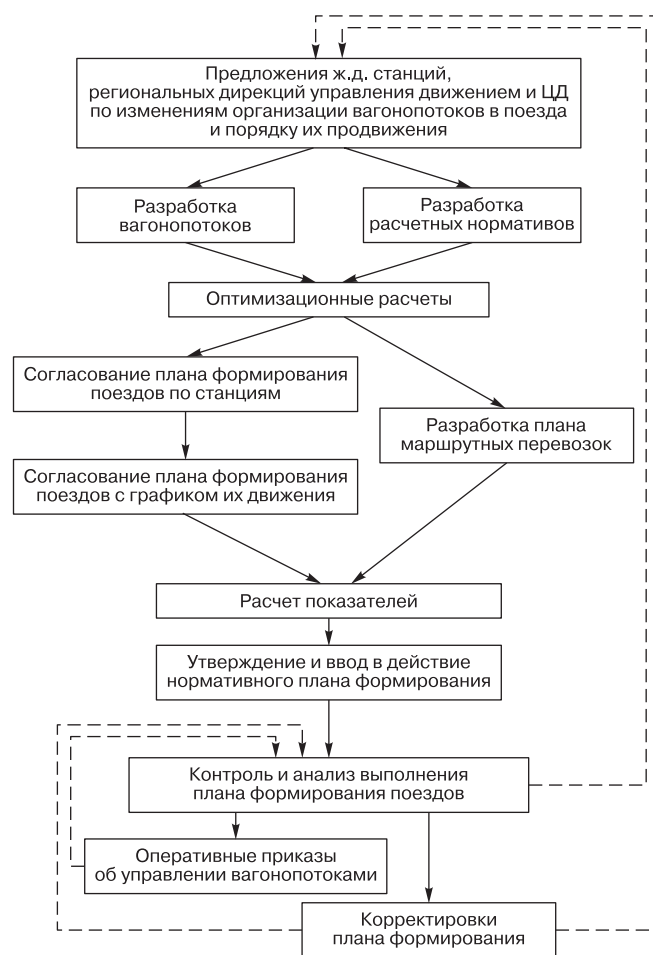


Рис. 1. Порядок разработки, ввода в действие и выполнения (жизненный цикл) плана формирования грузовых поездов*

* Источник: данные авторов

Fig. 1. Lifecycle of the train make-up plan*

* Source: authors' data

¹ Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29 декабря 2018 г. № 2872/р. М., 2018. 329 с.

организации вагонопотоков при сравнении фактического выполнения показателей утвержденного плана формирования с расчетными значениями (блок «Контроль и анализ выполнения плана формирования поездов») намечаются предложения по дальнейшей оптимизации или, при необходимости, по перестройке технологии в режимы ИПФ или ОПФ, которые, при подробном рассмотрении, вводятся в действие тем же порядком (актуализация переменной информации — оптимизация и согласование плана формирования — расчет показателей). Однако каждому из трех режимов присуща своя структура целевых функций, свои настроечные характеристики управляемых переменных и ограничений [1].

Комплексная модель планирования и оперативного управления вагонопотоками была предложена А. В. Кутыркиным. В исследовании [5] отмечено, что изменения действующей системы организации вагонопотоков, вызванные снижением уровня какого-нибудь вида ресурса, требуют различных подходов в зависимости от величины дефицита: «пассивного» управления с изменением системы назначений и/или способов прикрепления к ним вагонопотоков или «активного» — с динамическим управлением структурой потоков. В работе [6] предложена математическая модель проведения оперативной корректировки, суть которой заключается в получении наибольшего эффекта при наименьшем количестве изменений плана формирования, что может быть достигнуто определением локального полигона перерасчета плана формирования. Недостаточное развитие информационно-аналитических возможностей и технологии планирования для полнофункциональной реализации идей [5–6] в дальнейшем было предложено преодолевать путем записи постановки с нечеткими интервалами исходных данных [7].

Комплекс исследований научной школы, созданной и возглавляемой А. Т. Осьмининим, имеет ряд фундаментальных результатов, включающий концепцию интеллектуальных рабочих мест, интегрированных с процессами планирования и выполнения перевозок, с выделением обеспечивающего, планирующего, расчетного и реализующего уровней взаимодействия автоматизированных систем [8–9]. Предложена методика адаптации плана формирования поездов к изменениям эксплуатационных условий на основе нечетких множеств и нейросетевых технологий [10].

Ряд результатов по организации вагонопотоков в изменяющихся условиях представлен в зарубежных

исследованиях и информационных материалах, в том числе для железных дорог колеи 1520 мм. На Белорусской железной дороге для обоснования выделения струи вагонопотока в самостоятельное назначение предложена дополнительная дифференциация оценки следования вагонов и локомотивов в грузовых поездах разных категорий [11]. На основе анализа качества системы организации вагонопотоков по оценке фактического выполнения плана формирования [12], исторических данных и предиктивной аналитики транспортных потоков [13] разработана процедура адаптивной оценки сквозных назначений поездов [14]. При выполнении расчетов по корректировке плана формирования поездов на железных дорогах Беларуси, Казахстана, Китая (КНР) особое внимание уделяется организации групповых поездов для освоения маломощных вагонопотоков и сокращения времени нахождения грузовых отправок в пути [15–16]. Цифровая трансформация управления грузовыми перевозками на железных дорогах Европейского союза [17] предусматривает согласование расписаний грузовых поездов при взаимодействии самостоятельных владельцев инфраструктур и перевозчиков. Ряд зарубежных железнодорожных систем используют программный комплекс MultiRail консалтинговой компании Oliver Wyman², предоставляющий информационно-аналитические сервисы конструирования маршрутных сетей грузовых поездов; адаптированная версия MultiRail Enterprise Edition, имеющая функционал планирования и прогнозирования вагонопотоков и нормирования эксплуатационной работы, внедрена на железных дорогах Казахстана³.

Вместе с тем развитие рассматриваемой тематики требует разработки методических положений по формализованному описанию постановки взаимоувязанных задач планирования, нормирования и оперативного управления вагонопотоками, что является целью настоящей статьи.

Материалы и методы. Исходные данные для решения задач управления вагонопотоками в трех режимах структурированы набором взаимосвязанных сетевых потоковых моделей⁴.

Введем индексные обозначения:

i, j — станции отправления и назначения вагона;

α, β — станции формирования и назначения поезда;

x — плановый календарный период;

$(x - 1)$ — текущий календарный период;

t_{x-1}, t_x — длительность соответственно текущего и планового календарных периодов, сут;

d — текущая дата;

² MultiRail: An Oliver Wyman solution. URL: www.oliverwyman.com/our-expertise/solutions/multirail.html (дата обращения: 30.12.2025).

³ Эффект перехода на цифровой формат управления // Forbes Kazakhstan. URL: forbes.kz/news/newsid_152610 (дата обращения: 30.12.2025).

⁴ Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД».

y — элемент (ребро графа) транспортной сети (станция, сортировочная система, расчетный участок);

$\{y^*\}$ — подмножество элементов транспортной сети, по которым установлен контроль отклонений исполненных параметров перевозочной работы от нормативных (плановых) значений;

g — специализация ниток графика движения поездов;

z — набор серий (секционности) поездных и маневровых локомотивов.

Для организации вагонопотоков в режиме НПФ исходными данными является массив среднесуточных вагонопотоков A , характеризуемых набором признаков, приведенных в формуле (1)⁵:

$$\{A | N_{ij}; POR_{ij}; RPS_{ij}; GRUZ_{ij}; \{DOP_{ij}\}\}, \quad (1)$$

где N_{ij} — корреспонденция вагонопотока от станции i до станции j ;

POR_{ij} — признак порожнего или груженого вагонопотока;

RPS_{ij} — род подвижного состава;

$GRUZ_{ij}$ — род перевозимого груза;

$\{DOP_{ij}\}$ — набор дополнительных признаков для прикрепления вагонопотоков к поездным назначениям (по грузополучателям, операторам вагонного парка, железнодорожным путям необщего пользования, категориям годности порожних вагонов под погрузку и др.).

Расчет режима ИПФ должен учитывать не только среднесуточные вагонопотоки планируемого периода, но и фактические отклонения наличия вагонных парков и исполненных вагонопотоков от нормативных значений. Следовательно, должны быть заданы следующие параметры:

- массив среднесуточных вагонопотоков $A(x)$ планового (прогнозируемого) периода x с набором признаков:

$$\{A(x) | N_{ij}(x); POR_{ij}; RPS_{ij}; GRUZ_{ij}; \{DOP_{ij}\}\}, \quad (2)$$

- поструйное и поэлементное наличие вагонов на элементе (подразделении) сети y : $P_{ijy(x-1)}^*$, $P_{ijy(x-1)}^d$ — нормативное наличие вагонов корреспонденции (i, j) и их фактическое балансовое наличие на дату d текущего периода $(x-1)$;

- величины отклонений исполненных вагонопотоков от плановых заданий по контролируемым сечениям графа транспортной сети:

$$\Delta N_y = \frac{\sum_{t=1}^{d-1} \sum_i \sum_j (N_{ijy(x-1)}^* - N_{ijy(x-1)})}{d-1} \quad \forall y \in \{y^*\}, \quad (3)$$

где $N_{ijy(x-1)}^*$, $N_{ijy(x-1)}$ — плановые значения вагонопотока корреспонденции (i, j) и их исполненные значения по датам от 1 до $(d-1)$ текущего периода $(x-1)$, ваг./сут.

Для расчетного обоснования оперативных приказов на отклонения от плана формирования требуются не статические среднесуточные, а динамические данные о:

- дислокации вагонов каждой корреспонденции массива B :

$$\{B | P_{ijy}; POR_{ij}; RPS_{ij}; GRUZ_{ij}; \{DOP_{ij}\}\}, \quad (4)$$

- прогнозируемом образовании вагонопотока каждой корреспонденции массива B (к отправлению, на сдачу и др.) с признаками:

$$\{B | \tilde{N}_{ijy}; POR_{ij}; RPS_{ij}; GRUZ_{ij}; \{DOP_{ij}\}\}, \quad (5)$$

где $\tilde{N}_{ijy}$ — величина образования вагонопотока корреспонденции (i, j) на элементе транспортной сети y , ваг./сут;

- прогнозируемом образовании поездопотока $\{\tilde{n}_{\alpha\beta y}\}$;
- величинах отклонений (3).

Соответствие множеств (4) и (5) устанавливается через коэффициенты подвижности вагонных парков или прямым имитационным моделированием.

К управляемым переменным относятся:

- перечни назначений грузовых поездов W , включая маршрутные и контейнерные, и наборы их характеристик, приведенные в формуле (6):

$$\left\{ W \left| \begin{array}{l} (STF; STN; STF_{GR}; STN_{GR}; STF_M; \\ STN_M; STF_{KP}; STN_{KP}; RP; \\ Q_{\min}; Q_{\max}; m_{\min}; m_{\max} \end{array} \right. \right\}; \quad (6)$$

- пути следования грузовых поездов $S(W)$ и наборы их характеристик:

$$\{S(W) | \{S_{URLB}\}; \{ST_{PRLM}\}; \{USL\}\}, \quad (7)$$

- признаки прикрепления вагонопотоков A к назначениям поездов и поездных групп W :

$$R_{AW} = \begin{cases} 0, \\ 1; \end{cases} \quad (8)$$

- признаки прикрепления поездных назначений W к путям следования S :

$$U_{WS} = \begin{cases} 0, \\ 1; \end{cases} \quad (9)$$

где STF , STF_{GR} , STF_M , STF_{KP} — станции формирования поездов, поездных групп, маршрутов и контейнерных поездов;

STN , STN_{GR} , STN_M , STN_{KP} — станции их назначения;

⁵ Формулы (1)–(35) разработаны авторами [Бородин А. Ф., Прозоров В. В.].

RP — род поезда;
 $Q_{\min(\max)}, m_{\min(\max)}$ — минимальные и максимальные значения массы и длины составов поездов;
 $\{S_{URLB}\}$ — массив участков работы локомотивных бригад на пути следования поездного назначения;
 $\{ST_PRLM\}$ — массив станций перелома норм массы и длины;
 $\{USL\}$ — набор условий отправления поездов назначения W по пути следования $S(W)$ (календарная периодичность назначения, допустимое количество раз в сутки, прикрепление к специализированным ниткам графика движения поездов, допустимость отправления при заполнении установленных размеров грузового движения по основному пути следования).

Настройными характеристиками управляемых переменных являются наборы обязательных (в формулах (10)–(12) обозначены верхним индексом «об»)

и запрещенных (обозначены верхним индексом «з») прикреплений вагонопотоков к поездным назначениям и назначений поездов к путям следования:

- в режиме НПФ:

$$\{R_{AW}^{об}\}; \{R_{AW}^з\}; \{U_{WS}^{об}\}; \{U_{WS}^з\}; \quad (10)$$

- в режиме ИПФ для календарного периода x :

$$\{R_{AW}^{об}(x)\}; \{R_{AW}^з(x)\}; \{U_{WS}^{об}(x)\}; \{U_{WS}^з(x)\}; \quad (11)$$

- в режиме ОПФ для текущей даты d :

$$\{R_{AW}^{об}(d)\}; \{R_{AW}^з(d)\}; \{U_{WS}^{об}(d)\}; \{U_{WS}^з(d)\}. \quad (12)$$

Ограничения на решения задач организации вагонопотоков подразделяются на инфраструктурные, логистические и ресурсные. Формульное представление ограничений этих классов и некоторые их свойства представлены в табл. 1.

Таблица 1

Ограничения на решения задач организации вагонопотоков*

Table 1

Constraints on solving the tasks for car traffic volumes organisation*

Классы ограничений	Расчетная формула	№ формулы	Степень жесткости соблюдения**				Возможность планирования***		
			1	2	3	4	1	2	3
Логистические									
Допустимое время нахождения отправок на элементах сети	$t_{\text{след}} = \sum t_{\text{ст}} + \sum t_{\text{уч}} \leq D_{\text{ю}}$	(13)	—	✓	—	—	—	—	✓
Регулярность продвижения транспортных потоков	$ I_{\text{приб}} - I_{\text{согл}} \leq \varepsilon_{\text{инт}}$	(14)	—	—	—	✓	—	✓	—
Согласованность подвода	$ T_{\text{приб}} - T_{\text{согл}} \leq \varepsilon_T$	(15)	—	—	—	✓	—	✓	—
Размеры грузовых партий	$\sum Q_{\text{н}} = Q_{\text{груз}}$	(16)	—	—	—	✓	—	✓	—
Инфраструктурные									
Допустимые размеры движения по участкам	$n_g \leq n_{\text{т.уч } g}$	(17)	—	✓	—	—	—	—	✓
Нормы массы и длины	$Q_{\text{бр}} \leq Q_{\text{бр}}^{\text{крит}}, m_{\text{усл}} \leq m_{\text{усл}}^{\text{max}}$	(18)	✓	—	—	—	✓	—	—
Допустимые размеры переработки	$N_{\text{пер}} \leq N_{\text{т}}(k)$	(19)	—	—	✓	✓	—	—	✓
Число формируемых назначений	$k \leq k_{\text{т}}(N_{\text{пер}})$	(20)	—	—	✓	✓	—	—	✓
Допустимые размеры движения по станциям	$n_{\text{тр}} \leq n_{\text{т.тр}}$	(21)	—	—	✓	✓	—	—	✓
Допустимые размеры переработки по станциям погрузки и выгрузки	$N_{\text{погр(выгр)}} \leq N_{\text{т.погр(выгр)}}$	(22)	—	—	✓	✓	—	—	✓
Допустимые размеры вагонного парка	$P_{\text{ст(ноп)}} \leq P_{\text{т.ст(ноп)}}$	(23)	—	—	✓	✓	—	—	✓
Ресурсные									
Наличие локомотивов грузового движения	$M_{\text{потр}}^z \leq M_{\text{тех}}^z$	(24)	✓	—	—	—	✓	—	—
Наличие маневровых локомотивов	$M_{\text{ман.потр}}^z \leq M_{\text{ман.тех}}^z$	(25)	✓	—	—	—	✓	—	—
Наличие вагонного парка	$P_{\text{потр}} \leq P_{\text{раб}}$	(26)	—	—	✓	—	—	—	✓

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

** Степень жесткости соблюдения: 1 — превышение физически невозможно; 2 — превышение возможно при заданных условиях; 3 — превышение требует дополнительных ресурсов; 4 — превышение влечет финансовые потери

*** Возможность планирования: 1 — план; 2 — договор; 3 — расчет

Обозначения в формулах (13)–(26):

$t_{\text{след}}$ — время нахождения отправок на элементах сети, сут;

$\sum t_{\text{ст}}, \sum t_{\text{уч}}$ — время нахождения отправок в пути, приходящееся на технические станции и участки, сут;

$D_{\text{ю}}$ — нормативный срок доставки отправок, сут;

$I_{\text{приб(согл)}}, T_{\text{приб(согл)}}$ — рассчитанные и согласованные (установленные) интервалы и времена подвода транспортных потоков, ч;

$\varepsilon_{\text{инт}}, \varepsilon_T$ — допустимые отклонения интервалов и времени подвода транспортных потоков от согласованного, ч;

$Q_{\text{н}}, Q_{\text{груз}}$ — рассчитанный и установленный размер грузовой партии, т нетто;

$n_g, n_{\text{т.уч } g}$ — рассчитанное и технически допустимое число поездов специализации g в графике движения на расчетном участке, поездов/сут;

$Q_{\text{бр}}, Q_{\text{бр}}^{\text{крит}}$ — рассчитанные и критические нормы массы поездов на расчетном участке, т брутто;

$m_{\text{усл}}, m_{\text{усл}}^{\text{max}}$ — рассчитанные и максимальные нормы длины поездов на расчетном участке, условные вагоны (у. в.);

$N_{\text{пер}}, N_{\text{т}}$ — рассчитанные и технически допустимые размеры перерабатываемого вагонопотока на станции (в сортировочной системе), ваг./сут;

$k, k_{\text{т}}$ — рассчитанное и технически допустимое количество назначений формируемых поездов на станции (в сортировочной системе);

$n_{\text{тр}}, n_{\text{т.тр}}$ — рассчитанные и технически допустимые размеры движения транзитных поездов без переработки на станции (в сортировочной системе), поездов/сут;

$N_{\text{погр(выгр)}}, N_{\text{т.погр(выгр)}}$ — рассчитанные и технически допустимые размеры погрузки и выгрузки на станции, железнодорожном пути необщего пользования, ваг./сут;

$P_{\text{ст(ноп)}}, P_{\text{т.ст(ноп)}}$ — наличный и технически допустимый рабочий парк грузовых вагонов на станции и железнодорожном пути необщего пользования;

$M_{\text{потр}}^z, M_{\text{ман.потр}}^z, M_{\text{тех}}^z, M_{\text{ман.тех}}^z$ — потребное и доступное количество локомотивов грузового и маневрового движения z -й серии и секционности;

$P_{\text{потр}}, P_{\text{раб}}$ — потребный и доступный рабочий парк грузовых вагонов.

В режиме НПФ ограничения в формулах (13)–(26) вычисляются согласно действующим нормативно-методическим документам, утвержденным владельцем инфраструктуры общего пользования, в режиме ИПФ — с учетом изменений для планового периода x . Кроме того, при возникновении барьерных мест в результате непрогнозируемого воздействия величины ограничений подлежат только апостериорной оценке.

В режиме ОПФ ограничения для расчета корректирующих воздействий на продвижение вагонопотоков должны предусматривать сопоставление:

- дислокации вагонов — с нормативным и допустимым постройным наличием;
- образования вагоно- и поездопотока — с нормами отправления (сдачи) или допустимыми размерами движения и переработки для планируемого периода.

Помимо указанных в таблице свойств, ограничения обладают взаимозависимостью, которая выражается в невозможности изменения одного из ограничений без обязательного изменения другого (рис. 2). Рост числа назначений поездов, формируемых на станции или в сортировочной системе, сокращает возможности размещения на сортировочных путях накопленных, но не «выставленных» (не отправленных) составов, что приводит к снижению технически допустимых размеров переработки вагонов (рис. 2, а). Увеличение размеров перерабатываемого вагонопотока приводит к росту числа составов, выставяемых на приемо-отправочные пути для подготовки к отправлению, из-за чего возрастает уровень загрузки этих путей, и при их вариантной специализации снижаются технически допустимые размеры движения транзитных поездов без переработки (рис. 2, б). Повышение коэффициента сдвоенных грузовых операций и уровня маршрутизации перевозок увеличивает технически допустимые размеры погрузки/выгрузки (рис. 2, в). Повышение массы и длины грузовых поездов приводит к росту станционных и межпоездных интервалов и снижению коэффициента пакетности графика движения, вследствие чего уменьшаются допустимые размеры движения поездов по участкам (рис. 2, г).

В общем случае:

$$N_{\text{т}} = f_1(k); \quad (27)$$

$$k_{\text{т}} = f_2(N_{\text{пер}}); \quad (28)$$

$$n_{\text{т.тр}} = f_3(N_{\text{т}}); \quad (29)$$

$$N_{\text{т.погр(выгр)}} = f_4(\alpha_{\text{м.пр}}, \alpha_{\text{м.от}}, k_{\text{сдв}}); \quad (30)$$

$$P_{\text{ст}} = f_5(N_{\text{т}}, n_{\text{т.тр}}, N_{\text{т.погр}}, N_{\text{т.выгр}}, k_{\text{сдв}}, t_{\text{пер}}, t_{\text{тр}}, t_{\text{м}}, E_{\text{рег}}); \quad (31)$$

$$n_{\text{т.уч } g} = f_6(Q_{\text{бр}}^{\text{крит}}, m_{\text{усл}}^{\text{max}}), \quad (32)$$

где $\alpha_{\text{м.пр}}, \alpha_{\text{м.от}}$ — уровень маршрутизации перевозок по прибытию и по отправлению, %;

$k_{\text{сдв}}$ — коэффициент сдвоенных грузовых операций;

$t_{\text{пер}}, t_{\text{тр}}, t_{\text{м}}$ — время на обработку вагонов на станции соответственно с переработкой, без переработки, местных, ч;

$E_{\text{рег}}$ — регулирующие емкости путевого развития станции [18], ваг.

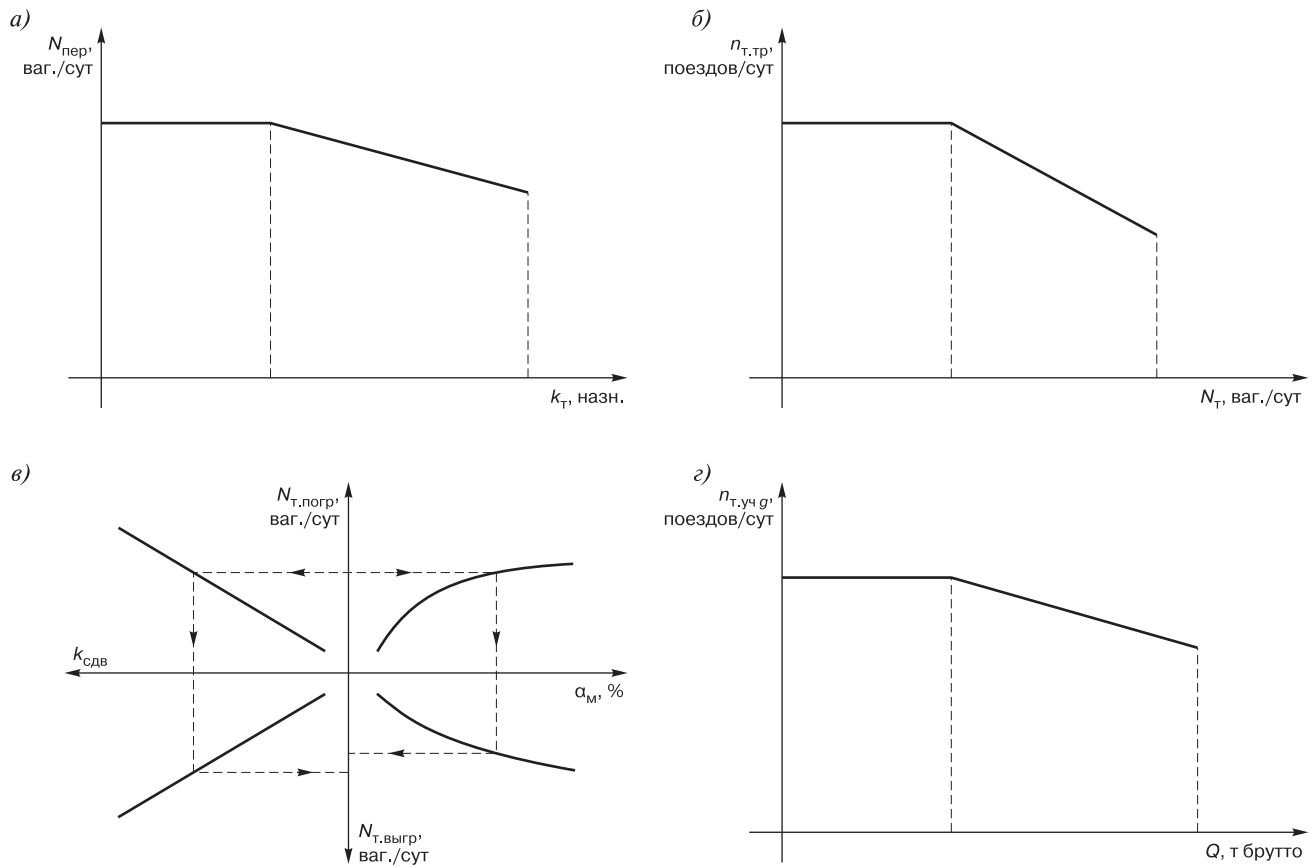


Рис. 2. Взаимозависимости ограничений*:

a — технически допустимого числа назначений и размеров переработки; *б* — технически допустимых размеров движения транзитных поездов без переработки и размеров перерабатываемого вагонопотока при вариантной специализации приемоотправочных путей; *в* — технически допустимых размеров погрузки и выгрузки, уровня маршрутизации по отправлению и прибытию и коэффициента двоянных грузовых операций; *г* — технически допустимых размеров движения поездов на расчетном участке и критической нормы массы поезда

* Источник: данные авторов

Fig. 2. Constraints interdependency*:

a — of technically permissible number of destinations and yard operation sizes; *б* — of technically permissible sizes of through trains without yard operation and sizes of car traffic rehandling with a variant specialisation of the receiving-and-departure tracks; *в* — of technically permissible sizes of loading and unloading, level of routing for departure and arrival and dual freight operation factor; *г* — of technically permissible sizes of train traffic on the designed track and critical train weight limit

* Source: authors' data

Несоблюдение одного класса ограничений при возрастании потоковой нагрузки выше технически допустимой приводит к росту потребности в ресурсах для вписывания в другие ограничения. Так, из-за нарушения первичного инфраструктурного ограничения может возникнуть потребность в дополнительных ресурсах. Например, превышение технически допустимых объемов переработки на станции приведет к задержкам поездов по неприятию, снижению участковой скорости грузовых поездов на прилегающих участках и потребует привлечения дополнительного парка локомотивов грузового движения:

$$N_{\text{пер}} > N_{\text{т}} \Rightarrow \begin{cases} n_g + \Delta n_g > n_{\text{т.уч.г}}, \\ M_{\text{потр}}^z + \Delta M_{\text{потр}}^z > M_{\text{тех}}^z. \end{cases} \quad (33)$$

В свою очередь, рост размеров движения на участках сверх технически допустимых приведет к задержкам вывоза поездов и увеличению рабочего парка грузовых вагонов сверх технически допустимой величины на станции, затем — на примыкающих железнодорожных путях необщего пользования:

$$n_g > n_{\text{т.уч.г}} \Rightarrow \begin{cases} n_{\text{тр}} + \Delta n_{\text{тр}} > n_{\text{т.тр}}, \\ N_{\text{пер}} + \Delta N_{\text{пер}} > N_{\text{т}}, \\ P_{\text{ст(ноп)}} + \Delta P_{\text{ст(ноп)}} > P_{\text{т.ст(ноп)}}. \end{cases} \quad (34)$$

В формулах (33) и (34) отражено увеличение потребных ресурсов из-за превышения первичного ограничения: Δn_g — размеров движения поездов специализации *g*, поездов/сут; $\Delta M_{\text{потр}}^z$ — парка локомотивов

z -й серии и секционности; $\Delta l_{\text{тр}}$ — размеров движения транзитных поездов без переработки на станции (в сортировочной системе), поездов/сут; $\Delta N_{\text{пер}}$ — перерабатываемого вагонопотока, ваг./сут; $\Delta P_{\text{ст(ноп)}}$ — рабочего парка грузовых вагонов на станции и железнодорожном пути необщего пользования.

При дальнейшем повышении потоковой нагрузки все доступные ресурсные возможности перестают отвечать условиям ограничений, и это приводит к ухудшению финансового результата работы сети железных дорог ОАО «РЖД».

Особенности целевых функций. Классической целевой функцией расчета плана формирования грузовых поездов является минимизация среднесуточных затрат на накопление составов, переработку вагонов и продвижение поездов⁶. В исследовании [3] представлены также дополнительные компоненты целевой функции, связанные с эффектами повышения транзитности вагонопотоков за счет улучшения регулирования продвижения, ускорения обработки вагонов на станциях назначения и путях необщего пользования, учета внутрисуточных режимов поездной и станционной работы и др.

Рассмотрение плана формирования в парадигме жизненного цикла, представленного на рис. 1, предполагает учет не только среднесуточных затрат E_x в течение каждого календарного периода действия плана x , но и затрат на переходы между периодами $E_{\text{перех}(x-1, x)}$. Значения $E_{\text{перех}(x-1, x)}$ представляют собой стоимостные оценки перестройки технологии работы, включая повторную переработку вагонов, увеличение размеров углового потока на сортировочных станциях, другие дополнительные маневровые операции, передислокацию тяговых ресурсов, перемещение штата осмотров-ремонтников вагонов и др. Для сходной задачи в исследовании П. А. Козлова⁷ предложено определять такие оценки как средние по статистическому набору результатов имитационного моделирования.

Кроме того, целевая функция предусматривает минимизацию превышения рассчитанных затрат E на осуществление грузовых перевозок над плановыми затратами $E_{\text{план}}$, определенными бюджетным заданием:

$$\Delta E = \sum_{x=1}^X (E_x t_x + E_{\text{перех}(x-1, x)}) - E_{\text{план}} \rightarrow \min. \quad (35)$$

Условие (35) должно содержать интегрированную оценку решений, принимаемых в режимах НПФ, ИПФ и ОПФ. При этом составляющая $E_{\text{перех}(x-1, x)}$ должна обеспечивать отсев вариантов, требующих больших

изменений действующего плана формирования при незначительном эффекте. Совместно с корректировкой характеристик (формулы (10)–(12)) и предложенным в [3] приемом включения в результирующий план изменений, обеспечивающих снижение зависящих расходов (не менее чем на 5% по включаемым корреспонденциям) при заданной дальности их следования (не менее 800 км), это позволяет избежать глобальных изменений, полностью перестраивающих технологию организации вагонопотоков и невозможных в регулярном режиме.

Результаты. Необходимость корректировок плана формирования может быть обусловлена двумя причинами:

- изменением потоковой структуры, которое оценивается сопоставлением балансового и нормативного наличия вагонов рабочего парка;
- изменением наличия ресурсов, под которыми понимаются пропускные и перерабатывающие способности элементов инфраструктуры и емкости путевого развития с учетом допустимых уровней их заполнения, а также парки локомотивов и контингент локомотивных бригад в грузовом и маневровом движении.

Динамика наличия вагонов на полигоне железнодорожной сети оценивается на основе сопоставления балансового $P_{\text{бал}}$ и нормативного $P_{\text{норм}}$ наличия вагонов рабочего парка (рис. 3).

На рис. 3 пороговые значения ε_P^+ и ε_P^- — допустимое увеличение и уменьшение вагонного парка, в пределах которых управляющих воздействий не требуется, ε_N^+ и ε_N^- — допустимое увеличение и уменьшение вагонопотока, в пределах которых управляющих воздействий не требуется, ε_R^- — допустимое уменьшение ресурса, при котором управляющих воздействий не требуется, ΔN^+ и ΔN^- — увеличение и уменьшение вагонопотока, ваг./сут, ΔR^- — уменьшение доступного ресурса.

В зависимости от представленных соотношений возможны шесть стратегий управления вагонопотоками для приведения системы к нормативному состоянию:

1 — избыток наличия вагонного парка при росте поступающего вагонопотока и одновременном снижении ресурса требует уменьшения поступления вагонов с перераспределением вагонопотоков на менее загруженный ресурс;

2 — избыток наличия вагонного парка при росте поступающего вагонопотока и сохранении величины ресурса требует уменьшения поступления вагонов и форсирования использования ресурса;

⁶ Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД».

⁷ Козлов П. А. Теоретические основы, организационные формы, методы оптимизации гибкой технологии транспортного обслуживания заводов черной металлургии: дисс. д-ра техн. наук: 05.22.12. Липецк: ЛПИ, 1986. С. 186–212.

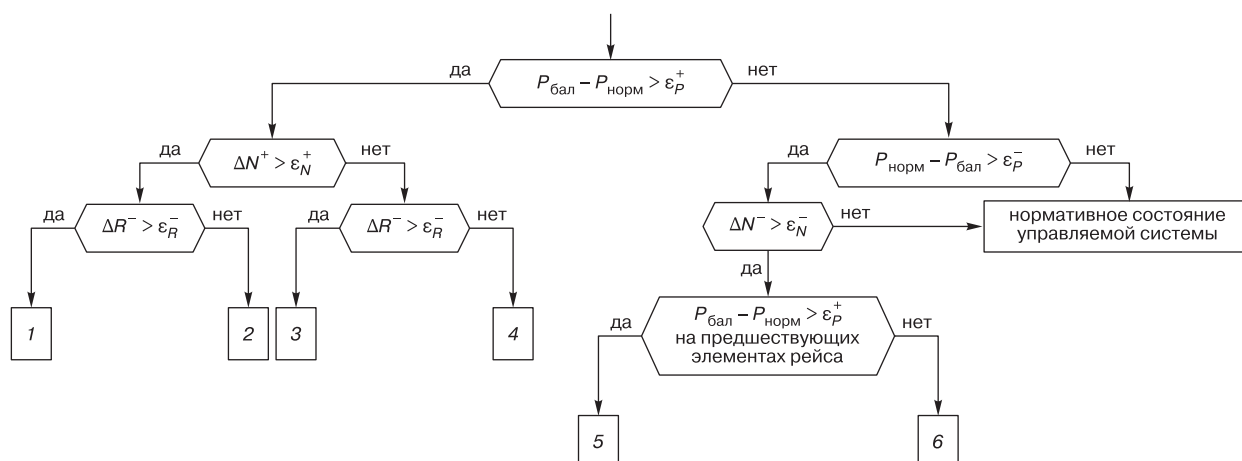


Рис. 3. Стратегии управления для приведения системы организации вагонопотоков к нормативному состоянию*

* Источник: данные авторов

Fig. 3. Operation strategies for normalisation the car traffic streams organisation system*

* Source: authors' data

3 — избыток наличия вагонного парка при поступлении вагонопотока в допустимых пределах и снижении ресурса требует интенсификации отправления (сдачи) вагонов с перераспределением вагонопотоков на менее загруженный ресурс;

4 — избыток наличия вагонного парка при поступлении вагонопотока в допустимых пределах и сохранении величины ресурса требует интенсификации отправления (сдачи) вагонов и форсирования использования ресурса;

5 — недостаток наличия вагонного парка при снижении поступления вагонопотока в условиях избытка наличия вагонов на предыдущих элементах рейса требует интенсификации приема вагонов с соседнего подразделения;

6 — недостаток наличия вагонного парка при снижении поступления вагонопотока при отсутствии избытка наличия вагонов на предыдущих элементах рейса требует снижения простоя вагонов под накоплением и в ожидании отправления с целью обеспечения темпов подвода груженых и порожних вагонов к пунктам назначения.

Учитывая многофакторность функциональных взаимосвязей (27)–(34), определение пороговых значений величин, в пределах которых управляющие воздействия не требуются, представляет собой самостоятельную задачу, решаемую на основе постановки и проведения серий вычислительных экспериментов.

Рассмотрим пример организации вагонопотоков в режиме ИПФ на условном полигоне А–Д, используя вышеизложенный выбор стратегии.

Мощности вагонопотоков на полигоне представлены в табл. 2. Ограничения на размеры перерабатываемого вагонопотока N_T и количество формируемых

назначений k_T на технических станциях представлены в табл. 3; ограничения на количество вагонов по участкам, определяемые через допустимые размеры движения $n_{т.уч.г}$ грузовых поездов и число вагонов m в их составе, указаны на рис. 4.

Таблица 2

Расчетные среднесуточные вагонопотоки, ваг./сут*

Table 2

Estimated average daily car traffic streams, cars/day*

Направление со станции	Направление на станцию				
	А	Б	В	Г	Д
А	—	140	100	300	240
Б	100	—	220	40	620
В	80	170	—	400	160
Г	230	180	130	—	170
Д	100	240	180	160	—

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

Таблица 3

Расчетные нормативы по станциям*

Table 3

Estimated regulations for stations*

Показатель	Станция				
	А	Б	В	Г	Д
N_T , ваг./сут	1300	1250	900	1400	1600
k_T , назначений	5	6	7	7	6

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

Участок В–Г, где в связи с образованием барьерного места полностью прекращается движение поездов, объявляется лимитирующим, и ограничения на нем обращаются в ноль. Варианты плана формирования поездов на полигоне представлены на рис. 4 и в табл. 4.

Нормативный план формирования (рис. 4, а), рассчитанный методом пошагового распределения вагонопотоков по сети допустимых назначений поездов [2],

обеспечивающий наименьшие среднесуточные затраты на накопление, переработку и продвижение вагонопотока на полигоне, перестает удовлетворять инфраструктурному ограничению на лимитирующем участке. Это приводит к росту балансового наличия вагонов, не отправленных со станций В и Г. Данная ситуация соответствует стратегии 1 (см. рис. 3) и требует перераспределения вагонопотоков на менее загруженный ресурс.

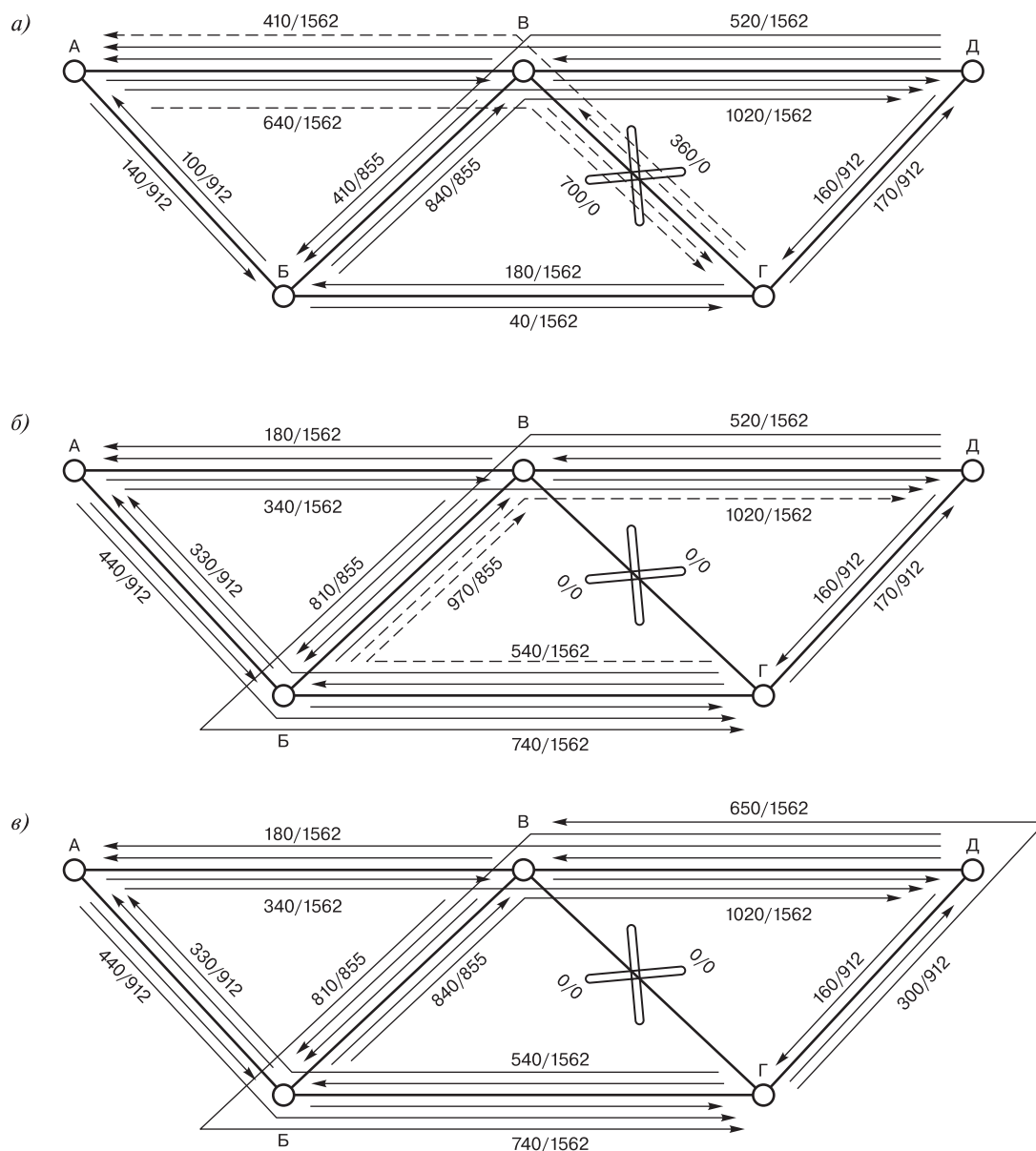


Рис. 4. Варианты корректировки плана формирования поездов*:
в числителе — рассчитанное число вагонов на участках, ваг./сут; в знаменателе — технически допустимое число вагонов на участках, ваг./сут;
над линией — в нечетном направлении; под линией — в четном направлении
* Источник: данные авторов

Fig. 4. Options for adjusting the train make-up plan*:
the numerator is the calculated cars' number per railway section, cars/day, and the denominator is the technically permissible cars' number
per railway section, cars/day; above the line is the parameter in the odd direction and below the line is in the down direction
* Source: authors' data

Таблица 4
Сравнение вариантов при корректировке плана формирования поездов*

Table 4

Comparison of options for adjusting the train make-up plan*

Вариант	Превышение ограничений, ваг./сут	Переработка транзитных вагонов, ваг./сут	Стоимостная оценка, руб./сут
а)	+360 на В–Г, +700 на Г–В	3 960	3 486 380
б)	+155 на Б–В	3 960	3 913 080
в)	0	3 960	3 921 790

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

Полигон корректировки ограничивается назначениями, пути следования которых проходят по лимитирующему участку, — они объявляются запрещенными (на рис. 4, а отмечены пунктиром). Скорректированный план формирования (см. рис. 4, б) является оптимальным по затратам, однако не удовлетворяет инфраструктурному ограничению на участке Б–В. В условиях дефицита ресурса целесообразно оптимизировать план формирования по критерию наилучшего его использования.

По участку Б–В прокладываются обязательные (участковые) назначения, а перед прокладкой каждого из оставшихся сквозных (на рис. 4, б отмечены пунктиром) проверяется выполнение ограничений, и на назначения, для которых они не выполняются, налагается повышающий коэффициент к затратам [2] за превышение ресурса. Вновь скорректированный план формирования (см. рис. 4, в) удовлетворяет инфраструктурным ограничениям по станциям и участкам полигона, а также условиям целевой функции, связанным с достижением наибольшего уровня транзитности вагонопотока и наименьших затрат при смене плана формирования. Все предложенные варианты организации вагонопотоков предусматривают постоянное число формируемых на полигоне поездных назначений и освоение каждой корреспонденции вагонопотока только одним назначением, благодаря чему при смене вариантов плана формирования станции не будут загружены дополнительной работой по переформированию составов.

Информационно-технологическая поддержка указанных стратегий управления вагонопотоками должна быть обеспечена в Автоматизированной системе организации вагонопотоков (АСОВ) с развитием пошаговых пользовательских интерфейсов [3], формализующих порядок работы технолога с информацией из разных подсистем АСОВ и внешних источников данных с использованием шаблонов изменений для повторяющихся технологических ситуаций.

Обсуждение и заключение. На базе исследования взаимосвязей процессов организации вагонопотоков в режимах нормативного плана формирования грузовых поездов, его периодических изменений (корректировок) и оперативных приказов структурированы и формализованы исходные данные, управляемые переменные, ограничения и их взаимозависимости. В парадигме жизненного цикла организации вагонопотоков отмечена необходимость введения в целевую функцию расчета плана формирования дополнительной компоненты, обеспечивающей преемственность расчетов и устойчивость плана к колебаниям потоков. В результате определены шесть возможных стратегий поиска решений по приведению системы организации вагонопотоков к нормативному состоянию для развития интерактивных сценариев вычислений в функциональном составе АСОВ.

Таким образом, впервые представлено системное формализованное описание постановки задач, обеспечивающих преемственность в процессах технологической регламентации, планирования и оперативного управления организацией вагонопотоков в поездах.

На основе положений, представленных в статье, в дальнейшем исследовании должны определяться граничные условия показателей, при которых происходит запуск перерасчетов, и ограничения траектории целевой функции в период действия плана формирования. Это обеспечивает содержательную настройку используемой экономико-математической модели расчета плана формирования поездов методом пошагового распределения вагонопотоков по сети допустимых назначений поездов. Указанная настройка также включает в себя ряд приемов конструирования сетевых потоковых моделей и управления расчетом плана формирования поездов.

Благодарности: коллектив авторов исследования выражает благодарность рецензентам и научному редактору за конструктивные и содержательные предложения при подготовке рукописи к изданию.

Acknowledgments: the team of authors expresses gratitude to the reviewers and the scientific editor for constructive and meaningful suggestions during the preparation of the manuscript for publication.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бородин А. Ф., Николаев К. Ю., Прозоров В. В., Шиндеров Р. В. Логистические, инфраструктурные и ресурсные ограничения в управлении вагонопотоками // Политранспортные системы: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, 24–25 октября 2024 г. Новосибирск: СГУПС, 2024. С. 80–84. EDN: <https://elibrary.ru/lzkmro>.
- Borodin A. F., Nikolaev K. Yu., Prozorov V. V., Shinderov R. V. Logistical, infrastructural and resource constraints in car traffic streams operation. *Polytransport Systems: Proceedings of the Thirteenth All-Russian Scientific and Technical Conference, 24–25th October, 2024*. Novosibirsk: SGUPS; 2024. P. 80–84. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/lzkmro>.
2. Батуринов А. П., Бородин А. Ф., Панин В. В., Шумская О. А., Пояркова М. А. Организация сетевых вагонопотоков в однопутных поездах // Железнодорожный транспорт. 2005. № 6. С. 17–24.
- Baturin A. P., Borodin A. F., Panin V. V., Shumskaya O. A., Poyarkova M. A. Organisation of network car traffic streams into one-group trains. *Railway Transport*. 2005;(6):17–24. (In Russ.).
3. Бородин А. Ф., Вербов Д. М., Рубцов Д. В., Новиков П. О. Автоматизированная система организации вагонопотоков: современные теория и практика // Железнодорожный транспорт. 2021. № 11. С. 4–17. EDN: <https://elibrary.ru/ndafsl>.
- Borodin A. F., Verbov D. M., Rubtsov D. V., Novikov P. O. Automated system for car traffic streams organisation: modern theory and practice. *Railway Transport*. 2021;(11):4–17. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ndafsl>.
4. Новиков П. О., Шиндеров Р. В., Щепанов А. Л., Сухов А. А., Дмитриев Е. О. Решение задач автоматизированного расчета нормативной технологии организации вагонопотоков, оперативного управления и логического контроля // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2021): труды XIV междунар. конф., 27–29 сентября 2021 г. М.: ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, 2021. С. 1020–1027. EDN: <https://elibrary.ru/lipnhi>.
- Novikov P. O., Shinderov R. V., Shchepanov A. L., Sukhov A. A., Dmitriev E. O. Solving tasks for automated calculation of normative technology for car traffic streams organisation, operative management, and logical control. *MLSD'2021: Proceedings of Fourteenth International Conference, 27–29th September, 2021*. Moscow: V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS; 2021. P. 1020–1027. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/lipnhi>.
5. Кутыркин А. В. Комплексная модель планирования и оперативного управления вагонопотоками // Совершенствование эксплуатационной работы железных дорог: сб. научн. тр. (Труды ВНИИЖТ). М.: Транспорт, 1985. С. 68–77.
- Kutyarkin A. V. Comprehensive model for car traffic streams planning and operation. *Improvement of Operational Work of Railways. Proceedings of VNIIZHT*. Moscow: Transport; 1985. P. 68–77. (In Russ.).
6. Кутыркин А. В. Алгоритмы оперативной корректировки плана формирования // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1983. № 8. С. 1–6.
- Kutyarkin A. V. Algorithms for operative adjustment of train make-up plan. *Vestnik VNIIZHT*. 1983;(8):1–6. (In Russ.).
7. Кутыркин А. В., Павловский А. А. Оптимальное управление вагонопотоками в условиях нечетких исходных данных // Наука и техника транспорта. 2003. № 3. С. 40–53. EDN: <https://elibrary.ru/hvyuwz>.
- Kutyarkin A. V., Pavlovsky A. A. Optimal management of car traffic streams under uncertain initial data. *Science and Technology in Transport*. 2003;(3):40–53. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/hvyuwz>.
8. Осьминин А. Т. Интеллектуальная система управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2021. № 1. С. 1–17.
- Os'minin A. T. Intelligent management system for transportation processes in railway transport. *Bulletin of the Unified Scientific Council of JSC "RZD"*. 2021;(1):1–17. (In Russ.).
9. Осьминин А. Т., Шапкин И. Н. Оптимизация системы организации вагонопотоков на основе цифровых технологий на железнодорожном транспорте и принципах клиентоориентированности // Ф. П. Кочнев — выдающийся организатор транспортного образования и науки в России: труды междунар. науч.-практич. конф., 22–23 апреля 2021 г. М.: РУТ (МИИТ), 2021. С. 231–239. EDN: <https://elibrary.ru/bpabwp>.
- Os'minin A. T., Shapkin I. N. Optimisation of the system for car traffic streams organisation based on digital technologies in railway transport and client-oriented principles. *F. P. Kochnev: Proceedings of International Scientific and Practical Conference, 22–23rd April, 2021*. Moscow: RUT (MIIT); 2021. P. 231–239. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/bpabwp>.
10. Осьминин А. Т., Бадецкий А. П. Многоагентная система расчета адаптивного плана формирования поездов // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2015): труды IV науч.-техн. конф. с междунар. участием, 18 ноября 2015 г. М.: НИИАС, 2015. С. 61–65. EDN: <https://elibrary.ru/bfbknk>.
- Os'minin A. T., Badetsky A. P. Multi-agent system for the adaptive train make-up plan calculating. *ISUZHT-2015: Proceedings of Fourth Scientific and Technical Conference, 18th November, 2015*. Moscow: NIIAS; 2015. P. 61–65. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/bfbknk>.
11. Негрей В. Я., Шкурин К. М. Синергетический подход к расчету плана формирования однопутных поездов // Наука та прогресс транспорту. 2018. № 5 (77). С. 53–64. <https://doi.org/10.15802/stp2018/147718>. EDN: <https://elibrary.ru/ytfxbx>.
- Negrey V. Ya., Shkurin K. M. Synergetic approach to the one-group train make-up plan calculating. *Science and Progress in Transport*. 2018;(5(77)):53–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.15802/stp2018/147718>. EDN: <https://elibrary.ru/ytfxbx>.
12. Литвинова И. М., Козлов В. Г. Информационно-аналитическая модель распределения сортировочной работы на станциях Белорусской железной дороги // Тихомировские чтения. Инновационные технологии перевозочного процесса: материалы Междунар. науч.-практ. конф., 30 ноября 2018 г. Гомель: БелГУТ, 2019. С. 99–102. EDN: <https://elibrary.ru/tequmn>.
- Litvinova I. M., Kozlov V. G. Information-analytical model for distributing sorting work at the stations of the Belarusian Railway. *Tikhomirov Readings: Proceedings of International Scientific and Practical Conference, 30th November, 2018*. Gomel: BSUT; 2019. P. 99–102. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tequmn>.
13. Ерофеев А. А., Козлов В. Г., Терещенко О. А., Литвинова И. М., Сладкевич А. Н. Ускорение продвижения вагонопотоков: опыт Белорусской железной дороги // Железнодорожный транспорт. 2025. № 8. С. 34–39. EDN: <https://elibrary.ru/ukdafa>.
- Yerofeev A. A., Kozlov V. G., Tereshchenko O. A., Litvinova I. M., Sladkevich A. N. Accelerating the movement of car traffic streams: experience of the Belarusian Railway. *Railway Transport*. 2025;(8):34–39. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ukdafa>.
14. Козлов В. Г. Повышение эффективности технической маршрутизации на основе динамической модели расчета и оценки параметров корреспонденций вагонопотока // Управление эксплуатационной работой на транспорте (УЭРТ-2022): сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., 15–16 марта 2022 г. СПб.: ПГУПС, 2022. С. 364–368. EDN: <https://elibrary.ru/mlznui>.
- Kozlov V. G. Increasing the efficiency of technical routing based on the dynamic model for the parameters of car traffic streams correspondences calculating and evaluating. *UERT-2022: Proceedings of International Scientific and Practical Conference, 15–16th March, 2022*. St. Petersburg: PGUPS; 2022. P. 364–368. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/mlznui>.
15. Кекиш Н. А. Повышение эффективности организации маломощных вагонопотоков при использовании системы взаимовязанных групповых поездов // 36. науч. прац УкрДУЗТ. Харків: УкрДУЗТ, 2017. № 167. С. 42–54.
- Kekish N. A. Improving the efficiency of the low-power car traffic streams organisation using the system of interrelated group trains. *Collected scientific works of UkrSURT*. 2017;(167):42–54. (In Russ.).

16. Xiao J., Lin B. Comprehensive optimisation of the one-block and two-block train formation plan. *Journal of Rail Transportation Planning & Management*. 2016;6(3):218–236. <https://doi.org/10.1016/j.jrt-pm.2016.09.002>.

17. Poliński J., Ochociński K. Cyfryzacja w transporcie kolejowym. *Problemy Kolejnictwa*. 2020. Zeszyt 188. S. 53–65. <https://doi.org/10.36137/1885P>.

18. Бородин А. Ф., Сотников Е. А. Рациональное соотношение вместимости путей станций и вагонных парков с учетом увеличения доли частных вагонов // Железнодорожный транспорт. 2011. № 3. С. 8–19. EDN: <https://elibrary.ru/nxlpnj>.

Borodin A. F., Sotnikov E. A. Rational ratio of track capacities of stations and car fleets considering the increase in the share of private cars. *Railway Transport*. 2011;(3):8–19. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/nxlpnj>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей Федорович БОРОДИН,

д-р техн. наук, профессор, начальник отдела технологического обеспечения автоматизированных систем и имитационного моделирования, Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ, 105066, Москва, ул. Новорязанская, 24); заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте», Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9), SPIN-код: 4753-4275, <https://orcid.org/0000-0002-3466-6818>

Владимир Вигенович ПРОЗОРОВ,

инженер 1 категории, Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ, 105066, Москва, ул. Новорязанская, 24); аспирант, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9), SPIN-код: 8089-1438

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey F. BORODIN,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Technological Support of Automated Systems and Simulation Modelling Department, Institute of Economics and Development of Transport (105066, Moscow, 24, Novoryazanskaya St.); Head of the Department of Management of Operational Work

and Safety in Transport, Russian University of Transport (127994, Moscow, bldg. 9, 9, Obratsova St.), SPIN-code: 4753-4275, <https://orcid.org/0000-0002-3466-6818>

Vladimir V. PROZOROV,

1st Category Engineer, Institute of Economics and Development of Transport (105066, Moscow, 24, Novoryazanskaya St.); Postgraduate, Russian University of Transport (127994, Moscow, bldg. 9, 9, Obratsova St.), SPIN-code: 8089-1438

ВКЛАД АВТОРОВ

Андрей Федорович БОРОДИН. Определение направления исследования, консультации (20 %).

Владимир Вигенович ПРОЗОРОВ. Обзор существующих исследований по адаптивному управлению вагонопотоками, математическая постановка задач управления вагонопотоками, определение стратегий поиска решений, написание статьи (80 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Andrey F. BORODIN. Determining the direction of research, consultations (20 %).

Vladimir V. PROZOROV. Review of existing research on adaptive car traffic operation, mathematical formulation of car traffic operation problems, definition of strategies for finding solutions (80 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 12.12.2025, рецензия от первого рецензента получена 17.12.2025, рецензия от второго рецензента получена 23.01.2026, рецензия от третьего рецензента получена 02.02.2026, принята к публикации 12.02.2026.

The article was submitted 12.12.2025, first review received 17.12.2025, second review received 23.01.2026, third review received 02.02.2026, accepted for publication 12.02.2026.



УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Оригинальная научная статья
УДК 65.011.56
EDN: <https://elibrary.ru/bieepz>
DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-63-76>
Научная специальность: 2.9.4. Управление процессами перевозок



Разработка классификации грузовых контейнерных терминалов на основе анализа грузопотоков и назначений

А. Н. Кириллов✉

Центральная дирекция по управлению терминально-складским комплексом (ЦМ) — филиал ОАО «РЖД»,
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рост контейнеризации и изменение географии грузопотоков в условиях современных вызовов требуют повышения эффективности работы грузовых контейнерных терминалов. В настоящее время существующие подходы к цифровизации не учитывают технологические и эксплуатационные различия контейнерных терминалов, что приводит к внедрению избыточного функционала и неоправданным затратам. Целью работы является разработка классификации грузовых контейнерных терминалов, устанавливающей минимальные требования к цифровизации производственных процессов в зависимости от объемов и технологии работы.

Материалы и методы. Исследование выполнено с применением математических методов, выполнен анализ статистических данных, нормативно-правовой базы и технологической документации, фиксирующих текущее состояние и установленные требования к деятельности грузовых контейнерных терминалов.

Результаты. Проанализированы данные о работе железнодорожных станций и терминалов Российской Федерации за 2023 год, нормативные источники, а также практика автоматизации терминалов холдинга ОАО «РЖД» в 2023–2025 гг. Выявлены ключевые технико-эксплуатационные характеристики, влияющие на необходимый уровень цифровизации: суточное отправление контейнеров, количество назначений, емкость грузового фронта, яркость хранения и тип средств механизации.

Обсуждение и заключение. Предложена классификация грузовых контейнерных терминалов, состоящая из пяти групп, для каждой из которых формализованы минимальные функциональные требования к системам управления терминалами. Разработаны количественные критерии границ между группами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: контейнерный терминал, контейнерная площадка, цифровизация, автоматизация, контейнерные перевозки, функциональные требования

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кириллов А. Н. Разработка классификации грузовых контейнерных терминалов на основе анализа грузопотоков и назначений // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2026. Т. 85, № 1. С. 63–76. EDN: <https://elibrary.ru/bieepz>.

TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

Original article
UDK 65.011.56
EDN: <https://elibrary.ru/bieepz>
DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-63-76>
Scientific specialty: 2.9.4. Transportation process management



Development of cargo container terminal classification based on analysis of cargo traffic flows and destinations

Arseniy N. Kirillov✉

Central Directorate for the Management of the Terminal and Warehouse Complex (CM) — branch of JSC “Russian Railways”,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Containerisation growth and changing geography of cargo traffic flows under current challenges necessitate improving the efficiency of cargo container terminals. To date, existing approaches to digitalisation fail to account for technological and operational differences among container terminals, which leads to the implementation of excessive functionality and unjustified costs. This study aims to develop a classification of cargo container terminals that establishes minimum requirements for the digitalisation of production processes based on workload and operational technology.

Materials and methods. The author employed mathematical methods and analysed statistical data, regulatory framework and technological documentation, which record the current state and established requirements for the operation of cargo container terminals.

Results. Data on the operations of railway stations and terminals in the Russian Federation for 2023, regulatory sources, and automation practices of terminals within JSC “Russian Railways” in 2023–2025 were analysed. The revealed key technical and operational characteristics influencing the necessary level of digitalisation are daily container dispatch volume, number of destinations, cargo front capacity, stacking tier height, and type of handling equipment.

Discussion and conclusion. Classification of cargo container terminals was proposed, with minimum functional requirements for terminal management systems formalised for each group. Quantitative boundary criteria between groups were developed.

KEYWORDS: container terminal, container site, digitalisation, automation, container transportation, functional requirements

FOR CITATION: Kirillov A. N. Development of cargo container terminal classification based on analysis of cargo traffic flows and destinations. *Russian Railway Science Journal*. 2026;85(1):63–76. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-63-76>.

Введение. Современные условия работы железнодорожного транспорта России характеризуются необходимостью преодоления ряда новых вызовов, которые напрямую влияют на логистическую инфраструктуру в целом и на грузовые контейнерные терминалы в частности. Наиболее значимые из них включают:

- изменение грузопотоков в связи с загрузкой Восточного полигона и развитие перевозок в рамках Северного морского пути и Международного транспортного коридора «Север — Юг»;
- нелинейный рост контейнерных перевозок с расширением номенклатуры грузов;
- прогнозируемое увеличение перевозок грузов в контейнерах более чем на 50 млн т в год к 2036 году¹, что потребует новых интегрированных решений в части технологических процессов, цифровизации и управления.

В таких условиях роль и эффективность пунктов перевалки грузов — контейнерных терминалов — становится системообразующим фактором. От перерабатывающей и пропускной способности контейнерных терминалов зависят масштабные инфраструктурные проекты (например, модернизация Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей) и освоение растущих объемов перевозок². Одновременно терминалы сталкиваются с необходимостью адаптации к меняющимся логистическим схемам, например, организации перевалки контейнеров с полувагонов на фитинговые платформы³. Таким образом, в условиях повышения контейнеризации перевозок и роста нагрузки на транспортные коридоры, критически актуальным становится вопрос повышения эффективности работы грузовых контейнерных терминалов за счет своевременной, технологически и экономически обоснованной цифровизации их производственных процессов.

В этих условиях ключевым инструментом повышения эффективности контейнерных терминалов является цифровизация производственных процессов. Однако сложившаяся практика внедрения таких информационных автоматизированных систем, как система управления складом Warehouse Management System (далее — WMS), система управления контейнерным терминалом Container Terminal Management System (далее — CTMS), система управления контейнерными терминалами Terminal Operating System

(далее — TOS), демонстрирует устойчивое противоречие.

Проблема заключается в отсутствии дифференцированного подхода: сегодня терминалы,кратно различающиеся по суточному объему переработки, количеству назначений, типу техники и ярусности хранения, получают унифицированные решения с заведомо избыточным или, напротив, недостаточным функционалом. Нормативные документы и корпоративные стандарты не содержат критериев, позволяющих обоснованно ограничить состав внедряемых цифровых модулей под конкретные технологические условия. Это приводит к неоправданным капитальным затратам на приобретение невостребованных лицензий, усложнению эксплуатации и росту трудоемкости поддержки систем и снижению реальной отдачи от инвестиций в цифровизацию.

Таким образом, существует научно-практическая задача — разработать классификацию грузовых контейнерных терминалов, которая увязывала бы их технико-эксплуатационные характеристики с минимально необходимым и достаточным набором функций цифровизации.

Исследования, посвященные повышению эффективности работы контейнерных терминалов, развиваются по двум основным направлениям.

Первое направление — макрологистическое. В работах А. Ф. Бородин [1], П. А. Козлова [2], О. Д. Покровской [3–4] рассматриваются вопросы развития транспортной сети, оптимального размещения терминалов, балансировки контейнеропотоков и парков подвижного состава. Эти исследования создают основу для принятия стратегических решений на уровне полигонов и сети в целом.

Второе направление — внутритерминальная оптимизация. Следует отметить работы А. Л. Кузнецова [5–6], О. В. Москвичева [7–9], И. М. Басырова [10], Д. В. Васильева [11], Н. В. Малышева [12], в которых детально проработаны вопросы повышения производительности погрузочно-разгрузочных машин и механизмов, оптимизации планирования эксплуатационной работы, адресного хранения и сокращения внутрискладской переработки, автоматизации учета и документооборота.

Зарубежный опыт, обобщенный в работах Ж.-П. Родрига, Т. Ноттебома и А. Паллиса⁴, а также в инфор-

¹ Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. 285 с.

² Контейнерные перевозки: реальность и потенциал // Коммерсантъ. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5119599> (дата обращения: 10.02.2026).

³ Правильная логистика // Транссиб. № 45. 24.11.2023 (3 полка). URL: <https://gudok.ru/zdr/180/?ID=1651847&ysclid=mlht33k8s3662377646> (дата обращения: 10.02.2026).

⁴ Rodrigue J.-P., Notteboom T., Pallis A. Automating Terminals // Chapter 6.6 — Container Terminal Automation. Port Economics, Management and Policy. URL: <https://porteconomicsmanagement.org/pemp/contents/part3/terminal-automation/> (дата обращения: 10.02.2026).

мационных материалах Camco Technologies⁵ и Marine Digital⁶, демонстрирует успешное применение интеллектуальных комплексов (нейросети, компьютерное зрение, TOS, CTMS) на крупнейших интермодальных терминалах мира. Показано, что комплексная автоматизация становится стандартом для новых хабов, а существующие терминалы выборочно автоматизируют отдельные этапы операций.

Анализ российской практики свидетельствует о широком внедрении системы управления складом Solvo (WMS) и Автоматизированной системы управления терминально-складским комплексом (АСУ ТСК). Однако, функционал последней един для всех 600 терминалов сети⁷, независимо от объема и технологии работ, отсутствуют алгоритмы оптимизации размещения контейнеров, тайм-слотирования, возможности адаптации системы под особенности конкретного терминала.

Таким образом, к настоящему времени разработаны методы оптимизации работы перегрузочной техники и планирования операций, созданы системы управления терминалами (WMS, CTMS), обеспечивающие учет и контроль, накоплен опыт автоматизации крупных контейнерных хабов и формализованы требования к функционалу систем управления складом (ГОСТ Р 59282–2020⁸).

Вместе с тем сохраняется ряд неразработанных принципиальных вопросов:

- отсутствует классификация самих грузовых контейнерных терминалов как объектов цифровизации;
- не определены критерии, позволяющие дифференцировать состав внедряемых цифровых решений в зависимости от объемов, номенклатуры назначений, технической оснащенности;
- существующие подходы ориентированы на целевую «идеальную» модель и не содержат описания этапности наращивания функционала;
- нормативные документы^{9, 10} классифицируют площадки по техническим характеристикам, но не учитывают технологию работы и количество формируемых

назначений, что делает их неприменимыми для целей определения минимальных требований к цифровизации.

Задачи текущего этапа:

1. Выявить технико-эксплуатационные характеристики грузовых контейнерных терминалов, определяющие потребность в тех или иных цифровых решениях.
2. Разработать классификацию терминалов, группирующую их по однородным условиям работы.
3. Формализовать минимально необходимый и достаточный перечень функций WMS/CTMS для каждой группы.
4. Определить количественные критерии границ между группами.
5. Апробировать предложенный подход на действующих терминалах.

Цель работы — разработка классификации грузовых контейнерных терминалов, основанной на формализации минимальных требований к цифровизации производственных процессов в зависимости от их технологических и эксплуатационных характеристик.

Материалы и методы. Исследование выполнено с применением математических методов для анализа статистических отчетов, выполнен анализ нормативно-правовой базы и технологической документации, фиксирующих текущее состояние и установленные требования к деятельности грузовых контейнерных терминалов.

На первом этапе проведен анализ содержания нормативных источников — СП 262.1325800.2016¹¹, устанавливающего классификацию площадок по техническим характеристикам, требований главы 11 СП 316.1325800.2017¹², а также положений национального стандарта ГОСТ Р 59282–2020¹³, регламентирующего функциональные требования к системам управления.

Для оценки фактических параметров работы терминалов использован метод сбора и анализа статических данных. Изучены итоговые статистические показатели

⁵ Camco Technologies. Automation of the container hand-over process in Intermodal terminals // Railway Supply. Industry publication for railway transport specialists. URL: <https://www.railway.supply/lemtrans-demonstrated-the-visualization-of-the-new-container-terminal/> (дата обращения: 10.02.2026).

⁶ Queue Management System // Marine Digital. URL: <https://marine-digital.com/queuemanagementsystem> (дата обращения: 10.02.2026).

⁷ Цифровизация логистики: как вывести работу с грузовладельцами на новый уровень // РЖД Цифровой. URL: <https://rzdigital.ru/projects/tsifrovoye-tekhnologii-vyvodyat-rabotu-s-gruzovladeltami-na-novyy-uroven/> (дата обращения: 10.02.2026).

⁸ ГОСТ Р 59282–2020. Системы управления складом. Функциональные требования: утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 декабря 2020 г. № 1398-ст. М.: Стандартинформ, 2021. 19 с.

⁹ СП 262.1325800.2016. Контейнерные площадки и терминальные устройства на предприятиях промышленности и транспорта. Правила проектирования и строительства: утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 3 декабря 2016 г. № 886/пр. М.: Стандартинформ, 2017. 27 с.

¹⁰ СП 316.1325800.2017. Терминалы контейнерные. Правила проектирования: утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 14 ноября 2017 г. № 1541/пр. М.: Стандартинформ, 2018. 78 с.

¹¹ СП 262.1325800.2016. Контейнерные площадки и терминальные устройства на предприятиях промышленности и транспорта. Правила проектирования и строительства.

¹² СП 316.1325800.2017. Терминалы контейнерные. Правила проектирования.

¹³ ГОСТ Р 59282–2020. Системы управления складом. Функциональные требования.

работы грузовых контейнерных терминалов за 2023 год, включая сведения об объемах отправления и прибытия груженых и порожних контейнеров на железнодорожные станции сети Российских железных дорог, а также данные о транзитном контейнеропотоке. Распределение грузовых железнодорожных станций по количеству назначений отправления контейнеров (груженых и порожних) представлено в табл. 1. Помимо этого, проанализированы сложившиеся практики автоматизации производственных процессов на грузовых терминалах холдинга ОАО «РЖД», зафиксированные в технической и отчетной документации.

На основе анализа технико-эксплуатационных характеристик (объемы погрузки и выгрузки, количество назначений, длина грузового фронта, емкость пло-

щадки и средства механизации) и их сопоставления с требованиями нормативных документов выполнена классификация грузовых контейнерных терминалов. Классификация ориентирована на определение минимально необходимого набора функций для цифровизации, исходя из интенсивности работы и технологических ограничений, зафиксированных в статичных показателях деятельности терминалов.

Распределение обследованных станций по количеству формируемых назначений показано на рис. 1, а соотношение суточного объема отправления и числа назначений для каждой станции — на рис. 2.

Анализ статистических данных о работе грузовых железнодорожных станций Российской Федерации за 2023 год (рис. 1–2) позволяет выявить закономерности,

Таблица 1

Количество грузовых железнодорожных станций по количеству назначений отправления контейнеров в России в 2023 году (груженых и порожних)*

Table 1

Number of freight railway stations by the number of container departure destinations in Russia in 2023 (loaded and empty)*

Количество назначений	Количество станций, работающих с этим количеством назначений	Количество назначений	Количество станций, работающих с этим количеством назначений	Количество назначений	Количество станций, работающих с этим количеством назначений	Количество назначений	Количество станций, работающих с этим количеством назначений	Количество назначений	Количество станций, работающих с этим количеством назначений	Количество назначений	Количество станций, работающих с этим количеством назначений
1	91	21	10	41	4	62	3	85	1	119	1
2	48	22	6	42	2	63	3	88	1	120	2
3	37	23	6	43	2	64	2	90	1	122	1
4	30	24	6	44	2	65	1	91	1	123	2
5	29	25	9	45	2	66	1	92	2	128	1
6	27	26	5	46	3	67	3	95	2	133	1
7	20	27	7	47	3	68	1	96	1	136	1
8	15	28	6	48	4	70	1	97	1	143	1
9	21	29	3	49	4	71	5	98	1	146	1
10	20	30	4	50	3	72	1	99	1	149	1
11	13	31	1	51	4	73	1	100	1	156	1
12	12	32	5	52	8	74	2	103	1	164	1
13	11	33	5	53	4	75	4	105	1	166	1
14	15	34	4	55	4	77	2	106	2	179	1
15	13	35	5	56	3	79	2	108	2	182	1
16	12	36	6	57	3	80	2	111	1	183	2
17	12	37	6	58	3	81	1	113	1	186	1
18	6	38	5	59	3	82	2	115	2	198	1
19	8	39	4	60	2	83	5	117	1	225	1
20	8	40	1	61	2	84	1	118	2	—	—

* Источник: данные автора

* Source: author's data

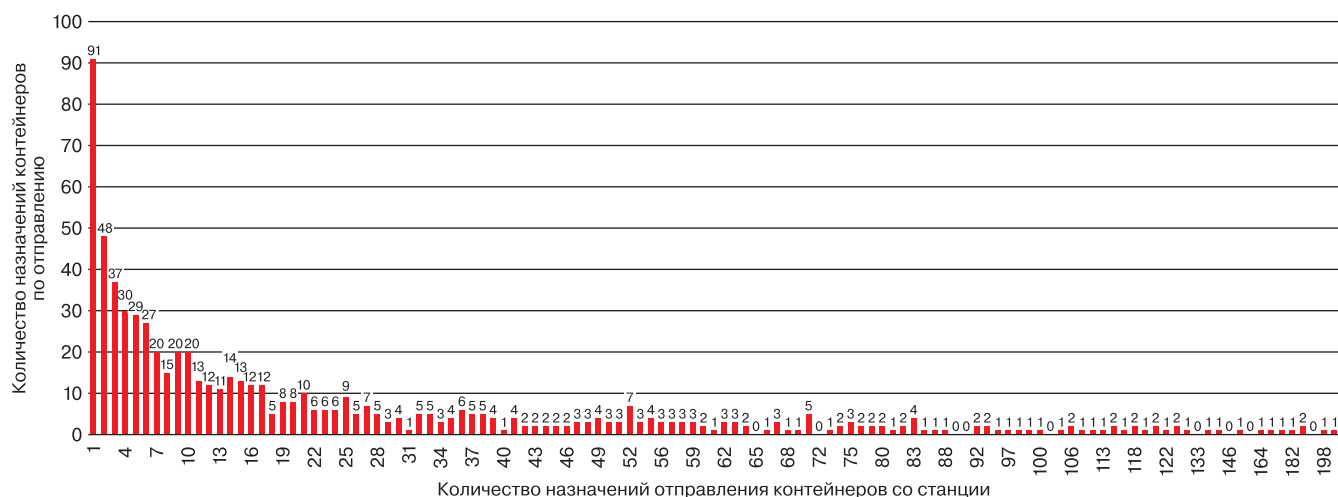


Рис. 1. Распределение грузовых железнодорожных станций по количеству назначений отправления контейнеров в России в 2023 году (груженых и порожних)*
* Источник: данные автора

Fig. 1. Distribution of freight railway stations by the number of container departure destinations in Russia in 2023 (loaded and empty)*
* Source: author's data

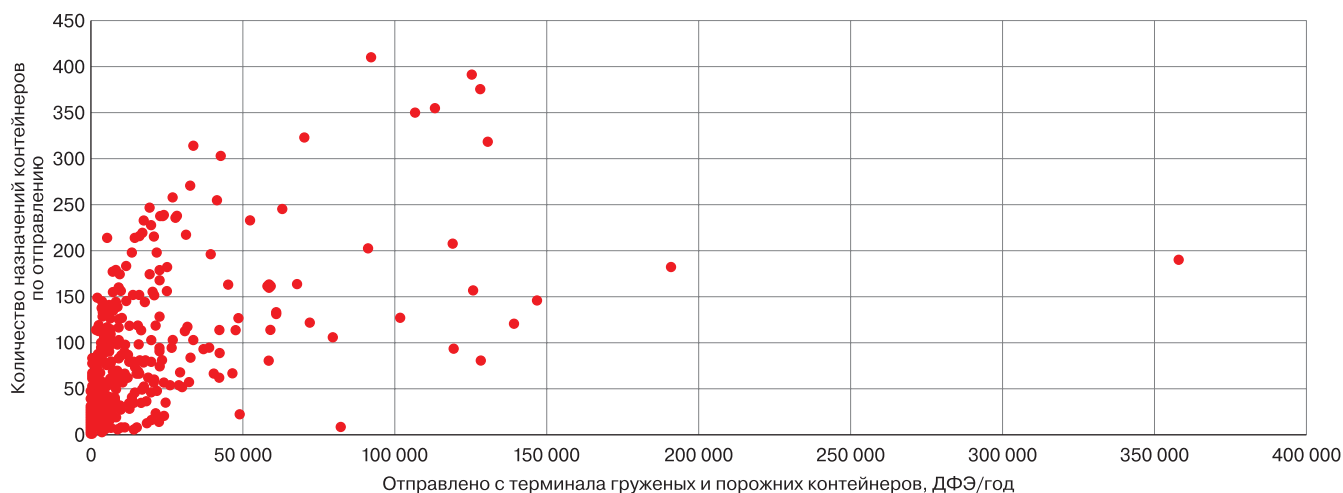


Рис. 2. Грузовые терминалы России по количеству назначений (ось Y) и суммарно отправленных груженых и порожних контейнеров (ось X) в 2023 году*
* Источник: данные автора

Fig. 2. Russian cargo terminals in 2023 by the number of destinations (Y-axis) and the total number of loaded and empty containers dispatched in 2023 (X-axis)*
* Source: author's data

указывающие на необходимость дифференцированного подхода к цифровизации контейнерных терминалов. На сети железных дорог страны доминируют станции с малым числом назначений (рис. 1), поэтому тиражирование единого программного обеспечения на все терминалы экономически нецелесообразно и технологически избыточно. Для большинства станций требуются простые учетные системы, и лишь для малой доли грузовых контейнерных терминалов — сложные программные комплексы.

Анализ данных на рис. 2 устанавливает взаимосвязь между интенсивностью работы (объем отправления) и ее сложностью (количество назначений). Значительный разброс точек означает, что прямой пропорциональной зависимости «больше объем — больше назначений» не существует. Это ключевое наблюдение, которое ложится в основу предлагаемой классификации. Распределение точек на рис. 2 показывает, что классификация терминалов только по одному признаку (например, по объему) недостаточна.

Для адекватного выбора стратегии цифровизации необходимо учитывать два параметра одновременно: объем работы и количество назначений. Именно сочетание этих факторов формирует технологическую сложность терминала и, как следствие, требования к его информационной системе. Например, терминал с объемом 15 000 контейнеров и 10 назначениями может работать по упрощенной технологии, тогда как терминал с таким же объемом, но 80 назначениями, уже столкнется с проблемой эффективного размещения грузов на площадке.

Выявленные закономерности (наличие четких кластеров по сочетанию признаков «объем — назначения») служат эмпирической базой для разработки предлагаемой классификации, где границы между группами определяются количественными значениями этих параметров, увязанными с техническими возможностями терминала (емкость фронта, ярусность).

Результаты исследования. По итогам проведенного анализа предлагается к применению следующая система классификации.

Первая группа. Грузовые терминалы, периодически работающие с контейнерами. К данной группе относятся универсальные грузовые терминалы, работающие с широкой номенклатурой грузов, в т. ч. периодически в небольшом количестве отправляющие контейнеры в одно или несколько назначений, или для которых контейнерные перевозки не являются основным видом груза. Средства механизации являются универсальные грузоподъемные механизмы (краны на автомобильном ходу, крюковые козловые краны без спредера).

Среднесуточное количество вагонов с контейнерами под погрузку и выгрузку на этих терминалах значительно меньше емкости грузовой площадки и емкости пути грузового фронта, хранение контейнеров производится, как правило, в один ярус.

На рис. 3 грузовые терминалы первой группы, с учетом указанных выше условий отнесения к данной группе, предлагается ограничить прямоугольной зоной, удовлетворяющей требованиям:

по оси X : от 0 до $D \leq 0,5 \cdot L_m$;

по оси Y : от 0 до $D \leq 0,5 \cdot L_m$,

где D — среднесуточное отправление контейнеров, шт.;
 N — количество назначений контейнеров по отправлению, ед.;

L_m — емкость (вместимость) пути грузового фронта, ДФЭ¹⁴.

$$L_m = \frac{L_{гф}}{L_{фв}} n, \quad (1)$$

¹⁴ ДФЭ — двадцатифутовый эквивалент, условная единица измерения вместимости грузовых транспортных средств в контейнерных перевозках.

¹⁵ Условный вагон (усл. ваг.) — условная единица измерения длины железнодорожного состава, соответствующая длине четырехосного полувагона (13 920 мм).

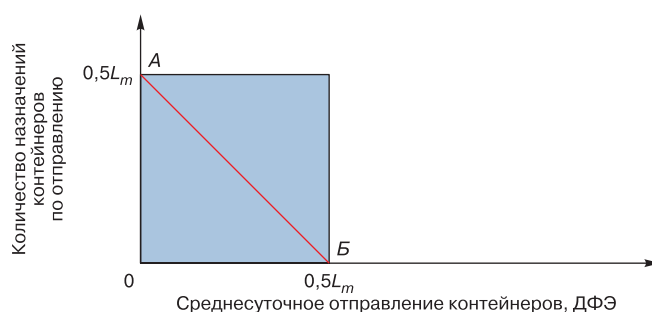


Рис. 3. Максимально возможная зависимость количества назначений контейнеров от количества контейнеров на площадке под погрузку в каждый конкретный момент времени на терминалах первой группы*

* Источник: данные автора

Fig. 3. Maximum possible dependence of the number of container assignments on the number of containers on the loading platform at each specific time at terminals of Group 1*

* Source: author's data

где $L_{гф}$ — длина грузового фронта, в условных вагонах (усл. ваг.)¹⁵;

$L_{фв}$ — условная длина вагона — фитинговой платформы, в зависимости от типа фитинговой платформы, используемой на грузовом терминале, усл. ваг.;

n — количество контейнеров возможных к перевозке на вагоне типа «фитинговая платформа», ДФЭ.

На рис. 3 красной линией AB показана максимально возможная зависимость количества назначений контейнеров от количества контейнеров на контейнерной площадке к отправлению (в каждый момент времени количество назначений может быть меньше или равно количеству контейнеров под погрузку), при этом по итогам более длительного периода количество назначений может быть больше среднесуточного отправления контейнеров.

Для визуализации отличий методов хранения контейнеров на контейнерных площадках различных предлагаемых к применению групп, в правой части рис. 4–5, 8–9 размещено графическое изображение ячеек хранения контейнерной площадки (обозначены прямоугольной областью). Прямоугольная область белого цвета означает свободную ячейку хранения, цветная прямоугольная область обозначает занятую контейнером ячейку хранения. Цифрами «1» (синий маркер) и «2» (красный маркер), а также буквой N обозначены условные номера назначений контейнеров для постановки их в состав контейнерного поезда этого назначения, стрелка указывает на область значений на графике (цветный маркер), свойственную для этой группы контейнерных площадок.

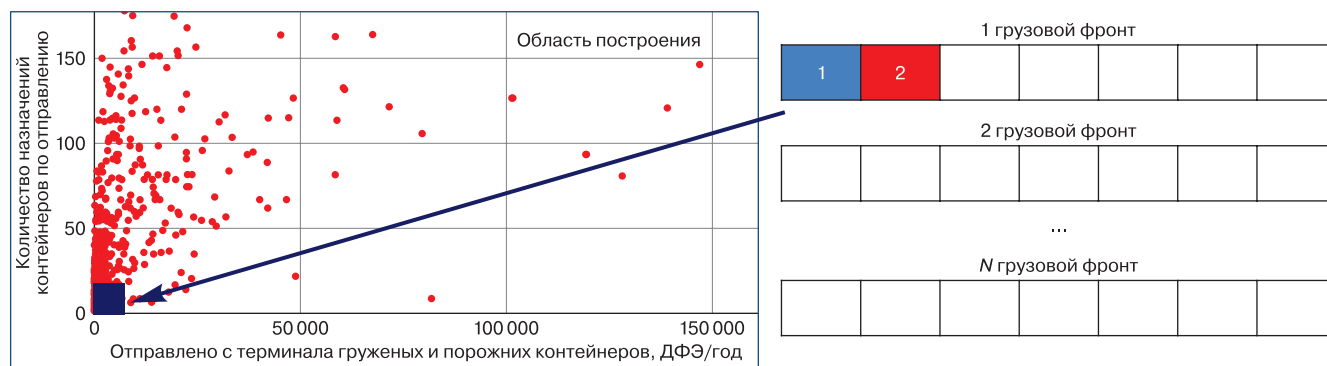


Рис. 4. Грузовые контейнерные терминалы первой группы, правила хранения контейнеров на контейнерной площадке*

* Источник: данные автора

Fig. 4. Group 1 cargo container terminals, rules for storing containers on the container site*

* Source: author's data

Прибытие и отправление контейнеров с терминалов первой группы производится в основном в одиночных вагонах. Хранение контейнеров производится в произвольном месте площадки, как правило — напротив вагона погрузки-выгрузки контейнера. При погрузке нескольких контейнеров на вагон требуется проверка соблюдения требований правил перевозок грузов в части допустимой разницы в загрузке тележек вагона.

Для грузовых терминалов, относящихся по характеру и объему работы к первой группе, минимальными функциональными требованиями к WMS, достаточными для автоматизации производственных процессов, являются:

1. Автоматизация балансового учета завоза (вывоза) контейнеров автотранспортом, хранения на площадке, прибытия (отправления) контейнеров железнодорожным транспортом.
2. Автоматизация подбора групп контейнеров на вагон по весу.

Вторая группа. Грузовые терминалы, работающие с мононазначениями контейнеров по отправлению.

К данной группе относятся грузовые терминалы, отправляющие контейнеры в небольшое количество от 1 до F назначений, где F — количество грузовых фронтов грузового терминала, что позволяет специализировать каждый грузовой фронт для накопления и отправления одного назначения контейнеров. Отправление производится вагонными группами или контейнерными поездами одного назначения.

Для данной группы грузовых терминалов возможно применение технологии накопления контейнеров одного назначения вдоль грузового фронта погрузки до пяти ярусов хранения (четыре грузных и один верхний ярус хранения порожних контейнеров, количество ярусов определяется возможностью применяемых средств механизации), что не требует перед отправле-

нием внутрискладской переработки контейнеров для подбора и формирования партий контейнеров по назначениям. При наличии нескольких грузовых фронтов производится их специализация по назначениям контейнеров. На терминалах данной группы применяются универсальные грузоподъемные средства механизации (автомобильные краны, крюковые козловые краны), специализированные контейнерные перегружатели (ричстакеры). Имеются риски длительного хранения в ожидании отправления отдельных контейнеров по причине загромождения их прибывшими в более поздний период контейнерами, в связи с чем требуется учет и контроль времени нахождения контейнера на площадке.

На рис. 5 грузовые терминалы второй группы ограничены прямоугольной зоной, удовлетворяющей требованиям:

по оси X : от $D > 0,5 \cdot L_m$ до $D_{\text{техн}}(5)$;

по оси Y : от $N = 1$ до $N = F$,

где $D_{\text{техн}}(j)$ — перерабатывающая способность грузового терминала по отправлению, при хранении груза в j ярусов, ДФЭ/сут;

F — количество грузовых фронтов грузового терминала, ед.;

j — количество ярусов хранения контейнеров на площадке, определяется применяемыми средствами механизации.

$$D_{\text{техн}}(j) = \sum_{i=1}^F Df(i), \quad (2)$$

где $Df(j)$ — перерабатывающая способность грузового фронта F по отправлению, при хранении контейнеров в j ярусов, ДФЭ/сут.

Как следует из предлагаемой формулы расчета, перерабатывающая способность контейнерного терминала второй группы рассчитывается как сумма

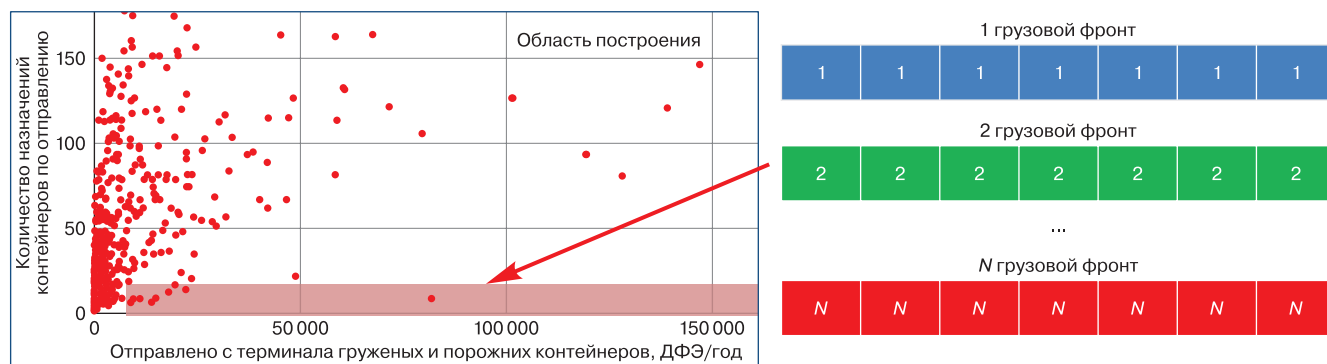


Рис. 5. Грузовые контейнерные терминалы второй группы, правила хранения контейнеров на контейнерной площадке*

* Источник: данные автора

Fig. 5. Group 2 cargo container terminals, rules for storing containers on the container site*

* Source: author's data

перерабатывающих способностей грузовых фронтов (рис. 6), при этом перерабатывающая способность грузового фронта этой группы контейнерных терминалов имеет прямую зависимость от ярусности хранения контейнеров на контейнерной площадке (рис. 7).

Прибытие и отправление контейнеров с терминалов второй группы производится, как правило, групповыми отправлениями или организованными маршрутами.

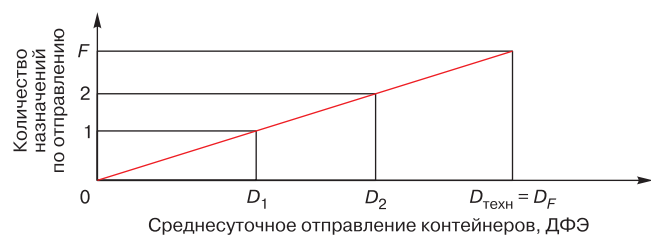


Рис. 6. Перерабатывающая способность грузового терминала как сумма перерабатывающих способностей грузовых фронтов*

* Источник: данные автора

Fig. 6. Processing capacity of cargo terminal as the sum of processing capacities of cargo fronts*

* Source: author's data

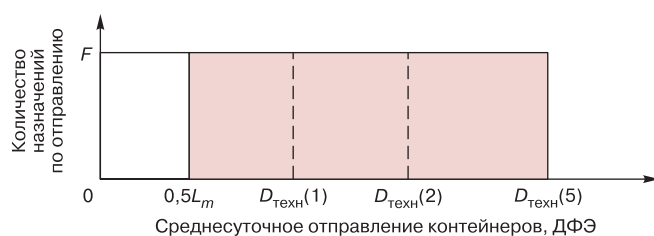


Рис. 7. Зависимость перерабатывающей способности грузового терминала от ярусности хранения контейнеров на контейнерной площадке*

* Источник: данные автора

Fig. 7. Dependence of the processing capacity of cargo terminal on the tiered storage of containers on container yard*

* Source: author's data

Для грузовых терминалов, относящихся по характеру и объему работы к данной группе, минимальными функциональными требованиями к WMS, достаточными для автоматизации производственных процессов, являются:

1. Балансовый учет завоза (вывоза) контейнеров автотранспортом, хранения на площадке, прибытия (отправления) железнодорожным транспортом контейнеров для каждого грузового фронта (назначения).
2. Постоянная (жесткая) или оперативная (работником грузового терминала) специализация грузовых фронтов по назначениям.
3. Учет нахождения контейнеров на площадке по времени их хранения.
4. Подбор контейнерных групп на вагон по весу.

Третья группа. Грузовые терминалы, работающие с многими назначениями грузов при небольшом объеме грузовой работы.

К данной группе относятся грузовые терминалы, отправляющие контейнеры в большое количество N назначений, при условии $N \gg F$, где F — количество грузовых фронтов терминала при незначительном объеме, не требующем хранения контейнеров в несколько ярусов.

Хранение контейнеров на контейнерной площадке производится, как правило, в один ярус, в целях сокращения времени нахождения контейнера требуется адресный (ячеистый) учет места хранения контейнера. При увеличении объема перевозок возможно хранение контейнеров в несколько ярусов, при этом возрастает внутрискладская переработка контейнеров при подготовке партии контейнеров для погрузки. Специализация грузовых фронтов по назначениям контейнеров чаще всего не применяется.

На терминалах третьей группы применяются универсальные грузоподъемные средства механизации (автомобильные краны, крюковые козловые краны).

На рис. 8 грузовые терминалы третьей группы ограничены прямоугольной зоной, удовлетворяющей требованиям:

- по оси X : от $D = 0$ до $D \leq D_{\text{техн}}(1)$;
- по оси Y : от $N > 0,5 \cdot L_m$ до $N = D_{\text{техн}}(5)$.

Отправление производится одиночными вагонами, небольшими маршрутными группами.

Для грузовых терминалов, относящихся по характеру и объему работы к данной группе, минимальными функциональными требованиями к WMS, достаточными для автоматизации производственных процессов, являются:

1. Адресный учет хранения контейнеров на площадке.
2. Учет нахождения контейнеров на площадке по времени их хранения.
3. Подбор контейнерных групп на вагон по назначению и весу.

Четвертая группа. Грузовые терминалы, работающие с многими назначениями грузов, при объеме грузовой работы, требующем многоярусного хранения контейнеров на площадке.

К данной группе относятся грузовые терминалы, отправляющие контейнеры в большое количество N назначений, при условии $N > F$, где F — количество грузовых фронтов терминала. Хранение контейнеров производится в несколько ярусов (до пяти). Отправление производится в основном организованными маршрутами и маршрутными группами.

На терминалах четвертой группы применяются специализированные грузоподъемные средства механизации — контейнерные перегружатели (ричстакеры) и специализированные козловые контейнерные краны, целесообразно применять специализацию грузовых фронтов по назначениям контейнеров в соответствии с согласованным графиком отправления с терминала контейнерных поездов и планом формирования

поездов. Для оптимального распределения ресурсов требуется автоматизация ряда оптимизационных задач, в том числе тайм-слотирования завоза (вывоза) контейнеров (согласованный заезд автотранспорта на территорию терминала), что позволяет не допустить скопления автотранспорта в ожидании в период занятости грузоподъемной техники на погрузке и выгрузке вагонов, задачи рационального размещения контейнеров на складе, что позволяет сократить внутрискладскую переработку, если необходимый для погрузки контейнер находится на нижнем ярусе хранения. Задачи оптимизации использования техники направлены на сокращение непроизводительного перемещения техники и ее простоя в ожидании работы.

На рис. 9 грузовые терминалы четвертой группы ограничены прямоугольной зоной, удовлетворяющей требованиям:

- по оси X : от $D \leq D_{\text{техн}}(1)$ до $D_{\text{техн}}(5)$;
- по оси Y : от $N = F$ до $N = D_{\text{техн}}(5)$.

Для грузовых терминалов, относящихся по характеру и объему работы к данной группе, минимальными функциональными требованиями к WMS, достаточными для автоматизации производственных процессов, являются:

1. Учет нахождения контейнеров на площадке по времени их хранения.
2. Адресный учет хранения контейнеров на площадке.
3. Подбор контейнерных групп на вагон по назначению и весу.
4. Задача оптимального размещения контейнеров на площадке.
5. Задачи планирования работы терминала.
6. Задача тайм-слотирования завоза-вывоза.
7. Задача маршрутизации групп контейнеров.
8. Задача оптимизации использования техники.

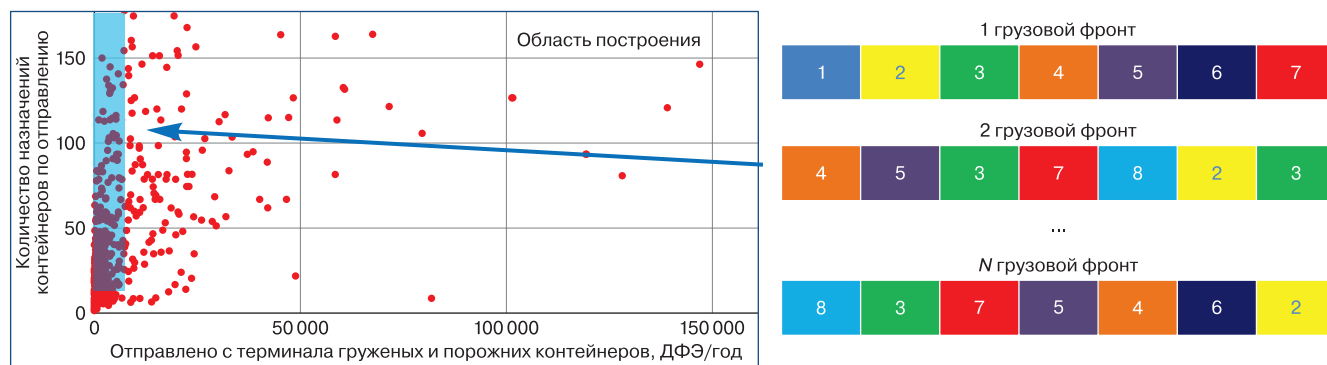


Рис. 8. Грузовые контейнерные терминалы третьей группы, правила хранения контейнеров на контейнерной площадке*

* Источник: данные автора

Fig. 8. Group 3 cargo container terminals, rules for storing containers on the container site*

* Source: author's data

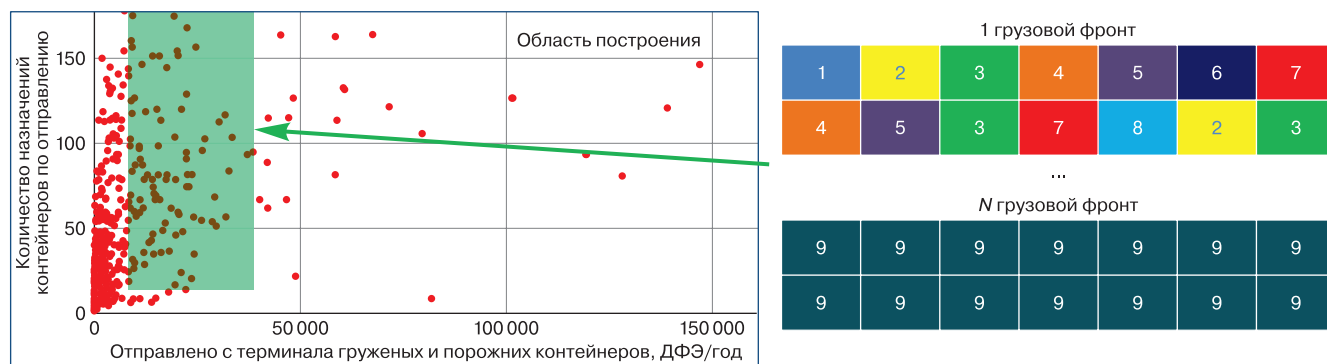


Рис. 9. Грузовые контейнерные терминалы четвертой группы, правила хранения контейнеров на контейнерной площадке*

* Источник: данные автора

Fig. 9. Group 4 cargo container terminals, rules for storing containers on the container site*

* Source: author's data

Пятая группа. Грузовые терминалы, работающие с многими назначениями грузов, при объеме работы, требующем специализации контейнерных площадок и многоярусного хранения контейнеров.

К данной группе относятся грузовые терминалы, отправляющие контейнеры в большое количество N назначений в объемах, требующих специализации контейнерных площадок и многоярусного хранения контейнеров. Отправление производится организованными маршрутами, возможно отправление маршрутных групп.

Грузовые терминалы имеют несколько контейнерных площадок, с грузовыми фронтами каждая. Применяется специализация контейнерных площадок по технологическим операциям: прибытие, отправление, хранение порожних контейнеров (стоковое хранение), площадка для ремонта контейнеров, площадка досмотра контейнеров, следующих под таможенным контролем, и т. д.

На терминалах пятой группы применяются специализированные грузоподъемные средства механи-

зации — специализированные козловые контейнерные краны и контейнерные перегружатели (ричстакеры). Грузовые терминалы данной группы оснащаются полным комплексом автоматизации производственных процессов.

На рис. 10 грузовые терминалы группы ограничены прямоугольной зоной значений (обозначена маркером желтого цвета), удовлетворяющей требованиям:

по оси X : от $D_{\text{техн}}(5)$ до $S_{\text{техн}}(5)$;

по оси Y : от $N = F$ до $N = D_{\text{техн}}(5)$,

где $S_{\text{техн}}(j)$ — перерабатывающая способность грузового терминала по отправлению при хранении груза в j ярусов, ДФЭ/сут:

$$S_{\text{техн}}(j) = \sum_{i=1}^H D_{\text{техн}}(H, j), \quad (3)$$

где H — количество контейнерных площадок на грузовом терминале, ед.

Для грузовых терминалов, относящихся по характеру и объему работы к пятой группе, минимальными

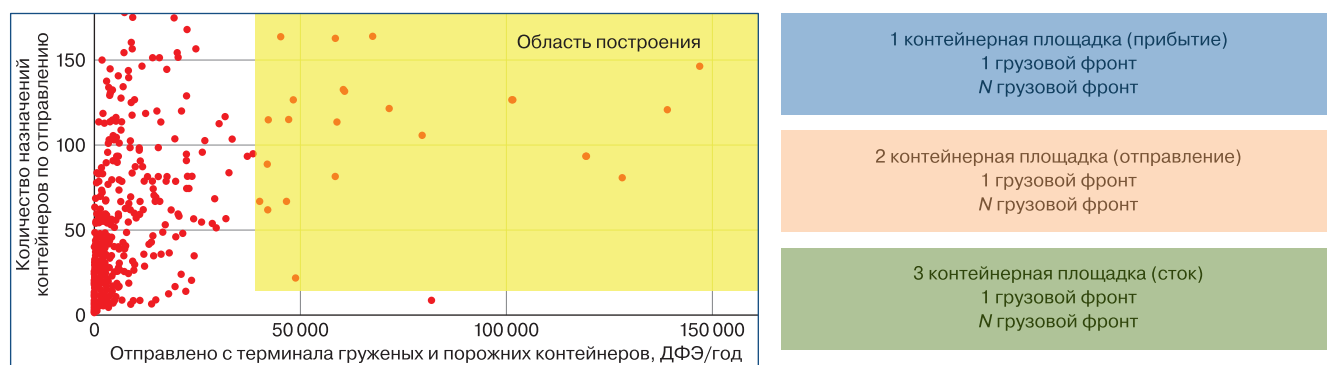


Рис. 10. Грузовые контейнерные терминалы пятой группы, правила хранения контейнеров на контейнерной площадке*

* Источник: данные автора

Fig. 10. Group 5 cargo container terminals, rules for storing containers on the container site*

* Source: author's data

функциональными требованиями к WMS, достаточными для автоматизации производственных процессов, являются:

1. Планирование отправления и прибытия (подхода) контейнерных поездов.
2. Адресный учет хранения контейнеров на терминале и площадках.
3. Задача маршрутизации групп контейнеров.
4. Подбор контейнерных групп на поезд по назначению и весу.
5. Учет нахождения контейнеров на площадке по времени их хранения.
6. Подбор контейнерных групп на вагон по назначению и весу.
7. Задача оптимального размещения контейнеров между площадками и при хранении на площадке.
8. Задачи планирования эксплуатационной работы терминала, железнодорожной станции примыкания, автотранспорта.
9. Задача оптимального тайм-слотирования заезда-вывоза контейнеров на грузовой терминал.
10. Задача оптимизации использования контейнерных площадок по периодам хранения контейнеров.
11. Задача оптимизации использования грузоподъемной техники и оптимизации перемещения по терминалу автомобильной техники.
12. Задача рационального распределения трудовых ресурсов терминала.
13. Использование автоматизированных систем учета операций (техническое зрение считывания номеров вагонов, автомобилей, контейнеров), выполнения операций краном и ричстакером, систем позиционирования грузоподъемных механизмов и т. д.
14. Другие оптимизационные задачи, в зависимости от особенностей контейнерного терминала.

Для отнесения грузового контейнерного терминала к соответствующей группе предлагаются граничные значения критериев, полученные на основе анализа эксплуатационных данных и имитационного моделирования (табл. 2).

Обсуждение и заключение. В результате выполненного исследования получены следующие основные выводы:

1. Существующие подходы к цифровизации грузовых контейнерных терминалов не учитывают различия в объемах, технологии и технической оснащенности их работы. Это приводит к тиражированию избыточного функционала систем управления, необоснованному росту затрат на внедрение и снижению эффективности эксплуатации информационных систем.
2. Выявлены ключевые технико-эксплуатационные характеристики, определяющие потребность терминала в тех или иных цифровых решениях: среднесуточное отправление контейнеров, количество назначений по отправлению, емкость грузового фронта, ярусность хранения, тип средств механизации и количество контейнерных площадок.
3. Предложены количественные критерии разграничения групп грузовых контейнерных терминалов, основанные на соотношении фактических и расчетных показателей перерабатывающей способности. Установлены граничные значения суточного отправления и количества назначений для каждой группы.
4. Разработана классификация грузовых контейнерных терминалов по минимальным требованиям к цифровизации производственных процессов. Для каждой группы формализован обязательный (достаточный) перечень функций систем управления типа WMS/CTMS, не требующий дальнейшего расширения при неизменных условиях работы.

Таблица 2

Критерии разграничения групп грузовых контейнерных терминалов*

Table 2

Criteria for delimiting freight container terminal groups*

Группа	Суточное отправление D , ДФЭ	Количество назначений N , ед.	Соотношение N и F	Ярусность хранения j , ярусов	Тип средств механизации
1	$D \leq 0,5 \cdot L_m$	$N \leq 0,5 \cdot L_m$	—	1	Универсальные (автокраны, крюковые козловые)
2	$0,5 \cdot L_m < D \leq D_{\text{техн}}(5)$	$1 \leq N \leq F$	$N \leq F$	1–5	Универсальные + ричстакеры
3	$D \leq D_{\text{техн}}(1)$	$N > 0,5 \cdot L_m$	$N \gg F$	1 (до 3)**	Универсальные
4	$D_{\text{техн}}(1) < D \leq D_{\text{техн}}(5)$	$F < N \leq D_{\text{техн}}(5)$	$N > F$	2–5	Ричстакеры, контейнерные краны
5	$D > D_{\text{техн}}(5)$	$N > F$	$N \gg F, H \geq 2$	4–5	Специализированные краны, ричстакеры

* Источник: данные автора

* Source: author's data

** Допускается хранение до трех ярусов при наличии ричстакеров, но без специализации фронтов

Дальнейшие исследования поднятых в данной работе вопросов будут направлены на разработку методики оценки экономической эффективности внедрения оптимизационных алгоритмов (размещение контейнеров, маршрутизация техники, тайм-слотирование) с учетом выделенных групп классификации, а также на формализацию переходов между группами при развитии терминалов.

Благодарности: автор выражает благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the author expresses gratitude to the reviewers for useful comments that contributed to the improvement of the article.

Финансирование: автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и публикации данной статьи.

Funding: the author received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов и не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Бородин А. Ф. Автоматизация решения задач развития и использования железнодорожной инфраструктуры и перевозочных ресурсов в Стратегии цифровой трансформации ОАО «РЖД» // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019): труды восьмой науч.-техн. конф., 21 ноября 2019 г. М.: НИИАС, 2019. С. 22–26. EDN: <https://elibrary.ru/vldmnz>.
- Borodin A. F. Automation of solving problems of development and use of railway infrastructure and transportation resources in the Strategy of Digital Transformation of JSC “Russian Railways”. *Intelligent control systems in railway transport. Computer and Mathematical modeling (ICSRT-2019): Proceedings of the Eighth Scientific and Technical Conference, 21st November, 2019*. Moscow: NIIAS; 2019. P. 22–26. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vldmnz>.
- Козлов П. А., Вакуленко С. П., Евреенова Н. Ю. Методы исследования проектов развития объектов транспортной инфраструктуры // Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки: труды международной науч.-практ. конф., посвященной 125-летию университета, 22 октября 2021 г. М.: РУТ МИИТ, 2022. С. 174–181. <https://doi.org/10.47581/2022/Obrazcov.25>. EDN: <https://elibrary.ru/wylmq>.
- Kozlov P. A., Vakulenko S. P., Evreenova N. Yu. Research methods of projects for the development of transport infrastructure facilities. *Academician Vladimir Nikolaevich Obraztsov, the founder of transport science: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, 22nd October, 2021*. Moscow: Russian University of Transport; 2022. P. 174–181. (In Russ.). <https://doi.org/10.47581/2022/Obrazcov.25>. EDN: <https://elibrary.ru/wylmq>.
- Покровская О. Д. Комплексная оценка транспортно-складских систем // Железнодорожный транспорт. 2019. № 7. С. 26–32. EDN: <https://elibrary.ru/gapjrt>.
- Pokrovskaya O. D. Comprehensive assessment of transport and warehouse systems. *Railway Transport*. 2019;(7):26–32. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/gapjrt>.
- Покровская О. Д. Характеристика терминалистики как логики терминалов // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2019. № 4. С. 34–41. EDN: <https://elibrary.ru/zropik>.
- Pokrovskaya O. D. Characteristics of terminalistics as logistics of terminals. *Transport: science, equipment, management (Scientific Information Collection)*. 2019;(4):34–41. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/zropik>.
- Кузнецов А. Л. Перспективы автоматизации контейнерных терминалов // Морские порты России. 2010. № 9. С. 50–55.
- Kuznetsov A. L. Prospects for automation of container terminals. *Sea ports of Russia*. 2010;(9):50–55. (In Russ.).
- Кузнецов А. Л., Галин А. В., Щербакова-Слюсаренко В. Н., Попов Г. Б. Сравнительный анализ показателей эффективности автоматизированных и неавтоматизированных контейнерных терминалов // Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 1, № 1. С. 76–83. <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.51.1.011>. EDN: <https://elibrary.ru/ptokrm>.
- Kuznetsov A. L., Galin A. V., Shcherbakova-Slyusarenko V. N., Popov G. B. Benchmarking analysis for automated and non-automated container terminals. *Marine Intellectual Technologies*. 2021;1(1):76–83. (In Russ.). <https://doi.org/10.37220/MIT.2021.51.1.011>. EDN: <https://elibrary.ru/ptokrm>.
- Москвичев О. В., Васильев Д. В. Интеллектуальная система управления контейнерным терминалом // Железнодорожный транспорт. 2021. № 4. С. 16–19. EDN: <https://elibrary.ru/waatnd>.
- Moskvichev O. V., Vasilyev D. V. Intelligent container terminal management system. *Railway Transport*. 2021;(4):16–19. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/waatnd>.
- Москвичев О. В., Васильев Д. В. Повышение качества оказания услуг ОАО «РЖД» на основе автоматизации и цифровизации технологических процессов на контейнерных терминалах // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2021. Т. 1. С. 59–65.
- Moskvichev O. V., Vasilyev D. V. Improving the quality of Russian Railways services based on automation and digitalisation of technological processes at container terminals. *Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways*. 2021;1:59–65. (In Russ.).
- Москвичев О. В., Васильев Д. В. Цифровой контейнерный терминал // Наука и образование транспорта. 2020. № 1. С. 130–133. EDN: <https://elibrary.ru/xxkfnn>.
- Moskvichev O. V., Vasilyev D. V. Digital container terminal. *Science and education for transport*. 2020;(1):130–133. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/xxkfnn>.
- Басыров И. М., Кочнева Д. И., Чан Х. Инновационная технология терминальной переработки контейнеров // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (54). С. 108–116. <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2022-2-108-116>. EDN: <https://elibrary.ru/nsmhzi>.
- Basyrov I. M., Kochneva D. I., Chang H. Innovative technology of terminal container processing. *Vestnik UrRGUPS*. 2022;2(54):108–116. (In Russ.). <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2022-2-108-116>. EDN: <https://elibrary.ru/nsmhzi>.
- Васильев Д. В. Оптимизация планирования работы парка перегрузочных средств контейнерного терминала // Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах: труды Международной науч. школы, 15–17 декабря 2022 г. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2022. С. 17–21. EDN: <https://elibrary.ru/gdgnfs>.
- Vasilyev D. V. Optimisation of the operation planning of the container terminal's transshipment fleet. *Optimisation and Modeling in automated systems: Proceedings of the International Youth Scientific School, 15–17th December, 2022*. Voronezh: VGTU; 2022. P. 17–21. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/gdgnfs>.

12. Малышев Н. В., Бойков С. А. Диспетчеризация контейнеропотока на терминалах // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 4. С. 106–116. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2022-4-106-116>. EDN: <https://elibrary.ru/rhevtx>.

Malyshev N. V., Boykov S. A. Dispatching container flow at terminals. *Bulletin of Scientific Research Results*. 2022;(4):106–116. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2022-4-106-116>. EDN: <https://elibrary.ru/rhevtx>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Арсений Николаевич КИРИЛЛОВ,
ведущий технолог, производственный отдел, Центральная
дирекция по управлению терминально-складским
комплексом – филиал ОАО «РЖД» (ЦМ, 107174, Россия,
г. Москва, Новая Басманная ул., 2/1, стр. 1),
<https://orcid.org/0009-0004-5538-2488>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Arseniy N. KIRILLOV,
Leading Technologist, Production Department,
Central Directorate for the Management of the Terminal

and Warehouse Complex – branch of JSC “Russian Railways”
(107174, Moscow, bldg. 1, 2/1, Novaya Basmannaya St.),
<https://orcid.org/0009-0004-5538-2488>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

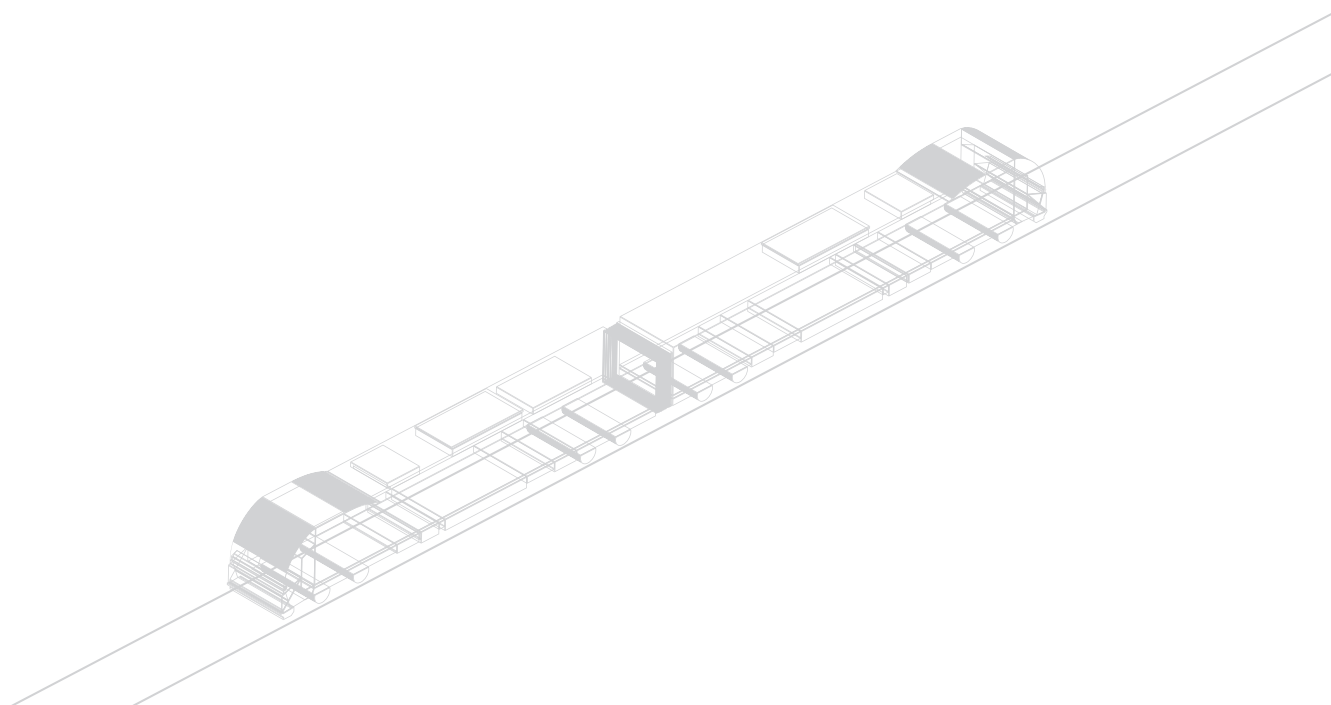
The author has read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 17.11.2025, рецензия от первого рецензента получена 23.12.2025, рецензия от второго рецензента получена 12.01.2026, рецензия от третьего рецензента получена 20.01.2026, рецензия от четвертого рецензента получена 09.02.2026, принята к публикации 17.02.2026.

The article was submitted 17.11.2025, first review received 23.12.2025, second review received 12.01.2026, third review received 20.01.2026, fourth review received 09.02.2026, accepted for publication 17.02.2026.

НАУЧНЫЕ ДИСКУССИИ: ГИПОТЕЗЫ, ТЕОРИИ, ОБСУЖДЕНИЕ

SCIENTIFIC DEBATES:
HYPOTHESES, THEORIES, DISCUSSION



НАУЧНЫЕ ДИСКУССИИ: ГИПОТЕЗЫ, ТЕОРИИ, ОБСУЖДЕНИЕ

Оригинальная научная статья
УДК 65.011.56
EDN: <https://elibrary.ru/dnmrzm>
DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-78-92>
Научная специальность: 2.9.4. Управление процессами перевозок



Вопросы пропуска транзитных грузовых поездопотоков на железных дорогах в условиях увеличивающихся объемов грузовых перевозок

М. И. Мехедов, Л. А. Мугинштейн✉

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью статьи является обоснование комплекса мероприятий по повышению эффективности пропуска транзитных поездов в условиях роста объема грузовых перевозок. В настоящее время актуальным для увеличения перевозочной способности представляется достижение расчетного эффективного режима работы железной дороги, который обеспечивается при равенстве или превышении величиной наличной пропускной способности величины потребной пропускной способности.

Материалы и методы. В работе рассматриваются варианты организации движения грузовых поездов во всем диапазоне соотношений между величинами потребной и наличной пропускных способностей. При этом возможно движение значительного числа поездов по смешанным показаниям светофоров — зеленым, желтым, красным, с меньшими скоростями.

Результаты. Получено аналитическое соотношение, которое показывает уменьшение средней скорости движения грузовых поездов в зависимости от допустимых скоростей движения поездов по желтым и зеленым сигналам светофоров и от расстояния между вслед идущими поездами. По основному соотношению для средней скорости, расстоянию между поездами от двух до трех блок-участков получена принципиальная зависимость средней скорости движения грузовых поездов по желто-зеленым сигналам светофоров от количества поездов на примере участка длиной 180 км, длиной блок-участков 3 км, принятыми скоростями движения на зеленый и желтый — 80 км/ч и 40 км/ч соответственно. Получены аналитические зависимости участковой скорости от длины участка, от средней скорости движения грузовых поездов и от величин задержек движения каждого поезда при пропуске их по участкам и направлениям железной дороги.

Обсуждение и заключение. Расчеты показывают значительное влияние уменьшения расстояний между поездами и увеличения задержек на снижение участковых скоростей и объясняют наблюдаемое на грузонапряженных направлениях снижение участковых скоростей до уровня 32–35 км/ч.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железная дорога, перевозочный процесс, пропускная способность, расстояние между поездами, участковая скорость

Мнение авторов может не совпадать с мнением редакции.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мехедов М. И., Мугинштейн Л. А. Вопросы пропуска транзитных грузовых поездопотоков на железных дорогах в условиях увеличивающихся объемов грузовых перевозок // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2026. Т. 85, № 1. С. 78–92. EDN: <https://elibrary.ru/dnmrzm>.

SCIENTIFIC DEBATES: HYPOTHESES, THEORIES, DISCUSSION

Original article
UDK 65.011.56
EDN: <https://elibrary.ru/dnmrmzm>
DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-78-92>
Scientific specialty: 2.9.4. Transportation process management



Issues of transit freight train traffic handling in conditions of freight traffic volumes increase

Mikhail I. Mekhedov, Lev A. Muginshtein✉

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The aim of the paper is to substantiate a set of measures to improve the efficiency of transit train handling in conditions of freight traffic increase. Currently, it is relevant to increase the traffic capacity to achieve the calculated effective mode of operation of the railway, which is provided when the available capacity is equal or greater than the required capacity.

Materials and methods. The paper considers options for organising freight trains movement in the entire range of ratios between required and available capacity. At the same time, it is possible to move a significant number of trains according to mixed indications of traffic lights signals — green, yellow, red, and at lower speeds.

Results. Obtained analytical ratio shows a decrease in the average speed of freight trains, depending on the permissible train speeds at yellow and green traffic lights, and the distance between the following trains. According to the basic ratio for the average speed, the distance between trains from two to three block sections, fundamental dependence of the average speed of freight trains on the yellow-green traffic light signals on the number of trains is obtained using the example of a 180 km long section, 3 km long block sections, and the accepted speeds for green and yellow at 80 km/h and 40 km/h. Analytical dependences of the section speed on the length of the section, on the average speed of freight trains and on the magnitude of delays in each movement are obtained.

Discussion and conclusion. The calculations show a significant effect of reducing the distances between trains and increasing the amount of delays on the reduction service speeds and explains the decrease in section speeds observed in practice on heavy-traffic routes down to 32–35 km/h.

KEYWORDS: railway, transportation process, traffic capacity, distance between trains, service speed

The opinion of the authors may not coincide with the opinion of the editors.

FOR CITATION: Mekhedov M. I., Muginshtein L. A. Issues of transit freight train traffic handling in conditions of freight traffic volumes increase. *Russian Railway Science Journal*. 2026;85(1):78–92. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-1-78-92>.

Введение. В работе В. А. Шарова и А. Ф. Бородин [1] рассматривается концепция интегрированной технологии управления движением грузовых поездов по расписанию, эксплуатационно-технические требования к интегрированной технологии, а также комплексная программа поэтапного перехода на организацию движения грузовых поездов по расписанию на 2011–2015 гг. Внедрение этих рекомендаций обеспечило бы нормальную работу железных дорог. Вместе с этим, начиная с 2016 года, на основных направлениях движения поездов упали участковые скорости движения, возросли затраты на содержание локомотивных бригад, подвижного состава, устройств инфраструктуры [2–3]. В 2024–2025 гг. заметно ухудшились эксплуатационные показатели на трех главных полигонах сети (Восточный, Северо-Западный и Юго-Западный). Участковая скорость упала до 32–35 км/ч вместо 45–50 км/ч.

В работе ведущих специалистов по организации движения поездов И. В. Белогузова, А. С. Крылова, А. Ф. Бородин, Е. С. Максимовой [4] предполагалось, что усиление и увеличение диспетчерских участков позволит существенно улучшить эксплуатационные показатели работы железных дорог. Вместе с этим в работе отмечено, что 42,2 % участков железных дорог характеризуются заполнением результирующей пропускной способности свыше 85 %. Кроме того, 20,6 % участков имеют полностью исчерпанную пропускную способность. Число участков с загрузкой менее 50 % не превышает 1 %, что по оценке авторов свидетельствует о высокой загрузке сети железных дорог.

В работе профессора А. Т. Осьминина [5] отмечается, что в современных условиях освоение растущих объемов перевозок и повышение качества услуг возможны лишь на основе совершенствования перевозочного процесса и внедрения инновационных решений. Автор предлагает на основе многокритериального расчета плана формирования грузовых поездов разработать методику расчета адаптивного плана на плановый месяц при сменно-суточном планировании.

В статье Д. Ю. Левина [6] особую актуальность представляют оценка существующего уровня и повышение эффективности использования перевозочных возможностей железных дорог. Основным подходом автор считает реализацию возможностей оперативного управления поездобразованием.

Вместе с этим вопрос о значительном понижении участковых скоростей движения грузовых поездов на важнейших грузонапряженных направлениях сети железных дорог в основополагающих работах авторов не рассматривался [7–9].

Далее в статье будут рассмотрены подходы, связанные с необходимостью оценки технических, технологических и организационных возможностей железных дорог по пропуску транзитных поездопотоков, реализации расчетных скоростей движения и уровней загрузки железных дорог.

Технические возможности железных дорог по реализации необходимых объемов перевозок в соответствии с Инструкцией по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог¹ в значительной степени определяются известным представлением о пропускной способности $N_{пр}$. Это максимальное число грузовых поездов, которое может быть пропущено по участку железной дороги при определенном техническом обеспечении и принятых условиях организации движения по зеленым сигналам светофоров.

Опыт подтверждает, что за время существования железных дорог потребное количество грузовых поездов на участках и направлениях неоднократно превышало их пропускные способности, что сопровождалось уменьшением участковых скоростей и объемов перевозимых грузов. При этом увеличение загрузки железных дорог характеризовалось их техническим перевооружением, совершенствованием технологического и организационного обеспечения перевозочного процесса.

Практически в каждый период времени железным дорогам к перевозкам предъявлялся определенный, подтвержденный объем грузов, которому соответствовало определенное количество грузовых транзитных поездов. Такое количество поездов может быть определено как внешняя потребная пропускная способность $N_{потр.гр}^{вн}$.

Этот показатель может превышать принятую при построении нормативных графиков графиковую пропускную способность $N_{потр}^{гр}$, смысл которой в определении рационального количества ниток из графика, соответствующих техническим и организационным возможностям железных дорог. Рекомендуется не превышать значения этого показателя при максимальном объеме перевозимых грузов.

В настоящее время нормативный график переориентирован на универсальность. Он содержит максимальное число ниток грузовых поездов, каждая из которых может быть переоформлена на различные типы поездов в соответствии со знаком дробей, которые поставлены у каждой нитки графика.

В нормативном графике не учитываются длительные окна и длительные временные ограничения скорости. На практике нормативный график служит основой для выбора ниток пользователями при составлении

¹ Инструкция по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 4 марта 2022 г. № 545/р.

суточных оперативных графиков движения в Автоматизированной системе построения прогнозных графиков движения поездов на основе имитационного моделирования (АПК ЭЛЬБРУС) и месячных вариантов графиков движения поездов.

Расчетные режимы работы участков и направлений железных дорог, предусмотренные нормативными документами, будут выполняться при соотношении

$$N_{\text{потр}}^{\text{гр}} \geq N_{\text{потр.тр}}^{\text{вн}} \quad (1)$$

В таких случаях специальных исследований организации движения грузовых поездов не требуется.

Однако при нарушении соотношения (1) возникают нерасчетные режимы движения поездов, затрудняется освоение увеличивающихся объемов перевозок. Исследование процессов в этих случаях связано с оценкой возможностей организации движения поездов с помощью системы регулирования движения вслед идущих поездов с двусторонней автоблокировкой.

Для принятой на сети железных дорог системы организации движения поездов с применением двусторонней автоблокировки расчетный интервал между вслед идущими по зеленым сигналам светофоров поездами определяется с помощью выражения:

$$I_{\text{расч}}^{\text{мин}} = \frac{3L_{\text{бу}} + L_n}{V_{\text{расч}}}, \quad (2)$$

где $L_{\text{бу}}$ — длина усредненного блок-участка железной дороги, км;

L_n — расчетная длина грузового поезда из числа обращающихся на участке, км;

$V_{\text{расч}}$ — расчетная скорость, принятая для графиков движения грузовых поездов на участках обращения, км/ч.

В случае параллельного движения только однопутных грузовых поездов максимальное число поездов в сутки, которое может быть пропущено по участку, с учетом времени на организацию ремонтно-восстановительных и модернизационных мероприятий на инфраструктуре (150 мин), при выполнении условия (2), $N_{\text{пр}}$ может быть определено с помощью известного выражения:

$$N_{\text{пр}} = \frac{(T_{\text{сут}} - \Delta T_{\text{ок}}^{\text{расч}}) \cdot \eta}{I_{\text{расч}}^{\text{мин}}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{сут}}$ — суточный лимит времени, 24 ч;

$\Delta T_{\text{ок}}^{\text{расч}}$ — расчетная оценка времени на проведение работ на инфраструктуре, 2,5 ч;

η — коэффициент надежности технических средств (может быть принят 0,95).

Для определенности дальнейших расчетов с учетом выражений (2) и (3) рассмотрим минимальный

интервал и максимальное число поездов при $L_{\text{бу}} = 3$ км, $L_n = 1$ км, $V_{\text{расч}} = 80$ км/ч.

При этом

$$I_{\text{расч}}^{\text{мин}} = \frac{3 \cdot 3 + 1}{80} \frac{\text{км} \cdot \text{ч}}{\text{км}} = 0,125 \text{ ч} = 7,5 \text{ мин};$$

$$N_{\text{пр}} = \frac{(1440 \text{ мин} - 150 \text{ мин}) \cdot 0,95}{7,5 \text{ мин}} \approx 163 \text{ поезда/сут.}$$

Это весьма высокое значение пропускной способности, которое, как отмечается, может быть реализовано на участках только в случаях движения однопутных грузовых поездов.

При достаточно высоком среднем весе поезда (около 4000 т) на направлениях железных дорог объем перевезенных за год грузов P с учетом известного соотношения будет равен:

$$P = 365 \cdot N_{\text{пр}} Q_{\text{ср}} = 365 \text{ сут} \cdot 163 \text{ поезда/сут} \cdot 4000 \text{ т} = 238 \text{ млн т/г.}$$

Важнейшим показателем эксплуатационной работы участков и направлений железных дорог является пропуск транзитных грузовых поездов. Такие поезда обеспечивают экономические и другие цели отечественных и зарубежных поставщиков и потребителей товаров, связи регионов, гармонизацию передачи подвижного состава по сети железных дорог и др.

Ранее было введено обозначение потребного количества транзитных грузовых поездов внешних потребителей услуг железных дорог — $N_{\text{потр.тр}}^{\text{вн}}$.

Свойство этой величины — внешние количественные требования к размерам передачи и приема поездов по участкам и направлениям железных дорог транзитных поездов с соседних участков, направлений железных дорог.

Важным свойством величины $N_{\text{потр}}^{\text{гр}}$, которое может быть обеспечено усилиями железной дороги, является то, что она определяется суточным бюджетом времени на пропуск транзитных грузовых поездов, остающимся от пропуска пассажирских, местных поездов, времени на ремонт и модернизацию объектов инфраструктуры и ряда других обстоятельств.

При принятом подходе к организации движения поездов пропуск необходимого числа транзитных грузовых поездов можно было бы считать решенным. Однако на практике в современных условиях на основных грузонапряженных железных дорогах объем перевозок существенно меньше потребного. В значительной степени это связано с более сложной структурой смешанных поездопотоков, грузовых и пассажирских поездов, с вариативностью условий их пропуска по участкам железных дорог, с известным рассогласованием основных длин станционных путей и длин ряда поездов, находящихся в обращении.

Для оценки влияния этих факторов сравним результаты в случаях идеальной и реальной организации движения транзитных грузовых поездов с учетом влияния находящихся в обращении пассажирских поездов, движущихся по зеленым сигналам светофоров, а также времени, запланированного для выполнения необходимых работ в окна.

Приняв нормированные показатели скорости движения грузовых поездов, равной 60 км/ч, количества пассажирских поездов на уровне 10 шт., коэффициента съема грузовых поездов пассажирскими, равным 1,7, и межпоездного интервала между грузовыми поездами, равным 10 мин, можем получить оценку времени для пропуска транзитных грузовых поездов. Для этого, как отмечалось ранее, из суточного бюджета времени вычитается время пропуска пассажирских поездов:

$$\Delta T_{\text{пасс}} = 10 \text{ поездов} \cdot 1,7 \cdot 10 \text{ мин} = 170 \text{ мин.}$$

При оценке времени для пропуска 10 местных поездов при коэффициенте съема 1,0 и при межпоездном интервале 10 мин получаем

$$\Delta T_{\text{мест}} = 10 \text{ поездов} \cdot 1,0 \cdot 10 \text{ мин} = 100 \text{ мин.}$$

С учетом того, что время на проведение окон принято равным 150 мин, лимит времени на пропуск транзитных поездов составит

$$T_{\text{тр}} = (1440 - 170 - 100 - 150)0,95 = 969 \text{ мин.}$$

Число транзитных грузовых поездов составит при принятом интервале между поездами

$$N_{\text{пр}} = \frac{969 \text{ мин}}{10 \text{ мин}} = 97 \text{ поездов.}$$

Сравнение этой величины с ранее полученным значением $N_{\text{пр}} = 163$ поезда/сут показывает, что учет только трех реально существующих обстоятельств — наличия пассажирского движения, окон и заметной местной работы — приводит к существенному снижению возможности пропуска транзитных поездов.

Еще большего снижения пропускной способности транзитных поездов $N_{\text{пр.тр}}$ следует ожидать при учете влияния на организацию движения поездов по участку железной дороги трудностей при приеме поездов на технические станции, особенностей организации движения поездов повышенной массы и длины, в том числе соединенных и контейнерных, влияние плана и профиля пути.

В связи с необходимостью при организации перевозок учитывать основные факторы, влияющие на движение поездов, к показателю пропускной способности участка $N_{\text{пр}}$ следует добавить граничное представление о величине наличной пропускной способности для транзитных грузовых поездов $N_{\text{пр.тр}}^{\text{нал}}$, которое характеризуется движением по зеленым сигналам

светофоров максимального количества транзитных грузовых поездов.

С учетом этого может быть изменено соотношение (1), и при решении вопросов организации движения поездов следует основываться на соотношении

$$N_{\text{пр.тр}}^{\text{нал}} \geq N_{\text{потр.тр}}^{\text{вн}} \quad (4)$$

В этом случае технические и организационные возможности железных дорог совпадают или больше предъявленных внешних требований.

На загруженных железнодорожных магистралях характерным является увеличенный объем перевозимых транзитных грузов и соответствующее увеличение числа транзитных поездов в обращении $N_{\text{обр}}^{\text{тр}}$. Такому процессу на первом этапе нагружения линий соответствует соотношение

$$N_{\text{пр.тр}}^{\text{нал}} \geq N_{\text{обр}}^{\text{тр}} \geq N_{\text{потр.тр}}^{\text{вн}} \quad (5)$$

при котором обеспечивается возможность движения грузовых поездов по зеленым сигналам светофоров.

В случае, если наличная пропускная способность $N_{\text{пр.тр}}^{\text{нал}}$ оказывается меньше числа поездов, введенных в обращение, т. е.:

$$N_{\text{пр.тр}}^{\text{нал}} < N_{\text{обр}}^{\text{тр}} \leq N_{\text{потр.тр}}^{\text{вн}} \quad (6)$$

то нарушаются закономерности, предусмотренные в соотношениях (2) и (3), расстояния между поездами уменьшаются и снижается скорость движения поездов в связи с движением на желто-зеленые сигналы светофоров.

Предложенный далее способ определения пропускной способности транзитных грузовых поездов открывает новые методические подходы к определению граничного значения количества «хороших» транзитных поездов, при котором скорость движения поездов остается расчетной и только при дальнейшем увеличении числа транзитных грузовых поездов начинает уменьшаться из-за движения по желто-зеленым сигналам светофоров.

Таким образом, определив $N_{\text{пр.тр}}^{\text{нал}}$, мы получаем оценку того максимального количества транзитных поездов, которые могут быть пропущены по участку или направлению железной дороги по зеленым сигналам светофоров при принятой структуре поездопотока и определенных условиях пропуска поездов.

При необходимости повышения объемов перевозимых транзитными поездами грузов возможно увеличение $N_{\text{пр.тр}}^{\text{нал}}$ за счет совершенствования структуры поездопотоков и условий пропуска поездов внутри участков и направлений железных дорог. Однако эффективность таких действий имеет ограниченные возможности.

По результатам расчетов $N_{\text{пр.тр}}^{\text{нал}}$ могут быть приняты более радикальные решения, например, усиление устройств инфраструктуры. При этом возможно

строительство дополнительных путей, удлинение станционных путей, возможно усиление тягового обеспечения, использование вагонов повышенной грузоподъемности и габаритов.

Дальнейшие исследования движения поездов с пониженными скоростями по желто-зеленым сигналам светофоров позволят более обоснованно сочетать необходимость освоения растущих объемов перевозок с выбором эффективных мер по обеспечению их освоения.

В течение длительного времени грузонапряженные направления железных дорог работают в режимах пропуска транзитных грузовых поездов в соответствии с соотношением (6). Число транзитных поездов в обращении $N_{обр}^{тр}$ превышает наличную пропускную способность $N_{пр.тр}^{нал}$. В таких условиях несколько увеличиваются размеры движения, но снижается скорость поездопотока, увеличивается эксплуатационный парк локомотивов, число локомотивных бригад, изменяется ряд других важных эксплуатационных показателей. И на данный момент на ряде железных дорог основных грузонапряженных направлений сети

по статистическим данным ОАО «РЖД» участковая скорость находится на уровне 32–34 км/ч, что почти в полтора раза меньше нормативных значений.

Переходные процессы организации движения грузовых поездов, при которых расстояния между поездами изменяются от трех блок-участков до двух, исследованы недостаточно и не в полной мере объясняют наблюдаемые в эксплуатации негативные изменения основных показателей поездной работы.

Для оценки влияния изменений расстояний между поездами на скорость движения поездов и на количество поездов в обращении предлагается рассмотреть упрощенную модель участка, по которому движется поток однородных грузовых поездов, рассматриваемых в виде точек, при этом участок оборудован трехзначной автоматической блокировкой с равными длинами блок-участков.

На рис. 1 приведены расположение поездов и скорости их передвижения в зависимости от расстояний между поездами на участке А–В при двенадцати одинаковых блок-участках.

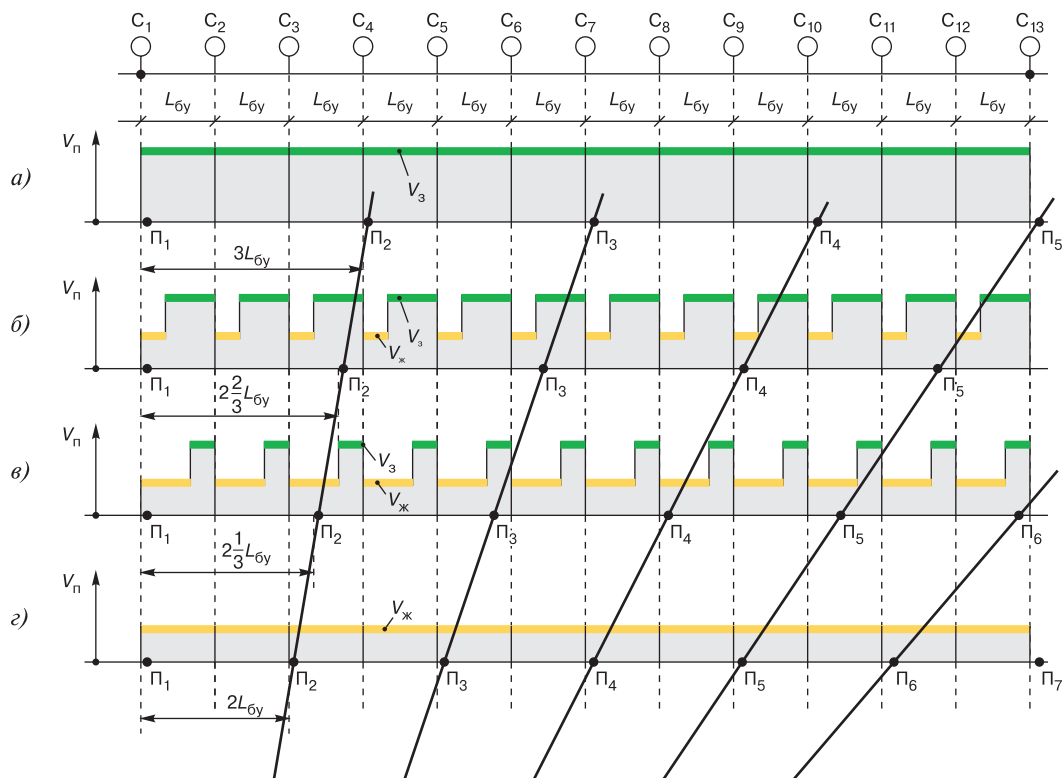


Рис. 1. Диаграммы расположения участковых скоростей движения поездов по блок-участкам при изменении расстояний между ними*:
 $a - 3L_{6y}$; $б - 2\frac{2}{3}L_{6y}$; $в - 2\frac{1}{3}L_{6y}$; $г - 2L_{6y}$; C_1-C_{13} — светофоры; $П_1-П_7$ — поезда; V_3 — средняя скорость при зеленом сигнале светофора;
 $V_{ж}$ — средняя скорость при желтом сигнале светофора

* Источник: данные авторов

Fig. 1. Diagrams of the location of section train speeds along block sections when changing the distances between them*:
 $a - 3L_{6y}$; $б - 2\frac{2}{3}L_{6y}$; $в - 2\frac{1}{3}L_{6y}$; $г - 2L_{6y}$; C_1-C_{13} — traffic lights; $П_1-П_7$ — trains; V_3 — average speed at green traffic light signal;
 $V_{ж}$ — average speed at yellow traffic light signal

* Source: authors' data

На рис. 1, *а* поезда показаны в виде точек Π_1 – Π_5 , которые расположены на расстоянии трех блок-участков друг от друга. В соответствии с этим при трехзначной автоматической блокировке максимальная скорость поездов будет реализовываться со скоростями, принятыми при движении на зеленые сигналы светофоров. При этом на участке А–В разместится максимально возможное при движении по зеленым сигналам число поездов — четыре.

На рис. 1, *б* и 1, *в* показано, как уменьшается средняя скорость движения поездов при переходе от $3L_{\text{бy}}$ к $2\frac{2}{3}L_{\text{бy}}$ и к $2\frac{1}{3}L_{\text{бy}}$. Одновременно число поездов на участках 1, *б* и 1, *в* увеличивается до пяти.

На рис. 1, *г* расстояние между поездами принято равным $2L_{\text{бy}}$. В соответствии с этим максимальная скорость передвижения поездов не превышает допустимой скорости движения по желтым сигналам светофоров. Число поездов на участке при этом достигает шести.

Приведенные на рис. 1 соотношения скоростей движения поездов, расположение поездов на участ-

ке А–В показывают, что при допущениях о равенстве блок-участков, принятых максимальных скоростях движения при зеленых и желтых сигналах светофоров для всех вслед идущих поездов соблюдение расстояний между поездами на уровне трех блок-участков обеспечивает реализацию скоростей на уровне допустимой по зеленым сигналам светофоров. Уменьшение расстояния между поездами менее трех блок-участков определяет движение со средней скоростью, связанной с движением по желто-зеленым сигналам светофоров, при этом несколько увеличивается число грузовых поездов в обращении.

Для определения закономерностей изменения скоростей движения поездов при уменьшении расстояния между поездами впервые вводится параметр, изменяющийся от 0 до 1, определяющий расстояние впереди идущего поезда внутри третьего блок-участка от границы этого участка $x \cdot L_{\text{бy}}^3$.

На рис. 2 приведены допустимые скорости движения поезда Π_1 при синхронном движении его с впереди идущим поездом Π_2 , расположенным между свето-

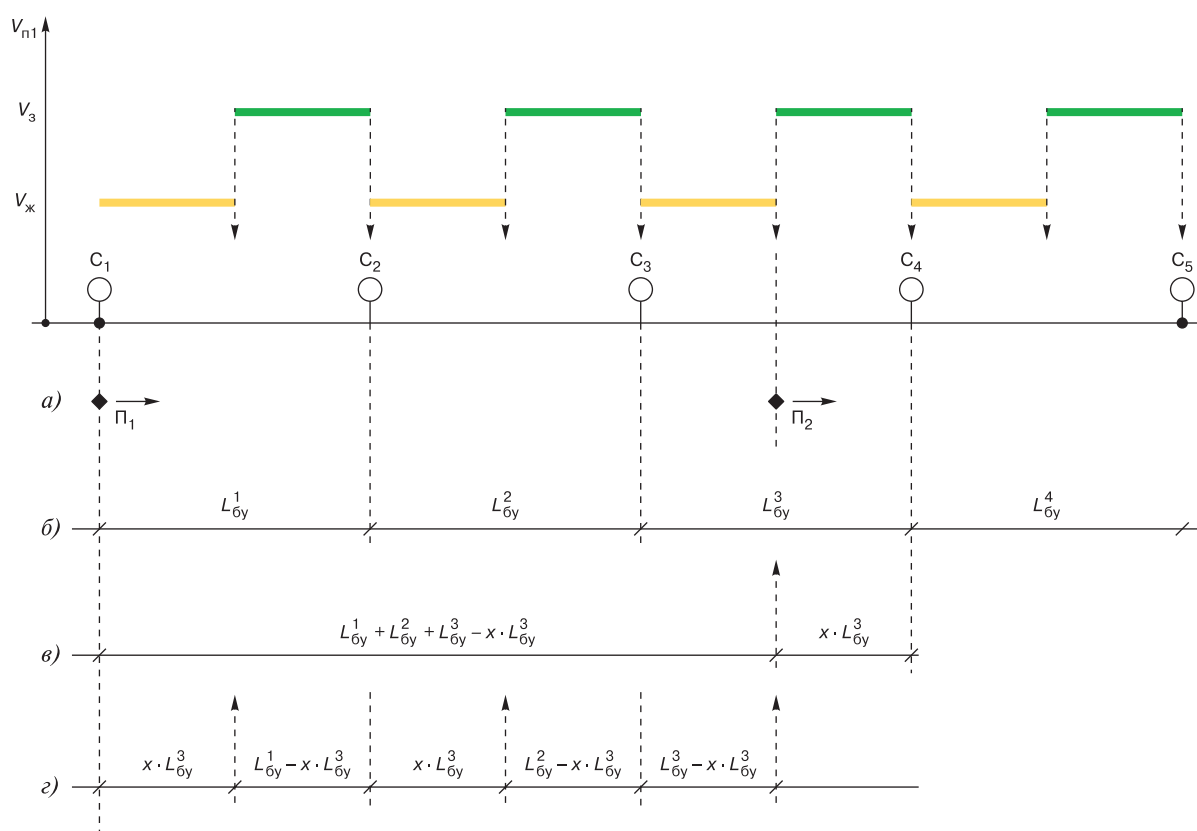


Рис. 2. Допустимые скорости поезда Π_1 при изменении расстояния до впереди идущего поезда Π_2 (*а*); *б* — по зеленому сигналу светофора, $x = 0$; *в*, *г* — по желто-зеленому сигналу светофоров*

* Источник: данные авторов

Fig. 2. Permissible train speeds Π_1 when changing distance to the Π_2 train in front (*a*); *б* — at green traffic light signal, $x = 0$; *в*, *г* — at yellow-green traffic lights signal*

* Source: authors' data

форами C_3 и C_4 . Поезд P_2 расположен на расстоянии $x \cdot L_{\text{бy}}^3$ от светофора C_4 (рис. 2, в). Величина x изменяется от 0 до 1. При $x = 0$ расстояние между поездами составляет $3L_{\text{бy}}$, при этом движение поездов осуществляется по зеленым сигналам светофоров (рис. 2, б); при $x = 1$ расстояние между поездами составляет $2L_{\text{бy}}$, и поезда следуют по желтым сигналам светофоров (рис. 2, в).

При промежуточном положении поезда P_2 на третьем блок-участке $0 \leq x \leq 1$ максимальные скорости поездов P_1 и P_2 при принятых условиях ($L_{\text{бy}}$ равны, $V_{\text{п}}$ равны, $L_{\text{п}} = 0$, переключение скоростей происходит мгновенно) отображаются ступенчатой фигурой. Для поезда P_1 кривая скорости приведена на рис. 2, а.

Поезд P_1 движется вслед за поездом P_2 на желтый сигнал светофора на протяжении отрезка $x \cdot L_{\text{бy}}$ и на зеленый сигнал светофора на отрезке $L_{\text{бy}} - x \cdot L_{\text{бy}}$. С учетом этого можно определить важнейший показатель — среднюю скорость движения поездов $V_{\text{ср}}^x$. Для этого приравняем время движения по участку со средней скоростью к времени движения по участку по желтым и зеленым сигналам светофоров:

$$\frac{L_{\text{бy}}}{V_{\text{ср}}^x} = \frac{x \cdot L_{\text{бy}}}{V_{\text{ж}}} + \frac{(1-x) \cdot L_{\text{бy}}}{V_{\text{з}}}. \quad (7)$$

После преобразований выражение для $V_{\text{ср}}^x$ представим в виде:

$$V_{\text{ср}}^x = \frac{V_{\text{ж}} \cdot V_{\text{з}}}{(1-x) \cdot V_{\text{ж}} + x \cdot V_{\text{з}}}, \quad (8)$$

при величине x в диапазоне от 0 до 1 ($0 \leq x \leq 1$).

На рис. 3 приведены зависимости средних скоростей движения поездов при принятых условиях от положения впереди идущего поезда ($0 \leq x \leq 1$) и разрешенных скоростей движения по желтым и зеленым сигналам светофоров.

Отметим, что в соответствии с (8), как это показано на рис. 3, средние скорости движения при сближении впереди и вслед идущих поездов описываются крутопадающими нелинейными зависимостями.

Принятая модель движения поездов однозначно позволяет оценивать существенное влияние расстояний между поездами при переходе от движения по зеленым сигналам светофоров к движению по желто-зеленым и желтым сигналам.

На рис. 4 представлено возможное увеличение максимального числа поездов на участке длиной $L_{\text{уч}} = 180$ км.

Максимально возможное размещение поездов на участке определяется с помощью выражения (9)

$$N_{\text{max}}^x = \frac{L_{\text{уч}}}{(3-x) \cdot L_{\text{бy}}}. \quad (9)$$

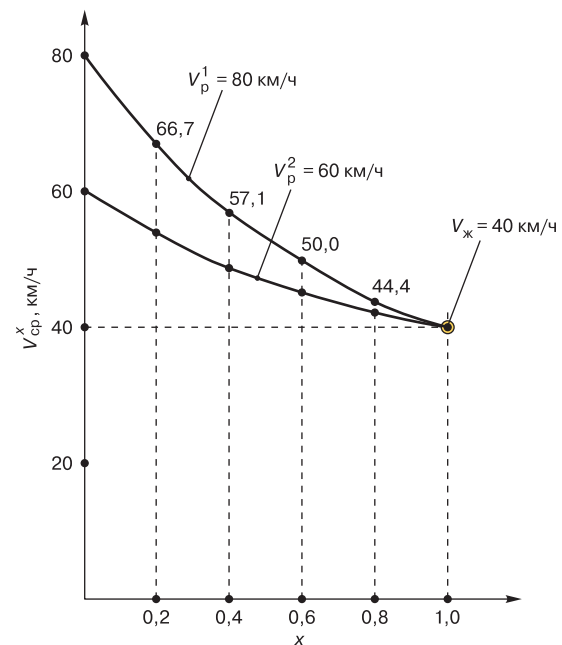


Рис. 3. Зависимость средних скоростей движения поездов от положения впереди идущего поезда ($0 \leq x \leq 1$) и разрешенных скоростей движения по зеленым ($V_{\text{з}} = 60, 80$ км/ч) и желтым ($V_{\text{ж}} = 40$ км/ч) сигналам светофоров*
* Источник: данные авторов

Fig. 3. Dependence of average train speeds on the position of the train in front ($0 \leq x \leq 1$) and allowed speeds according to green ($V_{\text{з}} = 60, 80$ km/h) and yellow ($V_{\text{ж}} = 40$ km/h) traffic lights signals*
* Source: authors' data

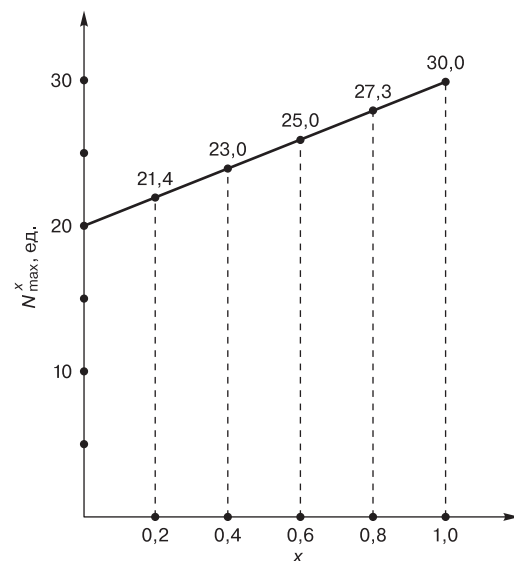


Рис. 4. Максимальное число поездов N_{max}^x в зависимости от расстояния между поездами ($0 \leq x \leq 1$) на участке длиной 180 км при $L_{\text{бy}} = 3$ км*
* Источник: данные авторов

Fig. 4. Maximum number of N_{max}^x trains depending on the distance between trains ($0 \leq x \leq 1$) on a 180 km long section with $L_{\text{бy}} = 3$ km*
* Source: authors' data

При расстоянии между поездами в два блок-участка максимальное число поездов $N_{\max}^{x=1}$ в полтора раза больше, чем при расстоянии в три блок-участка, но скорость при этом может быть в полтора-два раза меньше, чем при трех блок-участках.

Отметим, что учет длины и ускорений поезда при смене сигналов автоблокировки не вызывает затруднений, но при этом существенно усложняется вид зависимостей скоростей продвижения поездов по желто-зеленым сигналам светофоров от расстояния между поездами. В связи с этим в выражениях (7)–(9) может быть учтен еще один важный параметр — длина поезда L_n .

Для упрощения выражения для средней скорости (8) введем соотношение $K_{L_n} = \frac{L_n}{L_{\text{бл}}}$. С учетом этого

$$\frac{L_{\text{бл}}}{V_{\text{ср}L_n}^x} = \frac{x \cdot L_{\text{бл}} + L_n}{V_{\text{ж}}} + \frac{(1-x)L_{\text{бл}} - L_n}{V_3}. \quad (10)$$

Из выражения (10) получаем

$$V_{\text{ср}L_n}^x = \frac{V_{\text{ж}} \cdot V_3}{(1-x-K_{L_n}) \cdot V_{\text{ж}} + (x+K_{L_n}) \cdot V_3}. \quad (11)$$

При $V_3 = 80$ км/ч и $V_{\text{ж}} = 40$ км/ч, $x = 0,5$ и $K_{L_n} = 0,3$, $L_{\text{бл}} = 3$ км и $L_n = 1$ км, а также при сравнении $V_{\text{ср}}^x$ с по-

мощью выражений (8) и (11) можно оценить влияние длины поезда на среднюю скорость движения условного потока поездов:

$$V_{\text{ср}L_n}^{x=0,5} = \frac{80 \cdot 40}{0,5 \cdot 80 + 0,5 \cdot 40} = 53,3 \text{ км/ч},$$

при $K_{L_n} = 0$;

$$V_{\text{ср}L_n}^{x=0,5} = \frac{80 \cdot 40}{0,8 \cdot 80 + 0,2 \cdot 40} = 44,4 \text{ км/ч}, \quad (12)$$

при $K_{L_n} = 0,3$.

Заметным уточнением средней скорости движения по желто-зеленым сигналам светофоров является учет ускорений: a_p — ускорений разгона поезда при переходе от желтых сигналов к зеленым и a_t — ускорений торможения поезда при переходе от зеленых к желтым сигналам светофоров.

На рис. 5 представлены процессы разгона и торможения при принятых значениях $V_{\text{ж}}$ и V_3 , ускорений a_p и a_t , длины блок-участка $L_{\text{бл}}$.

С помощью известных формул механики определяем время разгона и замедления поезда:

$$t_p = \frac{V_3 - V_{\text{ж}}}{a_p}, \quad (13)$$

$$t_t = \frac{V_3 - V_{\text{ж}}}{a_t}. \quad (14)$$

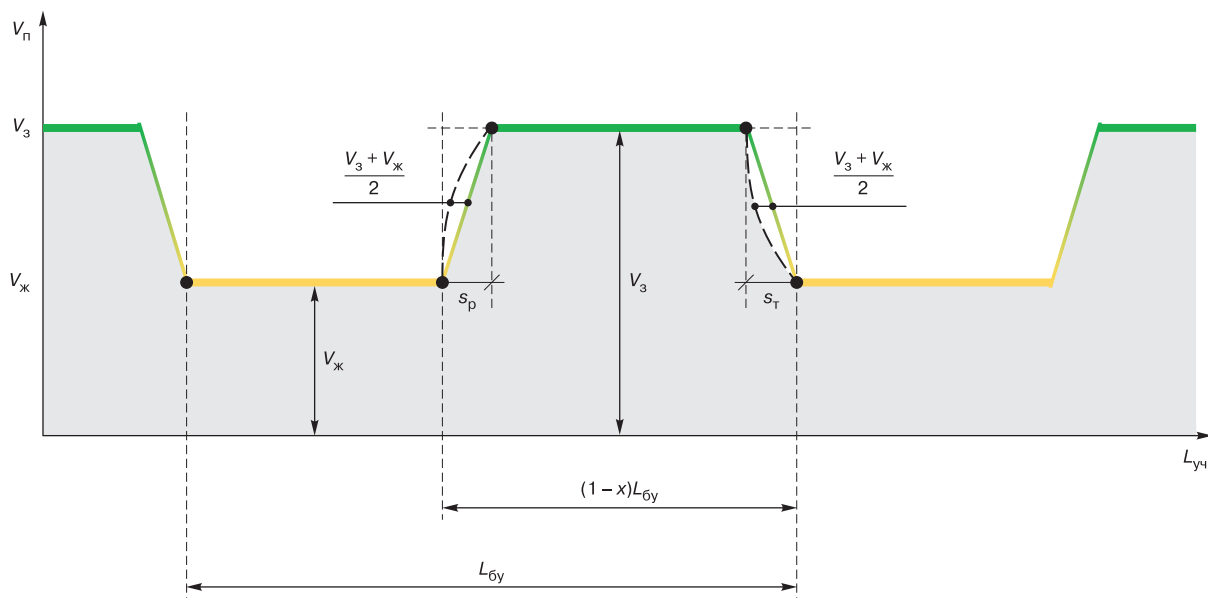


Рис. 5. Влияние ускорений разгона и торможения на реализацию максимальной скорости поезда при движении по желто-зеленым сигналам светофоров*:

s_p — участок разгона; s_t — участок торможения

* Источник: данные авторов

Fig. 5. Effect of starting and braking accelerations on the realisation of the maximum train speed when moving along the yellow-green traffic lights signals*:

s_p — starting section; s_t — braking section

* Source: authors' data

Пути разгона и торможения, отмеченные на рис. 5, определяются с помощью выражений:

$$s_p = \frac{a_p \cdot t_p^2}{2}, \quad (15)$$

$$s_T = \frac{a_T \cdot t_T^2}{2}. \quad (16)$$

Эти выражения характеризуются параболической зависимостью от времени разгона и торможения, которые в реальных условиях слабо выражены и могут быть заменены линейными зависимостями.

С учетом этого средняя скорость на отрезках s_p и s_T принимается равной

$$V_{cp}^{s_p} = V_{cp}^{s_T} = \frac{V_3 + V_{ж}}{2}. \quad (17)$$

Для оценки отмеченных величин примем $V_3 = 80$ км/ч, $V_{ж} = 40$ км/ч, $a_p = 0,08$ м/с², $a_T = 0,15$ м/с².

С учетом этого в соответствии с (13) и (14):

$$t_p = \frac{80 - 40}{0,08 \cdot 3,6} = \frac{40}{0,29} = 139 \text{ с},$$

$$t_T = \frac{40}{0,15 \cdot 3,6} = \frac{40}{0,54} = 74 \text{ с}.$$

Участки разгона и торможения s_p и s_T в соответствии с выражениями (15) и (16) составят:

$$s_p = \frac{0,08 \cdot 139^2}{2} = \frac{0,08 \cdot 19\,321}{2} = 773 \text{ м},$$

$$s_T = \frac{0,15 \cdot 74^2}{2} = \frac{0,15 \cdot 5476}{2} = 411 \text{ м}.$$

Для упрощения выражения для средней скорости введем промежуточный показатель K_a :

$$K_a = \frac{V_3^a}{V_3} = \frac{(1-x) \cdot L_{\text{бл}} (V_3 - V_{ж})}{(s_p + s_T)(V_3 - V_{ж}) + (1-x)L_{\text{бл}} \cdot (V_3 + V_{ж})}. \quad (18)$$

Это соотношение может быть добавлено в выражение (11), в котором уже учтен коэффициент влияния длины поезда K_{L_n} :

$$\begin{aligned} V_{cp L_n}^x &= \frac{V_{ж} \cdot V_3^a}{(1-x-K_{L_n}) \cdot V_{ж} + (x+K_{L_n}) \cdot V_3^a} = \\ &= \frac{K_a \cdot V_{ж} \cdot V_3}{(1-x-K_{L_n}) \cdot V_{ж} + (x+K_{L_n}) \cdot K_a \cdot V_3}. \end{aligned} \quad (19)$$

В дальнейшем выражение (19) может быть использовано при необходимости уточнения результатов расчетов средних скоростей движения для реальных участков и направлений движения поездов. Учет длины

поезда и ускорений разгона и замедления при смене сигналов светофоров влияет на снижение средних скоростей движения поездов.

При исследовании влияния расположения поездов на блок-участках, характеризуемых параметром x , на среднюю скорость движения поезда будем пользоваться полученным ранее упрощенным выражением (8), сохраняя возможность наглядного оценивания физических закономерностей.

В результате принятой методики расчета пропускной способности участка железной дороги, оборудованного трехзначной автоблокировкой, расчетным путем определена зависимость средней скорости движения поезда при следующих условиях.

Если расстояние между вслед идущими поездами больше или равно трем блок-участкам, то поезд может следовать с любой разрешенной скоростью. В нашем случае это расчетная скорость движения грузовых поездов, предусмотренная в нормативном графике движения.

Если интервал между поездами меньше трех блок-участков и больше или равен двум блок-участкам, поезд движется с переменной скоростью то по желтым, то по зеленым сигналам светофоров.

Участковая скорость и ее анализ. Важнейшим показателем эксплуатационной работы является участковая скорость — средняя скорость потока грузовых поездов по участку железной дороги без учета стоянок на технических станциях.

Участковая скорость определяется в соответствии с выражением:

$$V_{уч} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} L_i}{\sum T_i}, \quad (20)$$

где L_i — пробег каждого i -го грузового поезда по участку;

$1 \leq i \leq N_{\text{обр}}$, где $N_{\text{обр}}$ — число поездов на участке обращения;

$\sum_{i=1}^{N_{\text{обр}}} T_i$ — суммарное время обращения поездов по участку.

Для каждого поезда время обращения составит:

$$T_i = \frac{L_{уч}}{V_{cp i}} + \Delta T_i, \quad (21)$$

где $L_{уч}$ — длина участка;

$V_{cp i}$ — средняя скорость движения i -го поезда;

ΔT_i — время задержки i -го поезда на участке обращения.

Воспользовавшись представлениями о принятой нами идеальной модели поездопотока по участку железной дороги, при которой $L_i = L_{уч}$, средняя скорость

движения $V_{ср i}$ вычисляется по формуле (8) и одинакова для каждого из N_i поездов.

Из выражений (20)–(21) получаем

$$V_{уч} = \frac{N_i \cdot L_{уч}}{\left(\frac{L_{уч}}{V_{ср i}} + \Delta T_i\right) \cdot N_i} = \frac{L_{уч}}{\frac{L_{уч}}{V_{ср i}} + \Delta T_i}. \quad (22)$$

На рис. 6 приведены зависимости участковых скоростей от расстояний между вслед идущими поездами и величинами задержек каждого поезда на участке в широком диапазоне изменения от 0 до 10 ч.

Примечательно, что увеличение задержек значительно снижает участковую скорость. Этому способствуют увеличение количества поездов в обращении числом более наличной пропускной способности, значительные задержки в виде окон, предупреждений о снижении скорости, повреждений технических средств.

Статистические исследования участковых скоростей на грузонапряженных участках железных дорог подтверждают наличие зоны существенного снижения скорости движения поездов при увеличении их числа до предельно допустимых в эксплуатации величин.

На рис. 7, а приведена такая усредненная зависимость участковой скорости от уровня заполнения пропускной способности. Отметим, что зона взаимного влияния поездов в потоке начинает действовать с уровня заполнения пропускной способности $(0,7 \div 0,8)$ и при полном заполнении пропускной способности $(1,0)$ участковая скорость снижается до уровня $(0,4 \div 0,6) \cdot V_{уч}$ от расчетной скорости V_p .

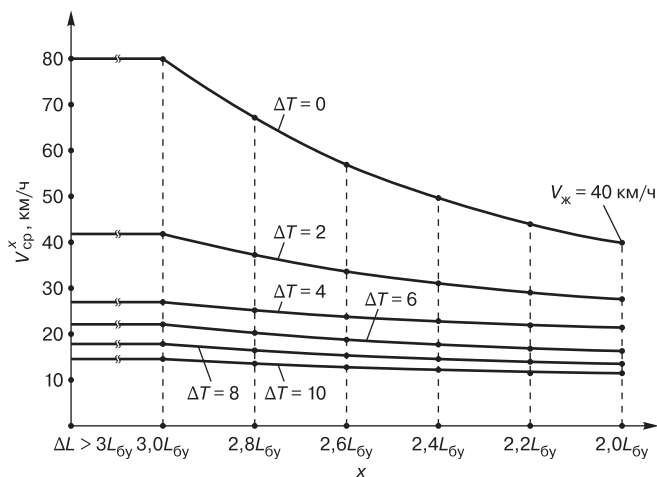


Рис. 6. Зависимость участковой скорости от расстояния между поездами ΔL при пропуске поездопотока и от величин задержек поезда ΔT (ч) на участке их обращения*

* Источник: данные авторов

Fig. 6. Dependence of service speed on the distance between trains ΔL when passing train traffic and on the magnitude of train delays ΔT (h) in the circulation section*

* Source: authors' data

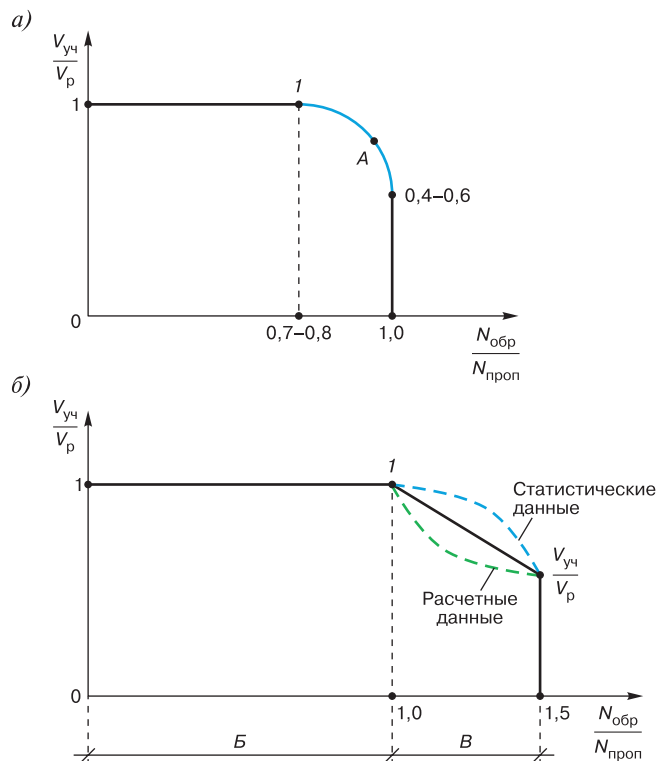


Рис. 7. Сопоставление усредненных статистических $V_{уч}$ и расчетных участковых V_p скоростей в зависимости от соотношения наличной пропускной способности $N_{проп}$ и числа поездов в обращении $N_{обр}$ *:

а — при движении по зеленым сигналам светофоров;

б — при движении по желто-зеленым сигналам светофоров;

А — зона взаимного влияния поездов в потоке; Б — при движении по зеленым сигналам светофоров; В — по желто-зеленым сигналам

* Источник: данные авторов

Fig. 7. Comparison of the averaged statistical $V_{уч}$ and calculated V_p service speeds depending on the ratio of available traffic capacity $N_{проп}$ and the number of trains in circulation $N_{обр}$ *:
а — when driving at green traffic lights; б — at yellow-green traffic lights;
А — zone of mutual influence of trains in the flow; Б — when driving at green traffic lights signals; В — at yellow-green traffic lights signals
* Source: authors' data

Учитывая результаты выполненных исследований, стоит отметить, что снижение участковой скорости следует ожидать при превышении наличной пропускной способности количеством транзитных поездов в обращении. Практически расчетная величина начала снижения участковой скорости около 0,7 совпадает со статистическими данными.

С другой стороны, граница кривой на рис. 7, а, определяемая соотношением

$$\frac{N_{обр}}{N_{проп}} = 1,$$

является условной, и после выполненных исследований требуется ее корректировка, т. к. снижение участковой скорости до 0,5 свидетельствует о движении

грузовых поездов в определенном интервале по желто-зеленым сигналам светофоров, и это противоречит определению пропускной способности участка, при которой должно обеспечиваться движение по зеленым сигналам светофоров. При корректировке рис. 7, а на горизонтальной оси следует отложить расстояние в виде отношения числа грузовых поездов в обращении к наличной пропускной способности $\frac{N_{обр}}{N_{нал}}$.

Можно отметить две характерные точки, определяемые соотношениями $\frac{N_{обр}}{N_{нал}} = 1$ и $\frac{1,5N_{обр}}{N_{нал}} = 1,5$.

В первом случае точка характеризует левую границу зоны движения по зеленым сигналам светофоров, вторая точка разграничивает зоны движения поездов по желто-зеленым и на красные сигналы светофоров.

На рис. 7, б пунктиром показаны аппроксимирующие кривые участковой скорости, обычно используемые при статистической обработке опытных данных и получаемые в результате расчетов по упрощенной модели.

Учитывая трудности получения полноценных статистических опытных данных и увеличение сложности расчетной модели, например, при разных длинах блок-участков на участках обращения грузовых поездов, целесообразно аппроксимировать кривую участковой скорости на участке движения по желто-зеленым сигналам светофоров прямой линией, проходящей через две точки.

Первая точка имеет координаты

$$(V_{уч} = V_p; N_{обр} = N_{нал}),$$

вторая точка имеет координаты

$$(V_{уч} = 0,5V_p; N_{обр} = 1,5N_{нал}).$$

Таким образом, выполненные исследования, в которых отмечена необходимость ввода понятия наличной пропускной способности транзитных грузовых поездов, связанной с факторами, влияющими на пропуск максимального числа транзитных грузовых поездов, позволяют перейти к более обоснованной форме зависимости, приведенной на рис. 7, б.

Важнейшим результатом сравнения статистических и расчетных данных изменений зависимостей участковой скорости от количества грузовых поездов на участках обращения является закономерность, установленная в работе: движение поездов по желто-зеленым сигналам светофора определяет снижение скорости каждого поезда и совокупности поездов в потоке при уменьшении расстояния между вслед идущими поездами.

Участковая скорость в значительной степени определяет технико-экономические показатели работы железных дорог, такие как размеры эксплуатируемых парков вагонов и локомотивов, количество локомо-

тивных бригад, сроки доставки грузов, расход энергии на тягу поездов и др.

На грузонапряженных участках железных дорог часто складывается эксплуатационная ситуация, при которой наличной пропускной способности недостаточно и практически движение большого числа транзитных грузовых поездов происходит по желто-зеленым сигналам светофоров.

Общепринятая формула для определения годового грузооборота

$$\Gamma = m_{ср} \cdot N_{пр} \cdot L_{уч} \cdot 365, \text{ ткм} \cdot \text{бр/год}$$

не дает ответов на эти вопросы.

Представим грузооборот в более динамичном виде за сутки — $\Gamma_{сут}$.

$$\Gamma_{сут} = m_{ср} \cdot N_{сут}^{пр} \cdot V_{ср} \cdot 24 \cdot 0,5, \quad (23)$$

где $m_{ср}$ — средняя масса поезда, т;

$N_{сут}^{пр}$ — пропускная способность участка, поезд.;

$V_{ср}$ — средняя скорость движения поездов по участку, км/ч;

24 — часов в сутки;

0,5 — коэффициент, усредняющий пути, проходимые поездами за сутки.

При расчетах по формуле (23) важную роль играют разрешенные величины скоростей — движение по зеленым сигналам светофоров, по желто-зеленым сигналам, а также расстояния между вслед идущими поездами.

Если принять $m_{ср} = 4000$ т, $V_3 = 60$ км/ч, $V_ж = 40$ км/ч, $L_{бу} = 3$ км, то в соответствии с выражениями (24)–(25) суточный грузооборот при расстоянии между вслед идущими поездами три и два блок-участка будет равен:

$$\begin{aligned} \Gamma_{сут}^3 &= 4000 \cdot \frac{V_3 \cdot 24}{9} \cdot V_3 \cdot 12 = \\ &= 460\,800\,000 \text{ ткм} \cdot \text{бр/сут} = 460,8 \cdot 10^6 \text{ ткм} \cdot \text{бр/сут}, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_{сут}^ж &= 4000 \cdot \frac{V_ж \cdot 24}{6} \cdot V_ж \cdot 12 = \\ &= 307\,200\,000 \text{ ткм} \cdot \text{бр/сут} = 307,2 \cdot 10^6 \text{ ткм} \cdot \text{бр/сут}. \end{aligned} \quad (25)$$

Если расстояние между поездами равно $2,5L_{бу} = 7,5$ км, то

$$N_{пр}^{ж-3} = \frac{V_ж \cdot V_3 \cdot 24}{[(1 - 0,5) \cdot V_ж + 0,5 \cdot V_3] \cdot 7,5} = 153,6 \quad (26)$$

и

$$\Gamma_{сут}^{ж-3} = 4000 \cdot 153,6 \cdot 50 \cdot 12 = 368,7 \cdot 10^6 \text{ ткм} \cdot \text{бр/сут}. \quad (27)$$

Отметим, что в выражениях (25)–(27) пропускная способность $N_{пр}$ определяется умножением принятой скорости движения на 12 часов — время, рассматриваемое для определения эксплуатационных показателей.

Полученное расстояние делим на принятое расстояние между поездами и получаем максимальное число грузовых поездов, которое может быть представлено на рассматриваемом участке.

Сравнение результатов расчетов по выражениям (25)–(27):

$$\Gamma_{\text{сут}}^3 : \Gamma_{\text{сут}}^{\text{ж}-3} : \Gamma_{\text{сут}}^{\text{ж}} \Rightarrow \\ \Rightarrow 460,8 \cdot 10^6 : 368,7 \cdot 10^6 : 307,2 \cdot 10^6 = 1,5 : 1,25 : 1, \quad (28)$$

где $\Gamma_{\text{сут}}^{\text{ж}} = 307,2 \cdot 10^6$ ткм · бр/сут показывает весьма значительное влияние скорости пропуска поездов по участку.

При увеличении скорости движения по зеленым сигналам светофоров до 80 км/ч соотношение (28) существенно изменится в пользу более быстрого пропуска поездов:

$$\Gamma_{\text{сут}}^{(80)} = 4000 \cdot \frac{80 \cdot 24}{9} \cdot 80 \cdot 12 = 819,2 \cdot 10^6 \text{ ткм} \cdot \text{бр/сут},$$

$$\Gamma_{\text{сут}}^{(80)} : \Gamma_{\text{сут}}^{(60)} : \Gamma_{\text{сут}}^{(40)} \Rightarrow 2,7 : 1,5 : 1.$$

Полученные количественные оценки однозначно определяют скорость движения поездов как важнейший фактор эффективности перевозочного процесса.

Обсуждение. В работе рассмотрен комплекс вопросов, связанных с влиянием увеличения нагруженности железных дорог на качественные и количественные показатели эксплуатационной работы.

При некоторых упрощающих допущениях, не влияющих на основу физических закономерностей рассматриваемых процессов, показано, что причинами снижения участковых скоростей на грузонапряженных направлениях сети железных дорог являются: превышение наличной пропускной способности транзитных грузовых поездов на участках и направлениях железных дорог числом транзитных грузовых поездов, находящихся в обращении на этих участках и направлениях, а также влияние числа, продолжительности и глубины перерывов в движении поездов, связанных с окнами и временными предупреждениями о снижении скоростей движения поездов.

Особо следует отметить очевидные затруднения в организации эксплуатационной работы, связанные с пропуском транзитных поездов, длина которых превышает длины станционных путей на участках и направлениях железных дорог.

В работе получены зависимости для определения средних скоростей движения поездов от количества поездов на участке их обращения. При количестве поездов, меньшем или равном наличной пропускной способности, средняя скорость движения поезда будет равна принятой при разработке графиков движения поездов. При заполнении пропускной способности

большим, чем наличная пропускная способность транзитных грузовых поездов, средняя скорость движения поездов будет уменьшаться по гиперболической зависимости, проходящей через точку с координатами — скорость, принятая при движении по зеленым сигналам светофоров, и наличная пропускная способность, а также через точку с координатами — скорость, допускаемая при желтых сигналах светофоров, и 1,5-кратной пропускной способности. В этих случаях движение поездов происходит попеременно по желтым и зеленым сигналам светофоров.

На основе выполненных исследований предложена корректировка графических представлений статистических и расчетных участковых скоростей в зависимости от соотношения наличной пропускной способности и числа транзитных поездов в обращении.

Введенный показатель $\Gamma_{\text{сут}}$ позволяет оценивать зависимость выполняемой работы грузовыми поездами от их числа на участках обращения.

Приведенные соотношения показывают, что наибольший объем работы грузовых поездов достигается при максимальных скоростях движения по зеленым сигналам светофоров, т. е. при полном использовании наличной пропускной способности.

Заключение. Из материалов работы следует, что основными мероприятиями по повышению эффективности пропуска транзитных поездов на железных дорогах в условиях роста объема грузовых перевозок транзитных поездов могут быть приняты:

- увеличение наличной пропускной способности транзитных грузовых поездов за счет совершенствования технологии перевозок и усиления объектов инфраструктуры;
- существенное уменьшение в обращении числа поездов, длины которых превышают длины станционных путей;
- повышение дисциплины при организации пакетного пропуска поездов в окна;
- согласование наличных пропускных способностей перегонов и технических станций участков;
- переход к параллельным графикам при смешанном движении грузовых и пассажирских поездов.

Реализация этих и ряда других технологических мероприятий позволит увеличить наличную пропускную способность наиболее загруженных участков и направлений железных дорог на 10–15 %.

При устойчивости процессов перенаправления грузов с запада на восток страны и увеличении при этом объемов перевозимых грузов следует ожидать достаточно быстрой окупаемости затрат на усиление инфраструктуры. К таким мероприятиям следует отнести:

- строительство вторых, третьих и четвертых путей на высоконагруженных участках и направлениях железных дорог;

- удлинение станционных путей и увеличение их количества для совершенствования графиков движения поездов и увеличения емкости путевого развития железных дорог;

- спрямление участков железных дорог с кривыми малых радиусов с заменой их кривыми радиусами более 600 м.

Реализация таких мероприятий обеспечит устойчивую, высокоэффективную работу железных дорог на следующие 10–15 лет эксплуатации.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors express gratitude to the reviewers for useful comments that contributed to the improvement of the article.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Шаров В.А., Бородин А.Ф. Интегрированная технология управления движением грузовых поездов по расписанию // Железнодорожный транспорт. 2011. № 8. С. 11–21. EDN: <https://elibrary.ru/ogyupz>.

Sharov V. A., Borodin A. F. Integrated technology for managing the movement of scheduled freight trains. *Railway Transport*. 2011;(8):11–21. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ogyupz>.

2. Мехедов М.И., Мугинштейн Л.А. О проблемах организации движения и эффективности использования пропускных способностей станций // Железнодорожный транспорт. 2015. № 7. С. 20–27. EDN: <https://elibrary.ru/udlpcd>.

Mekhedov M. I., Muginshtein L. A. On the problems of traffic management and efficient use of station capacity. *Railway Transport*. 2015;(7):20–27. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/udlpcd>.

3. Лобанов С.В., Мехедов М.И. Факторный анализ причин невыполнения показателей графика движения поездов // Интеллектуальные транспортные системы: материалы IV Международной науч.-практич. конф., 22 мая 2025 г. М.: РУТ (МИИТ), 2025. С. 262–268. <https://doi.org/10.30932/9785002587582-2025-262-268>. EDN: <https://elibrary.ru/lghrhu>.

Lobanov S. V., Mekhedov M. I. Factor analysis of reasons of train timetable indicators noncompliance. *Intelligent transport systems: Proceedings of the Fourth International Scientific and Practical Conference, May 22nd, 2025*. Moscow: Russian University of Transport; 2025. P. 262–268. (In Russ.). <https://doi.org/10.30932/9785002587582-2025-262-268>. EDN: <https://elibrary.ru/lghrhu>.

4. Белогузов И.В., Крылов А.С., Бородин А.Ф., Максимова Е.С. Целевая модель диспетчерского управления на сети железных дорог с применением сквозных принципов // Железно-

дорожный транспорт. 2025. № 9. С. 19–26. EDN: <https://elibrary.ru/ndibly>.

Beloguzov I. V., Krylov A. S., Borodin A. F., Maksimova E. S. The target model of dispatching control on the railway network using end-to-end principles. *Railway Transport*. 2025;(9):19–26. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ndibly>.

5. Осьминин А.Т. Научное решение проблем перевозочного процесса // Железнодорожный транспорт. 2018. № 12. С. 12–17. EDN: <https://elibrary.ru/урхijv>.

Os'minin A. T. Scientific solution of transportation process problems. *Railway Transport*. 2018;(12):12–17. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/урхijv>.

6. Левин Д.Ю. Расчет и оценка эффективности использования перевозочных возможностей железных дорог // Наука и технологии железных дорог. 2023. Т. 7, № 3 (27). С. 8–17. EDN: <https://elibrary.ru/wxtrmc>.

Levin D. Yu. Calculation and evaluation of the effectiveness of the use of transportation capabilities of railways. *Railway Science Technology*. 2023;7(3(27)):8–17. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/wxtrmc>.

7. Виноградов С.А., Мехедов М.И., Мугинштейн Л.А., Федюлин В.Г., Устинов В.А., Корниенко Н.В. Метод участковых скоростей для диагностики перевозочного процесса сети железных дорог // Железнодорожный транспорт. 2022. № 4. С. 12–17. EDN: <https://elibrary.ru/hdgpjh>.

Vinogradov S. A., Mekhedov M. I., Muginshtein L. A., Fedulin V. G., Ustinov V. A., Kornienko N. V. Sectional speed method for diagnostics of the transportation process of the railway network. *Railway Transport*. 2022;(4):12–17. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/hdgpjh>.

8. Мугинштейн Л.А., Мехедов М.И. Методические подходы к выявлению факторов, влияющих на стабильность пропуска поездов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2014. № 2. С. 24–33. EDN: <https://elibrary.ru/tolgtz>.

Muginshtein L. A., Mekhedov M. I. Methodological approaches to revelation of factors influencing the stability of train flow handling. *Russian Railway Science Journal*. 2014;(2):24–33. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tolgtz>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Михаил Иванович МЕХЕДОВ,

канд. техн. наук, первый заместитель генерального директора, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Россия, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), SPIN-код: 8703-2651, <https://orcid.org/0000-0002-8174-214X>

Лев Александрович МУГИНШТЕЙН,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Россия, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), Author ID: 762110, <https://orcid.org/0000-0002-7894-7435>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail I. MEKHEDOV,

Cand. Sci. (Eng.), First Deputy General Director, Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), SPIN-code: 8703-2651, <https://orcid.org/0000-0002-8174-214X>

Lev A. MUGINSHTEIN,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 762110, <https://orcid.org/0000-0002-7894-7435>

ВКЛАД АВТОРОВ

Михаил Иванович МЕХЕДОВ. Постановка целей и задач, общее руководство исследованием, разработка введения, оценка наличной пропускной способности транзитных грузовых поездов, вывод выражений для средней и участковой скоростей поездов, редактирование и подготовка текста статьи (50 %).

Лев Александрович МУГИНШТЕЙН. Постановка целей и задач, вывод выражений для средней и участковой скоростей движения поездов. Введение понятия динамической провозной способности. Редактирование и подготовка текста статьи (50 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Mikhail I. MEKHEDOV. Setting goals and objectives, general management of research, development of introduction, available capacity of transit freight trains estimation, and output of expressions

for the average and local train speeds, editing and preparation of the text (50 %).

Lev A. MUGINSHTEIN. Setting the goals and objectives, output of expressions for the average and local train speeds. Introduction of the concept of dynamic carrying capacity. Editing and preparation of the text (50 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 09.09.2025, рецензия получена 05.03.2026, принята к публикации 10.03.2026.

The article was submitted 09.09.2025, review received 05.03.2026, accepted for publication 10.03.2026.