

ISSN 2223–9731 (Print)

ISSN 2713–2560 (Online)

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-93-186>

**ВЕСТНИК
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
(ВЕСТНИК ВНИИЖТ)**

**RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL
(VESTNIK VNIIZhT)**

ТОМ 85, № 2. 2026

Учредитель:
АО «Научно-исследовательский
институт железнодорожного транспорта»

Founder:
JSC “Railway Research Institute”

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

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

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

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

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

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)

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 — научный секретарь, АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

Заместитель главного редактора

Каресев 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,

Ларина 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 15.05.2026. Формат бумаги 60×90 1/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 11,75. Тираж 300 экз. Заказ 178626. 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. Larina, 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 15.05.2026. Format is 60x90 1/8. Offset printing. 11,75 printed sheets. 300 copies. Order No. 178626. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Определение влияния расчетных параметров на изменение времени оборота грузового вагона в разные периоды на сети железных дорог
Е. А. Сотников, И. А. Ябло, П. С. Холодняк, Е. В. Пчелинцева 101–110

Оценка эксплуатационных характеристик железнодорожной станции на Транссибирской магистрали с использованием имитационного моделирования
М. А. Власов, А. Л. Казаков, А. В. Супруновский..... 111–122

Оценка эффективности использования грузовых вагонов в современных условиях
Д. А. Мачерет, Н. А. Валеев 123–133

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Особенности усталостного разрушения упругих клемм промежуточных рельсовых скреплений
Л. Р. Ботвина, Ю. А. Демина, В. О. Березин, М. Р. Тютин, А. В. Замуховский 135–151

Использование метода неравновесных режимов при испытаниях кузовов пассажирских вагонов для оценки и мониторинга их теплотехнического состояния
П. О. Мусерский, С. Н. Науменко 152–163

Совершенствование архитектуры системы учета электроэнергии на железнодорожном транспорте
В. С. Басыров, А. Б. Косарев..... 164–174

Термодинамическая оценка потенциала использования сжиженного природного газа в автономном рефрижераторном вагоне
Д. Я. Монастырский, В. В. Галов, И. Г. Киселев 175–186

CONTENTS

TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

Determination of calculated parameters influence on wagon turnover time change at various periods on railway network

Evgeniy A. Sotnikov, Israil A. Yabko, Pavel S. Kholodnyak, Ekaterina V. Pchelintseva 101–110

Operational characteristics of railway station located on the Trans-Siberian Railway using simulation modeling

Matvey A. Vlasov, Alexander L. Kazakov, Anton V. Suprunovsky 111–122

Evaluation of the efficiency of freight cars in modern conditions

Dmitry A. Macheret, Nadir A. Valeev 123–133

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Investigation of fatigue fracture features in elastic clamps of railway fastening systems

Ludmila R. Botvina, Yulia A. Demina, Vadim O. Berezin, Marat R. Tyutin, Alexander V. Zamukhovskiy 135–151

Usage of nonequilibrium modes method in passenger car bodies test for their thermal condition estimation and monitoring

Prokopiya O. Muserskiy, Sergey N. Naumenko 152–163

Improvement of architecture for electricity metering system on railway transport

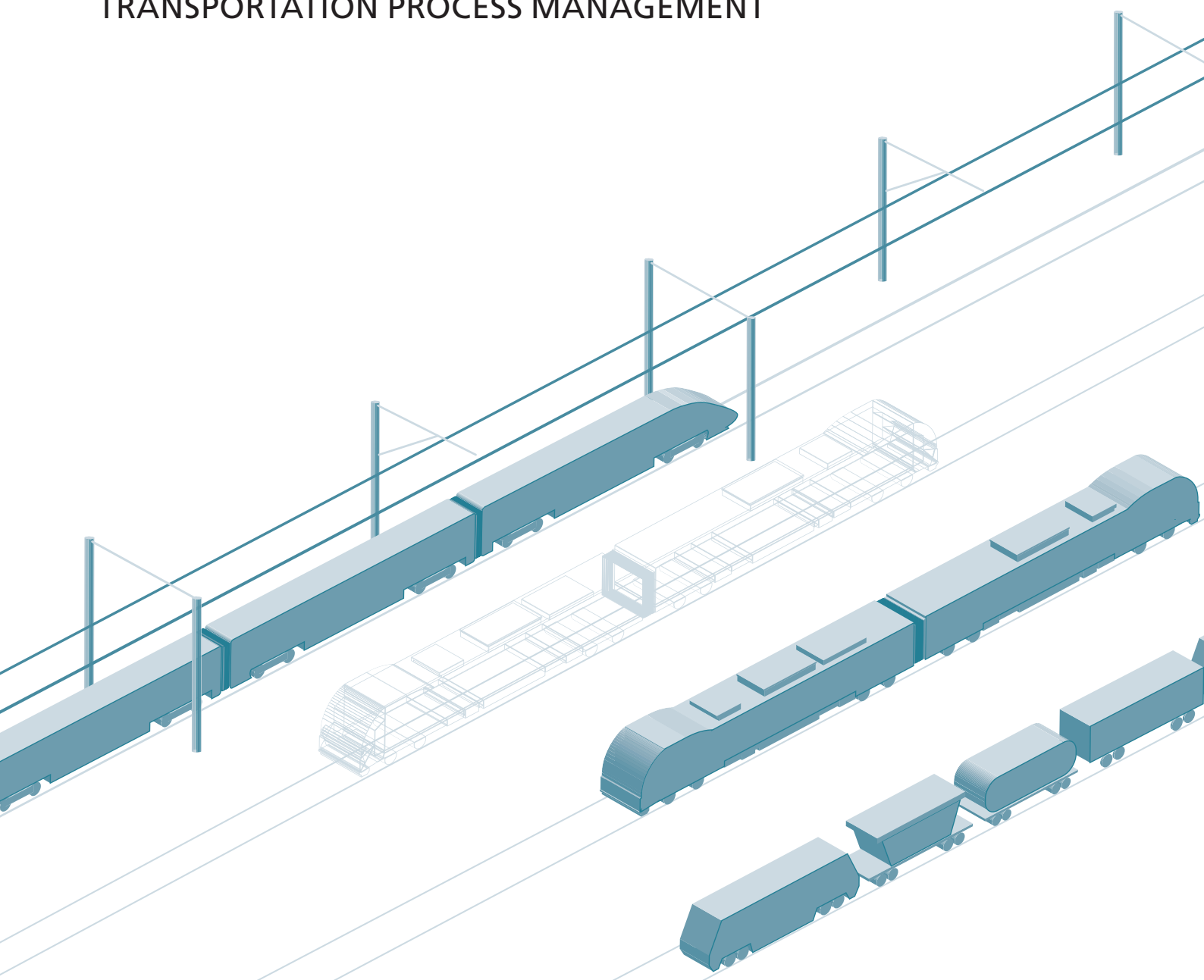
Valentin S. Basyrov, Alexander B. Kosarev 164–174

Thermodynamic assessment of potential for using liquefied natural gas in autonomous refrigerated car

Dmitrii Ya. Monastyrskii, Vladimir V. Galov, Igor G. Kiselev 175–186

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT



УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Оригинальная научная статья
УДК 656.2.4
EDN: <https://elibrary.ru/toeefl>
DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-101-110>
Научная специальность: 2.9.4. Управление процессами перевозок



Определение влияния расчетных параметров на изменение времени оборота грузового вагона в разные периоды на сети железных дорог

Е. А. Сотников, И. А. Ябло, П. С. Холодняк, Е. В. Пчелинцева✉

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Изменение времени оборота грузового вагона принято оценивать по данным о дислокации вагона на участках, технических станциях, путях общего и необщего пользования и в местном простом. Опыт показывает, что использование только этих данных приводит к неточностям и ошибкам. Цель работы — предложить новую, уточненную методику анализа показателя времени оборота вагона, показать влияние входящих в него расчетных параметров. Применение методики позволит разработать эффективные меры по ускорению оборота и повышению качества перевозочного процесса.

Материалы и методы. Используются статистические данные работы железнодорожного транспорта по выполнению грузовых перевозок в период 1995–2024 гг. Основные теоретические результаты получены на основании алгебраических преобразований зависимостей, связывающих изменение времени оборота вагона с изменением величин значений расчетных параметров в различные периоды времени.

Результаты. Разработана методика определения изменения времени оборота вагона с углубленной детализацией по различным расчетным параметрам, с использованием которой для сети железных дорог выполнен анализ влияния каждого из расчетных параметров на изменение времени оборота вагона в период 2010–2024 гг. Данный период характеризуется переходом от стабильных значений времени оборота вагона с общей тенденцией его снижения к периоду с существенными колебаниями с трендом значительного возрастания, примерно в 1,5 раза. Это вызвало увеличение потребного вагонного парка более чем на 350 тыс. вагонов, избыточное занятие станционных путей и затруднения в пропуске поездопотоков. Установлена доля каждого расчетного параметра в росте времени оборота вагона и их рейтинг по снижению влияния на общий показатель.

Обсуждение и заключение. Разработанные теоретические предложения позволяют более правильно оценивать причины, приводящие к изменению времени оборота вагона, и обосновывать решения, направленные на ускорение оборота, совершенствование работы полигонов и сети железных дорог в целом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сеть железных дорог, организация перевозочного процесса, оборот вагона, расчетные параметры, алгебраическое преобразование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сотников Е. А., Ябло И. А., Холодняк П. С., Пчелинцева Е. В. Определение влияния расчетных параметров на изменение времени оборота грузового вагона в разные периоды на сети железных дорог // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2026. Т. 85, № 2. С. 101–110. EDN: <https://elibrary.ru/toeefl>.

✉ pchelinceva.e@vniizht.ru (Е. В. Пчелинцева)

© Сотников Е. А., Ябло И. А.,
Холодняк П. С., Пчелинцева Е. В., 2026

Original article
UDK 656.2.4
EDN: <https://elibrary.ru/toeefl>
DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-101-110>
Scientific specialty: 2.9.4. Transportation process management



Determination of calculated parameters influence on wagon turnover time change at various periods on railway network

Evgeniy A. Sotnikov, Israil A. Yabko,
Pavel S. Kholodnyak, Ekaterina V. Pchelintseva✉

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Wagon turnover time change is commonly estimated by the location of wagons at sites, technical stations, public and non-public railway tracks, in local downtime. Experience shows that exclusive use of these data leads to inaccuracies and errors. The purpose of the study is to propose a new refined methodology for analysing the indicator of the wagon turnover time, and to show the influence of the calculated parameters included in it. The application of the methodology would allow to develop effective measures to accelerate turnover and improve the quality of the transportation process.

Materials and methods. Statistical data of railway transport operations for freight transportation in 1995–2024 are used. The main theoretical results are obtained based on algebraic transformations of dependencies linking the change in wagon turnover time with the change in the values of calculated parameters in various time periods.

Results. The authors developed a methodology for determining the change in wagon turnover time with in-depth details for various calculated parameters, which is used to analyse the influence for each of calculated parameters on the change in wagon turnover time in 2010–2024 for railway network. This period is characterised by the transition from stable values of the wagon turnover time with a general downward trend to a period with significant fluctuations with a significant upward trend, approximately in 1.5 times. This caused an increase in the required car fleet by more than 350 thousand wagons, excessive occupation of station tracks and difficulties in train traffic passage. The share of each calculated parameter in the growth of wagon turnover time and their rating for reducing the impact on the overall indicator have been established.

Discussion and conclusion. The developed theoretical proposals allow for a more accurate assessment of the causes of changes in wagon turnover time and provide a basis for making decisions aimed at improving the operation of proving grounds and railway network as a whole.

KEYWORDS: railway network, management, car turnover, calculated parameters, algebraic transformation

FOR CITATION: Sotnikov E. A., Yabko I. A., Kholodnyak P. S., Pchelintseva E. V. Determination of calculated parameters influence on wagon turnover time change at various periods on railway network. *Russian Railway Science Journal*. 2026;85(2):101–110. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-101-110>.

✉ pchelinceva.e@vniizht.ru (E. V. Pchelintseva)

© Sotnikov E. A., Yabko I. A.,
Kholodnyak P. S., Pchelintseva E. V., 2026

Введение. Время оборота вагона ϑ , сут, является важнейшим качественным показателем организации и анализа хода выполнения перевозочного процесса¹ [1] на сети железных дорог ОАО «РЖД», т. е. путях общего пользования (далее — ПОП) и путях необщего пользования (далее — ПНП). Этот показатель определяет потребный парк вагонов $P_{\text{потр}}$ для выполнения планируемых размеров погрузки грузов, а следовательно и потребный парк локомотивов, емкости путевого развития станций и др. Чем меньше ϑ , тем меньше потребное количество технических средств и эффективнее работа ПОП и ПНП. Поэтому при анализе хода перевозочного процесса в различные периоды времени T_1 и T_2 (например, сутки, месяц, год — в зависимости от необходимого периода анализа) прежде всего выполняется сравнение фактических (отчетных) значений показателей времени оборота вагона в эти периоды (ϑ_1 и ϑ_2 соответственно). При их неравенстве, и особенно, если $\vartheta_2 > \vartheta_1$, следует в первую очередь выполнить анализ причин, вызывающих рост ϑ .

Величина ϑ в каждый период работы сети железных дорог или ее подразделений определяется на основании статистических отчетных данных о его расчетных параметрах^{2, 3} [2], представленных в формулах (1) и (2).

$$\vartheta = \frac{1}{24} \left(\frac{l_o}{V_{\text{уч}}} + \frac{l_o}{L_{\text{бп}}} t_{\text{бп}} + \frac{l_o}{L_{\text{пер}}} t_{\text{пер}} + t_{\text{гр}} \right), \quad (1)$$

где l_o — длина полного рейса вагона, км;

$V_{\text{уч}}$ — участковая скорость, км/ч;

$L_{\text{бп}}, L_{\text{пер}}$ — вагонное плечо для транзитных вагонов, следующих через технические станции, без переработки и с переработкой соответственно, км;

$t_{\text{бп}}, t_{\text{пер}}$ — время нахождения транзитных вагонов на технических станциях без переработки и с переработкой соответственно, ч;

$t_{\text{гр}}$ — время нахождения вагона в местном простое за время оборота, ч.

$$\vartheta = \frac{1}{24} \left(\frac{l_o}{V_{\text{уч}}} + k_{\text{бп}} t_{\text{бп}} + k_{\text{пер}} t_{\text{пер}} + t_{\text{гр}} \right), \quad (2)$$

где $k_{\text{бп}} = \frac{l_o}{L_{\text{бп}}}$ — число технических станций, проходимых транзитными вагонами без переработки за время оборота;

$k_{\text{пер}} = \frac{l_o}{L_{\text{пер}}}$ — число технических станций, проходимых транзитными вагонами с переработкой за время оборота.

Используются и другие формулы определения значения ϑ , например, с разделением величины $\frac{l_o}{V_{\text{уч}}}$ на время нахождения вагонов в поездах в движении и в простое на промежуточных станциях [3]. При этом данные о времени нахождения транзитных вагонов на технических станциях не всегда дополнительно подразделяются по критериям «без переработки» вагонов и «с переработкой». Согласно рис. 1 этот показатель суммарно составил 35,4% в 2024 г.⁴ и 28,9% — в 2025 г.⁵ Структура ϑ по четырем элементам (в движении, на промежуточных станциях, под грузовыми операциями, на технических станциях) приведена в работе [4].

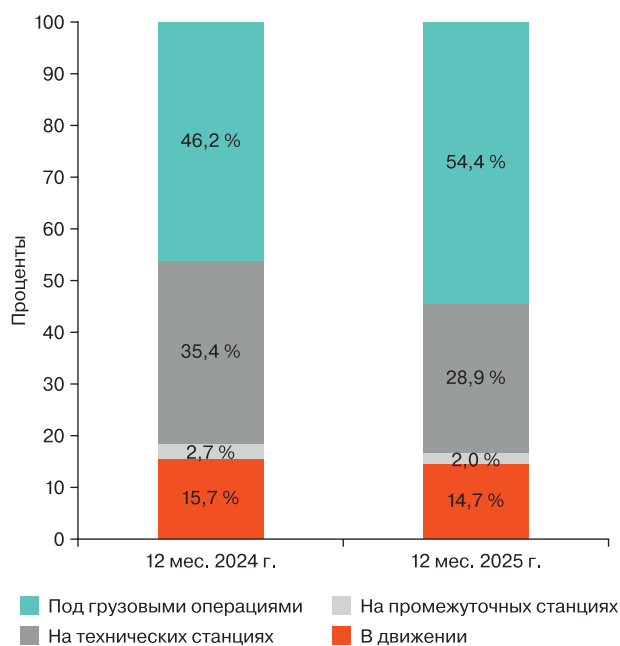


Рис. 1. Структура оборота вагона с разложением по элементам за 12 месяцев 2024 и 2025 гг. соответственно, %*

* Источник: СОЖТ (Союз операторов железнодорожного транспорта)^{6, 7}

Fig. 1. Wagon turnover structure with decomposition into elements for 12 months of 2024 and 2025 respectively, %*

* Source: Union of Railway Operators Market

¹ Большая энциклопедия транспорта. Т. 4. Железнодорожный транспорт / гл. ред. Н. С. Конарев. М.: Большая российская энциклопедия, 2003. 1039 с.

² Повороженко В. В. Оборота вагонов и пути его ускорения. М.: Трансжелдориздат, 1950. 108 с.

³ Повороженко В. В. Ускорение оборота вагонов. М.: Трансжелдориздат, 1955. 248 с.

⁴ СОЖТ (Союз операторов железнодорожного транспорта) — Обзор работы грузового железнодорожного транспорта за 12 месяцев 2024 г. URL: <https://railsovet.ru/upload/iblock/96d/s12g1snqldt94ejxaq7aqay27x2wm7hy.pdf> (дата обращения: 14.04.2026).

⁵ СОЖТ (Союз операторов железнодорожного транспорта) — Обзор работы грузового железнодорожного транспорта за 12 месяцев 2025 г. URL: <https://railsovet.ru/upload/iblock/027/4dkvohxvjklcfw5oj68204qfkgzqkd.pdf> (дата обращения: 14.04.2026).

⁶ СОЖТ (Союз операторов железнодорожного транспорта) — Обзор работы грузового железнодорожного транспорта за 12 месяцев 2024 г.

⁷ СОЖТ (Союз операторов железнодорожного транспорта) — Обзор работы грузового железнодорожного транспорта за 12 месяцев 2025 г.

Составляющая простая вагона в поездах на промежуточных станциях равна всего 2–3% от значения ϑ [3] и при расчетах для крупных полигонов сети или сети в целом изменяется незначительно [4].

Изменения ϑ в зависимости от изменения длины вагонного плеча для транзитных вагонов с переработкой могут достигать при сравнении за длительные периоды времени более 17% от общего значения ϑ . Возможен также и рост длины вагонного плеча для транзитных вагонов без переработки.

Все вышеперечисленное говорит о необходимости раздельного учета в элементах ϑ расчетных показателей для транзитных вагонов с переработкой и без переработки. По этим соображениям в настоящих расчетах для анализа ϑ используются формулы (1) и (2).

Изменение каждого из расчетных параметров влияет на изменение времени оборота вагона в целом. Если в периоды T_1 и T_2 изменяется только один расчетный параметр, например, l_o (на величину $\pm\Delta l_o$) или $V_{уч}$ (на $\pm\Delta V_{уч}$), то изменение именно этого расчетного параметра определяет изменение и времени оборота вагона ϑ на величину $\pm\Delta\vartheta$. Однако, как правило, в разные периоды времени значения большинства или даже всех расчетных параметров принимают различные значения. Следовательно, при оценке влияния изменения каждого из расчетных параметров, т. е. Δl_o , $\Delta V_{уч}$, $\Delta L_{бп}$, $\Delta t_{бп}$, $\Delta L_{пер}$, $\Delta t_{пер}$, $\Delta t_{гр}$, на изменение времени оборота вагона в целом, т. е. $\Delta\vartheta$, следует учитывать фактор одновременного изменения во времени этих значений.

При оценке величины ϑ следует обязательно учитывать изменения в системе статистической отчетности по этому качественному показателю [5], введенные на отечественных железных дорогах в 1998 г. и в 2010 г. В 1998 г. в величину ϑ стали включать вагоны так называемого оперативного резерва, а в 2010 г. — вагоны, относившиеся к забалансовому учету [4]. Это привело в целом к увеличению значения ϑ на 8,15 сут, что говорит о необходимости приводить значение ϑ к системе учета, действующей с 2010 г. Неучет этого важного фактора может приводить к неправильным оценкам. Так, в [6] при выполнении сравнительного анализа значения ϑ в СССР и США в 1951–1985 гг. величина ϑ , согласно отчетности, на железных дорогах СССР составляла 7,5–6,7 сут, в то время как на железных дорогах США этот показатель был около 20 сут. Между тем приведенные значения ϑ на железных дорогах СССР составляли 15,65–14,85 сут. Разрыв значений ϑ в СССР и США, как видно, был незначительным.

Выполненный обзор говорит о необходимости совершенствования методов анализа изменения величины времени оборота вагона. Необходима разработка методического обоснования для выполнения сравнения значений ϑ в разные периоды на основании отчетных данных об изменении фактических величин

основных расчетных параметров в (1), что позволит более правильно устанавливать меры по ускорению оборота вагона с целью снижения потребного парка вагонов и повышения качества перевозочного процесса.

Материалы и методы. Предложена следующая методика решения поставленной выше задачи.

Формулы (1) и (2) можно представить в виде четырех составляющих времени оборота вагона ϑ согласно формуле (3):

$$\vartheta = \frac{1}{24} (\vartheta_{уч} + \vartheta_{бп} + \vartheta_{пер} + \vartheta_{гр}), \quad (3)$$

где $\vartheta_{уч}$ — доля времени нахождения вагона за время оборота на участках в поездах, ч;

$\vartheta_{бп}$ — на технических станциях без переработки, ч;

$\vartheta_{пер}$ — с переработкой, ч;

$\vartheta_{гр}$ — в местном простое, ч.

В формуле (3)

$$\vartheta_{уч} = \frac{l_o}{V_{уч}}, \quad (4)$$

$$\vartheta_{бп} = \frac{l_o}{L_{бп}} t_{бп}, \quad (5)$$

или

$$\vartheta_{бп} = k_{бп} t_{бп}, \quad (6)$$

$$\vartheta_{пер} = \frac{l_o}{L_{пер}} t_{пер}, \quad (7)$$

или

$$\vartheta_{пер} = k_{пер} t_{пер}, \quad (8)$$

$$\vartheta_{гр} = t_{гр}. \quad (9)$$

Понятно, что и изменение времени оборота вагона в периоды времени T_1 и T_2 — $\Delta\vartheta_{1,2}$ равно сумме изменений значений составляющих формулы (3):

$$\Delta\vartheta_{1,2} = \Delta\vartheta_{уч\ 1,2} + \Delta\vartheta_{бп\ 1,2} + \Delta\vartheta_{пер\ 1,2} + \Delta\vartheta_{гр\ 1,2}, \quad (10)$$

где $\Delta\vartheta_{уч\ 1,2}$, $\Delta\vartheta_{бп\ 1,2}$, $\Delta\vartheta_{пер\ 1,2}$, $\Delta\vartheta_{гр\ 1,2}$ — изменения значений составляющих ϑ в периоды времени T_1 и T_2 , определяемые в эти периоды согласно формулам (4), (5), (7), (9), сут.

Если определить влияние изменения каждого из расчетных параметров на величины $\Delta\vartheta_{уч\ 1,2}$, $\Delta\vartheta_{бп\ 1,2}$, $\Delta\vartheta_{пер\ 1,2}$, $\Delta\vartheta_{гр\ 1,2}$, то на основе формулы (10) можно рассчитать и влияние изменения расчетных параметров на полное время оборота вагона ϑ . Рассмотрим решение данной задачи последовательно, начиная с $\Delta\vartheta_{уч\ 1,2}$ с учетом зависимости $\vartheta_{уч}$ от расчетных параметров согласно формуле (4).

Значение $\Delta\vartheta_{уч\ 1,2}$ определяется по изменяющимся расчетным параметрам l_o и $V_{уч}$ в сравниваемые периоды

времени T_1 и T_2 на основе формулы (4) из зависимости (11):

$$\Delta\vartheta_{\text{уч } 1,2} = \frac{1}{24} \left(\frac{l_{o2}}{V_{\text{уч } 2}} - \frac{l_{o1}}{V_{\text{уч } 1}} \right), \quad (11)$$

где l_{o2}, l_{o1} — значения полного рейса вагона в периоды времени T_2 и T_1 , км;

$V_{\text{уч } 2}, V_{\text{уч } 1}$ — значение участковой скорости в периоды времени T_2 и T_1 , км/ч.

Для определения доли влияния расчетных параметров l_o и $V_{\text{уч}}$ на значение $\Delta\vartheta_{\text{уч } 1,2}$ используем их средние значения $\overline{l_{o1,2}}$ и $\overline{V_{\text{уч } 1,2}}$ и разности значений $\Delta l_{o1,2}$, $\Delta V_{\text{уч } 1,2}$, при этом:

$$\left. \begin{aligned} \overline{l_{o1,2}} &= \frac{1}{2} (l_{o1} + l_{o2}), \\ \overline{V_{\text{уч } 1,2}} &= \frac{1}{2} (V_{\text{уч } 1} + V_{\text{уч } 2}), \\ \Delta l_{o1,2} &= l_{o2} - l_{o1}, \\ \Delta V_{\text{уч } 1,2} &= V_{\text{уч } 2} - V_{\text{уч } 1}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Из этого следует, что

$$\left. \begin{aligned} l_{o1} &= \overline{l_{o1,2}} - \frac{1}{2} \Delta l_{o1,2}, \\ l_{o2} &= \overline{l_{o1,2}} + \frac{1}{2} \Delta l_{o1,2}, \\ V_{\text{уч } 1} &= \overline{V_{\text{уч } 1,2}} - \frac{1}{2} \Delta V_{\text{уч } 1,2}, \\ V_{\text{уч } 2} &= \overline{V_{\text{уч } 1,2}} + \frac{1}{2} \Delta V_{\text{уч } 1,2}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

После алгебраических преобразований формул (13) получаем

$$\left. \begin{aligned} l_{o1} &= \overline{l_{o1,2}} \left(1 - \frac{\Delta l_{o1,2}}{2\overline{l_{o1,2}}} \right), \\ l_{o2} &= \overline{l_{o1,2}} \left(1 + \frac{\Delta l_{o1,2}}{2\overline{l_{o1,2}}} \right), \\ V_{\text{уч } 1} &= \overline{V_{\text{уч } 1,2}} \left(1 - \frac{\Delta V_{\text{уч } 1,2}}{2\overline{V_{\text{уч } 1,2}}} \right), \\ V_{\text{уч } 2} &= \overline{V_{\text{уч } 1,2}} \left(1 + \frac{\Delta V_{\text{уч } 1,2}}{2\overline{V_{\text{уч } 1,2}}} \right). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Подставив значения $l_{o1}, l_{o2}, V_{\text{уч } 1}$ и $V_{\text{уч } 2}$ из (14) в выражение (11) и выполнив алгебраические преобразования, получим исходную формулу, которую можно использовать для оценки влияния изменения расчетных параметров l_o и $V_{\text{уч}}$ и на изменение времени оборота вагона (в движении и на промежуточных станциях):

$$\Delta\vartheta_{\text{уч } 1,2} = \frac{\overline{l_{o1,2}}}{\overline{V_{\text{уч } 1,2}} \left(1 - \left(\frac{\Delta V_{\text{уч } 1,2}}{2\overline{V_{\text{уч } 1,2}}} \right)^2 \right)} \left(\frac{\Delta l_{o1,2}}{\overline{l_{o1,2}}} - \frac{\Delta V_{\text{уч } 1,2}}{\overline{V_{\text{уч } 1,2}}} \right). \quad (15)$$

Как правило, $\Delta V_{\text{уч } 1,2} \ll \overline{V_{\text{уч } 1,2}}$, поэтому в формуле (15)

$$\left(\frac{\Delta V_{\text{уч } 1,2}}{2\overline{V_{\text{уч } 1,2}}} \right)^2 \ll 1. \quad (16)$$

Например, расчеты показали, что при погодном анализе изменения ϑ рассчитываемая в формуле (16) величина составляет, в том числе и для других расчетных параметров, менее 0,01–0,02. Такую точность следует признать допустимой.

Это позволяет упростить формулу (15), преобразуя ее в следующий вид, удобный для практического использования при выполнении сравнительных анализов определения влияния различных расчетных параметров на изменение времени оборота вагона в сравниваемые периоды времени:

$$\Delta\vartheta_{\text{уч } 1,2} = \frac{\Delta l_{o1,2}}{\overline{V_{\text{уч } 1,2}}} - \frac{\overline{l_{o1,2}} \Delta V_{\text{уч } 1,2}}{(\overline{V_{\text{уч } 1,2}})^2}. \quad (17)$$

Первая составляющая формулы (17) представляет влияние изменения $\Delta l_{o1,2}$, а вторая — влияние изменения $\Delta V_{\text{уч } 1,2}$ в рассматриваемые периоды времени T_1 и T_2 .

В частности, анализ изменения ϑ за длительный период, начиная с 1995 г., в том числе включая период со времени образования ОАО «РЖД» (2003 г.), по 2024 г., показал, что до 2010 г. величина ϑ носила стабильный характер с тенденцией снижения примерно на 0,14 сут/г (рис. 2).

Это создавало благоприятные условия работы для всех участников перевозочного процесса. Однако после 2010 г. показатель времени оборота вагона демонстрирует существенные колебания с общей тенденцией к росту, причем его значение возросло с 13,44 до 20,75 сут в 2024 г., т. е. в 1,5 раза, что вызвало увеличение потребного вагонного парка более чем на 350 тыс. вагонов, избыточную загрузку станционных путей ПОП и ППП и значительные затруднения в организации перевозочного процесса [7–9]. С использованием формулы (17) становится возможным определить доли влияния расчетных параметров l_o и $V_{\text{уч}}$ и на рост ϑ за период с 2010 г. (T_1) по 2024 г. (T_2). В табл. 1 приведены исходные данные (на основе статистических материалов и зависимостей) для выполнения расчетов (12).

Очевидно, что доля времени оборота вагона на участках возросла как за счет увеличения полного рейса вагона, так и за счет снижения участковой скорости. На основании формулы (17) и анализа статистических данных определено, что увеличение полного рейса на 606 км соответствует ~58,7% в итоговой величине общего роста оборота вагона. Это составляет 15,8 ч при общем увеличении на 26,9 ч. Это важный результат для выполнения дальнейшего анализа влияния изменения расчетных параметров на изменение времени оборота

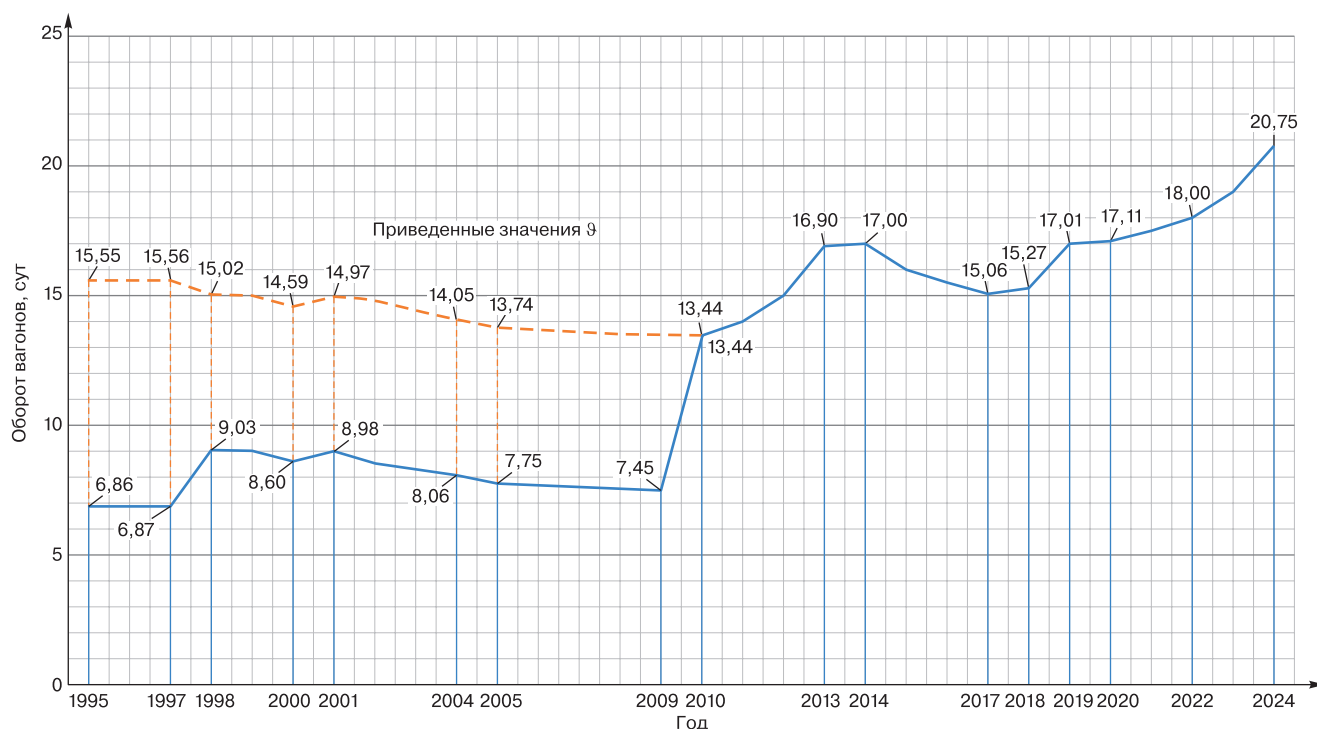


Рис. 2. Изменение времени оборота вагона за период 1995–2024 гг.*:

— значения согласно официальной отчетности МПС России до 2002 г. и ОАО «РЖД» с 2003 г.;
 - - - значения, приведенные к системе учета, действующей с 2010 г. по настоящее время (с учетом изменений в 1998 г. и 2010 г.)
 * Источник: данные авторов

Fig. 2. Change of wagon turnover time for 1995–2024*:

— values according to the official reports of the Ministry of Transport of Russia until 2002 and JSC “Russian Railways” since 2003;
 - - - values reduced to the accounting system in force from 2010 to the present (with the changes in 1998 and 2010)
 * Source: authors’ data

Исходные данные для выполнения расчетов влияния ΔI_o и $\Delta V_{уч}$ на $\Delta \vartheta_{уч}$ *

Initial data for calculation of the effect of ΔI_o and $\Delta V_{уч}$ on $\Delta \vartheta_{уч}$ *

Показатели	Значения исходных данных	
	2010 (T_1)	2024 (T_2)
Длина полного рейса вагона l_o , км	2671	3277
Участковая скорость $V_{уч}$, км/ч	41,2	35,7
Время нахождения вагона за время оборота, в составах поездов в движении $\vartheta_{уч}$, ч	64,9	91,8
Изменение полного рейса вагона $\Delta I_{o,1,2}$, км	+606	
Изменение участковой скорости $\Delta V_{уч,1,2}$, км/ч	-5,5	
Изменение оборота вагона $\Delta \vartheta_{уч,1,2}$, ч	+26,9	
Среднее значение расстояния полного рейса $\overline{l_{o,1,2}}$, км	2974	
Среднее значение участковой скорости $\overline{V_{уч,1,2}}$, км/ч	38,45	

* Источник: данные авторов
 * Source: authors’ data

Таблица 1

Table 1

вагона, поскольку позволяет оценивать такое влияние расчетных параметров на изменение потребного вагонного парка при выполнении перевозочной работы.

Рассмотрим теперь условия решения задачи для расчетных параметров, входящих во вторую составляющую формулы (1) — l_o (в части времени нахождения вагона на технических станциях без переработки), $L_{бп}$ и $t_{бп}$. В формуле (1) используется три расчетных параметра, однако в формуле (2) они сведены к двум.

Используя для дальнейших расчетов формулу (2) с параметрами $k_{бп}$ и $t_{бп}$ и способ определения $\Delta \vartheta_{бп,1,2}$, подобный использованному для определения $\Delta \vartheta_{уч,1,2}$, получим

$$\Delta \vartheta_{бп,1,2} = k_{бп2} t_{бп2} - k_{бп1} t_{бп1} \quad (18)$$

После алгебраических преобразований (зависимости (12)–(14)) получаем для формулы (2)

$$\Delta \vartheta_{бп,1,2} = \overline{t_{бп,1,2}} \Delta k_{бп,1,2} + \overline{k_{бп,1,2}} \Delta t_{бп,1,2} \quad (19)$$

Определяя значения $\Delta k_{бп,1,2}$ и $\overline{k_{бп,1,2}}$ с использованием l_o и $t_{бп}$ после преобразований, получаем удобную для практических расчетов зависимость, на основании

которой возможно определять влияние $\Delta l_{o,1,2}$, $\Delta L_{\text{бп},1,2}$ и $\Delta t_{\text{бп},1,2}$ на $\Delta \vartheta_{\text{бп},1,2}$:

$$\Delta \vartheta_{\text{бп},1,2} = \frac{\Delta l_{o,1,2} \overline{t_{\text{бп},1,2}}}{L_{\text{бп},1,2}} - \frac{\overline{l_{o,1,2}} \Delta L_{\text{бп},1,2} \overline{t_{\text{бп},1,2}}}{(L_{\text{бп},1,2})^2} + \frac{\overline{l_{o,1,2}} \Delta t_{\text{бп},1,2}}{L_{\text{бп},1,2}} \quad (20)$$

Здесь первая составляющая определяет влияние $\Delta l_{o,1,2}$, вторая — $\Delta L_{\text{бп},1,2}$, третья — $\Delta t_{\text{бп},1,2}$. Для определения влияния изменения доли оборота вагона, приходящегося на время нахождения на технических станциях транзитных вагонов с переработкой, формула имеет аналогичный вид:

$$\Delta \vartheta_{\text{пер},1,2} = \frac{\Delta l_{o,1,2} \overline{t_{\text{пер},1,2}}}{L_{\text{пер},1,2}} - \frac{\overline{l_{o,1,2}} \Delta L_{\text{пер},1,2} \overline{t_{\text{пер},1,2}}}{(L_{\text{пер},1,2})^2} + \frac{\overline{l_{o,1,2}} \Delta t_{\text{пер},1,2}}{L_{\text{пер},1,2}} \quad (21)$$

Общее влияние $\Delta l_{o,1,2}$ на изменение времени оборота вагона в периоды времени T_1 и T_2 определяется суммированием значений их составляющих в формулах (17), (20) и (21):

$$\Delta \vartheta_{l_{o,1,2}} = \Delta \vartheta_{l_{o,уч},1,2} + \vartheta_{l_{o,бп},1,2} + \Delta \vartheta_{l_{o,пер},1,2}, \quad (22)$$

где $\vartheta_{l_{o,уч},1,2}$ равно значению первой составляющей в формуле (17), $\vartheta_{l_{o,бп},1,2}$ — первой составляющей в (20), $\vartheta_{l_{o,пер},1,2}$ — первой составляющей в (21).

Изменение времени оборота вагона $\Delta \vartheta_{уч},1,2$ в зависимости от времени простоя местных вагонов равно:

$$\Delta \vartheta_{\text{тр},1,2} = \Delta t_{\text{тр},1,2}, \quad (23)$$

где $\Delta t_{\text{тр},1,2}$ — изменение времени нахождения вагонов в местном простое в периоды T_1 и T_2 .

Таким образом, с использованием формул (17), (20)–(23) можно определить влияние на величину $\Delta \vartheta_{\text{тр},1,2}$ каждого расчетного параметра в формуле (1) — l_o , $V_{уч}$, $L_{\text{бп}}$, $t_{\text{бп}}$, $L_{\text{пер}}$, $t_{\text{пер}}$, $t_{\text{тр}}$.

Результаты. Выполнены расчеты для рассматриваемого периода работы сети железных дорог в 2010–2024 гг., характеризуемого как период со значительными колебаниями значений ϑ с общей тенденцией существенного возрастания. За указанный период значение ϑ увеличилось на 175 ч, l_o — на 606 км, $V_{уч}$ снизилась на 5,5 км/ч, $t_{\text{бп}}$ возросло на 3,68 ч, $L_{\text{пер}}$ — на 342 км, $t_{\text{тр}}$ — на 77,3 ч. Величина $L_{\text{бп}}$ изменилась несущественно вследствие ее зависимости от расстояния, проходимого поездами за основное время работы локомотивной бригады, которое за указанный период практически не увеличилось. В расчетах использовались также данные из [10]. Результаты расчетов на основе установленных зависимостей (12)–(14) представлены в табл. 2.

Определение влияния каждого расчетного параметра на изменение ϑ позволяет лучше понять характер их воздействия на время оборота вагона, поскольку обеспечивается переход от определения изменения ϑ по месту дислокации вагона за время оборота (на участках дороги, на технических станциях без переработки и с переработкой, в местном простое) непосредственно к факторам воздействия, представленным расчетными параметрами. При этом вместо (10) используется следующая зависимость:

$$\Delta \vartheta_{1,2} = \Delta \vartheta_{l_{o,1,2}} + \Delta \vartheta_{V_{уч},1,2} + \Delta \vartheta_{L_{\text{бп},1,2}} + \Delta \vartheta_{t_{\text{бп},1,2}} + \Delta \vartheta_{L_{\text{пер},1,2}} + \Delta \vartheta_{t_{\text{пер},1,2}} + \Delta \vartheta_{t_{\text{тр},1,2}}, \quad (24)$$

Таблица 2

Изменение ϑ по составляющим и расчетным параметрам за период 2010–2024 гг.*

Table 2

Change of ϑ as per components and calculated parameters for 2010–2024*

Изменение ϑ по составляющим $\Delta \vartheta$ в (3)		Изменение ϑ по расчетным параметрам за период 2010–2024 гг., абсолютные значения, ч; доля в %**						
$\Delta \vartheta$	Всего, ч	l_o , ч	$V_{уч}$, ч	$L_{\text{бп}}$, ч	$t_{\text{бп}}$, ч	$L_{\text{пер}}$, ч	$t_{\text{пер}}$, ч	$t_{\text{тр}}$, ч
$\Delta \vartheta_{уч}$	+26,9	+15,8	+11,1	—	—	—	—	—
$\Delta \vartheta_{\text{бп}}$	+55,0	+12,4	—	–0,1	+42,7	—	—	—
$\Delta \vartheta_{\text{пер}}$	+16,6	+15,6	—	—	—	–30,1	+31,1	—
$\Delta \vartheta_{\text{тр}}$	+77,3	—	—	—	—	—	—	+77,3
Всего $\Delta \vartheta$	+175,8/100	+43,8/+24,9	+11,1/+6,3	–0,1/–0,1	+42,7/+24,3	–30,1/–17,1	+31,1/+17,7	+77,3/+44,0

* Источник: данные авторов; [10]

** для всех показателей индексы расчетных периодов (10, 24) не указываются с целью упрощения таблицы

* Source: authors' data; [10]

** the indices of the calculation periods (10, 24) for all parameters are not indicated in order to simplify the table

где каждая составляющая определяет изменение ϑ в зависимости от изменения соответствующего расчетного параметра за период времени ΔT (10, 24) в соответствии с формулами (17), (20)–(23).

Анализ выполненных расчетов позволил получить ряд существенных результатов, для пояснения которых используются данные табл. 2:

1. Оценка степени влияния на ϑ полного рейса вагона l_o исключительно по данным о времени нахождения вагона на участках некорректна, поскольку при изменении l_o изменяется и время нахождения вагона на технических станциях. Отметим, что величина ϑ за счет роста l_o в целом увеличилась на 42,8 ч в период с 2010 по 2024 г. При этом доля, приходящаяся на время нахождения на участках, составляет всего 15,8 ч (36,1%). Между тем, имеются официальные рекомендации⁸ по использованию в анализах только фактора нахождения вагонов на участках.

2. Предложенная методика обеспечивает наиболее точную оценку влияния l_o на изменение ϑ , что позволяет оценить эту долю в 2010–2024 гг. в 24,9%. Между тем, влияние величины l_o на изменение времени оборота вагона, как правило, преувеличивается. Из этого следует вывод, что значительный рост времени оборота вагона за рассматриваемый период (на 175 ч, что соответствует увеличению в 1,5 раза) является следствием внешней объективной причины, на которую невозможно воздействовать структурам управления ПОП и ПНП, то есть на дальность перевозок грузов и, соответственно, l_o . Однако, доля этой внешней причины, согласно табл. 2, составляет только 24,8%. Следовательно, причинами роста ϑ , и, как следствие, увеличения потребного вагонного парка более чем на 350 тыс. вагонов с избыточной загрузкой станционных путей и вызываемых этим значительных затруднений в работе сети ПОП и ПНП являются в основном внутренние факторы, на которые можно и необходимо воздействовать, и это прежде всего множественность операторов подвижного состава [11].

3. Появляется возможность ранжирования расчетных параметров по степени их влияния на изменение ϑ . Это позволяет определять значимость различных мер по повышению качества перевозочного процесса на основе мероприятий по ускорению оборота вагона. Например, рейтинг влияния расчетных параметров на ϑ за период 2010–2024 гг. представлен в табл. 3.

Из данного рейтинга следует, что разрабатываемые меры по снижению потребного парка вагонов должны быть направлены прежде всего на снижение простоя местного вагона $t_{гр}$ и простоя вагона на технических станциях $t_{бп}$ и $t_{пер}$. Установлено, что высокий эффект

Таблица 3

Рейтинг расчетных параметров по влиянию на увеличение времени оборота вагона за период 2010–2024 гг.*

Table 3

Rating of calculated parameters according to the impact on the increase in wagon turnover time for 2010–2024*

Показатели	Расчетные параметры						
	$t_{гр}$	l_o	$t_{бп}$	$t_{пер}$	$L_{пер}$	$V_{уч}$	$L_{бп}$
Доля параметра по влиянию на увеличение ϑ , от max к min, %	+44,0	+24,9	+24,3	+17,7	-17,1	+6,3	-0,1

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

был получен от воздействия управляющих структур ПОП и ПНП на величину вагонного плеча транзитных вагонов с переработкой ($L_{пер} = +342$ км), что обеспечило в 2010–2024 гг. снижение ϑ на 17,1%. Это позволило снизить потребный вагонный парк $\Delta P_{рп}$ в 2024 г. по сравнению с 2010 г. [12–13] на

$$\Delta P_{рп} = \frac{1}{24} \Delta \vartheta_{10,24} U_{погр24} = 65331 \text{ вагон,}$$

где $U_{погр24}$ — среднесуточная погрузка вагонов на сети железных дорог в 2024 г.

4. Полученные результаты по влиянию расчетных параметров на изменение ϑ согласно (24) являются исходными для установления основных причин замедления оборота вагона. Такими причинами могут являться: изменение системы владения вагонным парком с переходом к множественности операторов, что вызвало дополнительную маневровую работу и увеличение различного рода простоев вагона; рост загрузки отдельных полигонов сети в связи с изменением направления следования грузопотоков; недостатки в работе структур управления ПОП и ПНП по организации продвижения поездо- и вагонопотоков; изменение времени задержек поездов на участках, расположенных на подходах к техническим и грузовым станциям, и т.д. Полученные результаты указывают на элементы перевозочного процесса, требующие наибольшего внимания, что отражает рейтинг расчетных параметров.

Обсуждение и заключение. Используемая в настоящее время методика оценки изменения времени оборота вагона в периоды времени T_1 и T_2 — $\Delta \vartheta_{1,2}$ по местам дислокации вагона за период оборота (на участках,

⁸ Методические указания по расчету показателя оборота грузового вагона и оценке влияющих на него внешних факторов: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 30 сентября 2019 г. № 2155/р. П. 6.1.

технических станциях, ПОП и ПНП, в местном простом) не позволяет правильно определить влияние на величину $\Delta\vartheta_{1,2}$ основных расчетных параметров (I_o , $V_{уч}$ и др.), используемых при определении значений ϑ_1 и ϑ_2 . Разработанная методика позволяет на основе известных статистических отчетных данных определять такое влияние. В период работы сети железных дорог до 2010 г. величина ϑ имела стабильный характер с общей тенденцией некоторого снижения, что говорит об устойчивом ходе перевозочного процесса. Однако после 2010 г. она стала подвергаться значительным колебаниям, ход перевозочного процесса стал неустойчивым. С использованием разработанной методики выполнены расчеты по определению влияния каждого расчетного параметра на изменение ϑ за период 2010–2024 гг., что позволило получить ряд практически важных результатов.

Установлено, что использование для оценки влияния на время оборота вагона данных о дальности перевозки грузов (полного рейса вагона), определенных исключительно по величинам времени нахождения вагонов на участках, приводит к существенным ошибкам. Обязательным является учет времени нахождения вагонов на технических станциях за время полного рейса, что при изменении величины I_o является следствием изменения количества технических станций, проходимых вагоном за оборот.

Часто используемая оценка значительности влияния роста $I_{гр}$ — дальности перевозок грузов — на увеличение потребного вагонного парка не соответствует действительности и фактически составила за период 2010–2024 гг. менее 25 %.

Таким образом, разработанные теоретические положения по влиянию расчетных параметров на изменение времени оборота вагона обеспечивают получение важных практических результатов.

Предложенная методика обеспечивает выполнение ранжирования расчетных параметров от максимального к минимальному уровню их влияния на изменение времени оборота вагона. Это позволяет более правильно разрабатывать систему мер по ускорению оборота вагона с целью снижения потребного парка вагонов и повышения качества перевозочного процесса.

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

Acknowledgements: 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. Шенфельд К. П. О значении показателя «оборот вагона» в современных условиях // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2008. № 6. С. 10–12. EDN: <https://elibrary.ru/kxsoch>.
2. Shenfeld K. P. On importance of “car turnout” index under contemporary conditions. *Russian Railway Science Journal*. 2008;(6):10–12. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/kxsoch>.
3. Сотников Е. А. Эксплуатационная работа железных дорог (состояние, проблемы, перспективы). М.: Транспорт, 1986. 256 с. EDN: <https://elibrary.ru/tzjijt>.
4. Sotnikov E. A. *Operational work of railways (condition, problems, perspectives)*. Moscow: Transport; 1986. 256 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tzjijt>.
5. Хусайнов Ф. И. Рынок железнодорожных грузовых перевозок в 2023 г. // Экономика железных дорог. 2024. № 3. С. 54–79. EDN: <https://elibrary.ru/ogzczn>.
6. Khusainov F. I. Rail freight market in 2023. *Railway Economics*. 2024;(3):54–79. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ogzczn>.
7. Хусайнов Ф. И. Рынок железнодорожных грузовых перевозок в 2024 г. // Экономика железных дорог. 2025. № 3. С. 111–139. EDN: <https://elibrary.ru/sfyotk>.
8. Khusainov F. I. The railway freight transportation market in 2024. *Railway Economics*. 2025;(3):111–139. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/sfyotk>.
9. Филипченко С. А. Новые методы учета парка грузовых вагонов и расчета оборота вагона // Железнодорожный транспорт. 2010. № 4. С. 67–70. EDN: <https://elibrary.ru/oyyhnh>.
10. Filipchenko S. A. New methods of accounting for the fleet of wagons and calculating the turnover of the wagon. *Railway Transport*. 2010;(4):67–70. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/oyyhnh>.
11. Потылкин Е. Н. Оборот вагона в условиях множественности операторов подвижного состава // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. 2020. № 1 (2). С. 126–130. EDN: <https://elibrary.ru/fgoewt>.
12. Potylkin E. N. Wagon turnover under the conditions of multiple operators of rolling stock. *Problems of railway stations and junctions perspective development*. 2020;(1(2)):126–130. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/fgoewt>.
13. Москвичев О. В., Куприянова Е. А. Оценка влияния избыточности рабочего парка вагонов на качество работы железнодорожной сети // Наука и образование транспорту. 2024. № 1. С. 112–115. EDN: <https://elibrary.ru/imwfdy>.
14. Moskvichev O. V., Kupriyanova E. A. Assessment of the impact of redundancy of the working fleet of wagons on the quality of the railway network. *Science and Education for Transport*. 2024;(1):112–115. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/imwfdy>.
15. Выдашенко Л. А. Исследование проблемы избыточного парка собственных вагонов на сети РЖД // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12, № 1. С. 138–144. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/122>. EDN: <https://elibrary.ru/moldnr>.
16. Vydashenko L. A. Study of the problem of an excessive fleet of owned cars on the Russian Railways network. *Bulletin of Science and Practice*. 2026;12(1):138–144. (In Russ.). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/122>. EDN: <https://elibrary.ru/moldnr>.
17. Бадалян П. А. О динамике и расчете потребного парка грузовых вагонов // Транспортное дело России. 2017. № 4. С. 74–76. EDN: <https://elibrary.ru/zqnnql>.
18. Badalyan P. A. About the dynamics and calculation of required fleet of freight cars. *Transport business in Russia*. 2017;(4):74–76. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/zqnnql>.

10. Бородин А. Ф., Николаев К. Ю., Шиндеров Р. В., Прозоров В. В. Организация вагонопотоков: условия, ограничения, цифровые решения // Железнодорожный транспорт. 2025. № 6. С. 11–19. EDN: <https://elibrary.ru/ppyttu>.

Borodin A. F., Nikolaev K. Yu., Shinderov R. V., Prozorov V. V. Carriage traffic management: conditions, restrictions, digital solutions. *Railway Transport*. 2025;(6):11–19. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ppyttu>.

11. Мехедов М. И., Власенский А. А., Сотников Е. А., Холодник П. С. Об организации перевозочной работы в условиях множественности операторов // Железнодорожный транспорт. 2025. № 6. С. 4–10. EDN: <https://elibrary.ru/owenup>.

Mekhedov M. I., Vlasenskiy A. A., Sotnikov E. A., Kholodnyak P. S. About the organisation of transportation work in conditions of a plurality of operators. *Railway Transport*. 2025;(6):4–10. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/owenup>.

12. Эсаулов В. А. О снижении рабочего парка вагонов // Железнодорожный транспорт. 2025. № 6. С. 20–22. EDN: <https://elibrary.ru/oxiwwt>.

Esaulov V. A. On reducing the working fleet of wagons. *Railway Transport*. 2025;(6):20–22. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/oxiwwt>.

13. Мачерет А. А. Экономическое значение ускорения оборота грузового вагона // Экономика железных дорог. 2014. № 11. С. 25–29. EDN: <https://elibrary.ru/sxmgpf>.

Macheret A. A. The economic importance of accelerating freight wagon turnover. *Railway Economics*. 2014;(11):25–29. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/sxmgpf>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Евгений Александрович СОТНИКОВ,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), Author ID: 493861, <https://orcid.org/0000-0003-0852-993X>

Израиль Аврумович ЯБКО,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НЦ «ЦМПЭ», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), SPIN-код: 7088-8651, <https://orcid.org/0009-0007-6672-2136>

Павел Сергеевич ХОЛОДНЯК,

начальник отдела, НЦ «ЦМПЭ», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), SPIN-код: 8895-0203, <https://orcid.org/0000-0002-5469-7419>

Екатерина Викторовна ПЧЕЛИНЦЕВА,

ведущий технолог, НЦ «Логистика», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), SPIN-код: 2077-9053, <https://orcid.org/0009-0004-9928-7343>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy A. SOTNIKOV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 493861, <https://orcid.org/0000-0003-0852-993X>

Israil A. YABKO,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), SPIN-code: 7088-8651, <https://orcid.org/0009-0007-6672-2136>

Pavel S. KHOLODNYAK,

Head of Department, Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), SPIN-code: 8895-0203, <https://orcid.org/0000-0002-5469-7419>

Ekaterina V. PCHELINTSEVA,

Leading Technologist, Economics Scientific Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), SPIN-code: 2077-9053, <https://orcid.org/0009-0004-9928-7343>

ВКЛАД АВТОРОВ

Евгений Александрович СОТНИКОВ. Обоснование необходимости использования расчетных параметров в анализе изменения времени оборота вагона в различные периоды времени. Написание статьи (40 %).

Израиль Аврумович ЯБКО. Разработка способа расчета влияния различных расчетных параметров на изменение времени оборота вагона в различные периоды времени с использованием известных статистических данных (20 %).

Павел Сергеевич ХОЛОДНЯК. Выбор периодов в работе сети железных дорог для проведения расчетов по определению влияния расчетных параметров на изменение времени оборота вагона (20 %).

Екатерина Викторовна ПЧЕЛИНЦЕВА. Анализ литературных источников, исследование взаимоотношения расчетных параметров и времени нахождения вагона на объектах за период оборота, проведение расчетов, написание статьи (20 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Evgeniy A. SOTNIKOV. Substantiation of the need to use calculated parameters in the analysis of wagon turnover time changes at various periods. Article writing (40 %).

Israil A. YABKO. Method development for calculating the effect of various design parameters on the change in wagon turnover time at various periods using known statistical data (20 %).

Pavel S. KHOLODNYAK. Railway network operation time period selection for calculations performance to determine the effect of calculated parameters on wagon turnover time change (20 %).

Ekaterina V. PCHELINTSEVA. Literature analysis, study of the relationships between location time period of wagon at side during turnover period, calculations performance, article writing (20 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 26.03.2026, рецензия от первого рецензента получена 03.04.2026, рецензия от второго рецензента получена 06.04.2026, принята к публикации 23.04.2026.

The article was submitted 26.03.2026, first review received 03.04.2026, second review received 06.04.2026, accepted for publication 23.04.2026.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Оригинальная научная статья
УДК 656.22: 519.872: 004.94
EDN: <https://elibrary.ru/krmjmj>
DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-111-122>
Научная специальность: 2.9.4. Управление процессами перевозок



Оценка эксплуатационных характеристик железнодорожной станции на Транссибирской магистрали с использованием имитационного моделирования

М. А. Власов¹, А. Л. Казаков^{1,2}, А. В. Супруновский¹✉

¹Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Российская Федерация

²Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН (ИДСТУ СО РАН), Иркутск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи с переориентацией ключевых грузопотоков России с европейского направления на азиатское, актуальной задачей является повышение пропускной способности Транссибирской и Байкало-Амурской магистралей, на которые возлагается наибольший объем перевозок в восточном направлении. Для решения этой задачи необходима комплексная оценка состояния объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта. Целью исследования является анализ эксплуатационных характеристик и определение максимальной пропускной способности железнодорожной станции, которая расположена на горно-перевальном участке Транссибирской магистрали и является ее лимитирующим элементом. Авторами предложен и применен оригинальный комплексный инструментальный для моделирования работы железнодорожной станции, позволяющий повысить достоверность результатов исследования.

Материалы и методы. В качестве основного инструмента исследования используется имитационное моделирование. Для повышения достоверности результатов применяется два альтернативных подхода: первый основан на использовании программного обеспечения AnyLogic, а второй — на теории массового обслуживания с разработкой авторского программно-алгоритмического аппарата.

Результаты. Построены две взаимодополняющие имитационные модели, с их помощью проведены вычислительные эксперименты, по результатам которых выполнен сценарный анализ работы станции, в том числе определены показатели эффективности при различных интервалах движения поездов.

Обсуждение и заключение. Установлено, что рассмотренная станция способна обеспечить пропуск поездопотока при интервале движения поездов от 11 мин и более. Для его уменьшения потребуется реконструкция станции. Показано, что для исследования работы железнодорожных станций можно использовать аппарат теории массового обслуживания, позволяющий сократить трудоемкость построения и анализа модели.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожная станция, имитационное моделирование, математическое моделирование, теория массового обслуживания, вычислительный эксперимент

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Власов М. А., Казаков А. Л., Супруновский А. В. Оценка эксплуатационных характеристик железнодорожной станции на Транссибирской магистрали с использованием имитационного моделирования // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2026. Т. 85, № 2. С. 111–122. EDN: <https://elibrary.ru/krmjmj>.



TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

Original article

UDK 656.22: 519.872: 004.94

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

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-111-122>

Scientific specialty: 2.9.4. Transportation process management



Operational characteristics of railway station located on the Trans-Siberian Railway using simulation modeling

Matvey A. Vlasov¹, Alexander L. Kazakov^{1,2}, Anton V. Suprunovsky¹✉

¹Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russian Federation

²Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the RAS,
Irkutsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Due to the redirection of key logistics flows in Russia to the East (Asia Pacific), increasing throughput capacity of the Trans-Siberian Railway is an urgent task. Addressing this challenge requires a comprehensive assessment of the state of railway transport infrastructure facilities. The aim of this study is to analyse the operational characteristics and determine the maximum throughput capacity of the railway station located in a mountain-pass section of the Trans-Siberian Railway, which acts as its bottleneck. The authors proposed and applied an original comprehensive tool for railway station operation modeling, which enables to increase the reliability of the research results.

Materials and methods. Simulation was employed as the main research tool. In order to enhance the reliability of the results, two alternative approaches were applied. The first is based on the use of AnyLogic software. The second relies on queuing theory, with the development of the authors' own software and algorithmic framework.

Results. Two complementary simulation models were developed and used to conduct computational experiments. Based on the results, a scenario analysis of the station operation was performed, including the determination of efficiency indicators for various headways.

Discussion and conclusion. It is established that the considered station is capable of handling train traffic with headways of 11 min or more. Station reconstruction would be required to reduce it. The queuing theory mathematical apparatus may be used to study railway stations operation, which reduces the complexity of model construction and analysis.

KEYWORDS: railway station, simulation, mathematical modeling, queueing theory, computational experiment

FOR CITATION: Vlasov M.A., Kazakov A.L., Suprunovsky A.V. Operational characteristics of railway station located on the Trans-Siberian Railway using simulation modeling. *Russian Railway Science Journal*. 2026;85(2):111–122. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-111-122>.

✉ as.irgups@gmail.com (A. V. Suprunovsky)

© Vlasov M. A., Kazakov A. L., Suprunovsky A. V., 2026

Введение. В настоящее время ключевые логистические потоки в Российской Федерации переориентированы с европейского направления на азиатское. Основными путями доставки грузов в страны Азиатско-Тихоокеанского региона являются Транссибирская и Байкало-Амурская магистрали, на сегодняшний день их загрузка приблизилась к максимальным значениям [1]. Для повышения пропускных и провозных способностей магистралей необходима комплексная оценка текущего состояния объектов железнодорожной инфраструктуры.

В современной научно-технической литературе анализ функционирования объектов транспортной инфраструктуры преимущественно базируется на методах имитационного моделирования [2–3]. Значительную роль в реализации методологических подходов играет применение общецелевых систем AnyLogic, Arena, Plant Simulation [4–5] и др., а также специализированного программного инструментария ИМЕТРА (имитационное моделирование единой транспортной работы), ИСТРА (имитационная система транспорта), ИСУЖТ (интеллектуальная система управления железнодорожным транспортом). Подобные системы позволяют решать широкий спектр прикладных задач, выполняя диагностику «узких» мест, оценку необходимости модернизации инфраструктуры, оптимизацию технологических операций и учет влияния случайных факторов [6–7].

Дать исчерпывающий обзор публикаций по данной тематике не представляется возможным. Отметим наиболее близкие к данному исследованию работы, в которых используются системы имитационного моделирования. Работа [8] посвящена созданию модели приграничной станции с оценкой ее загрузки, учитывающей операции перевалки грузов с автомобильного транспорта. В [9] рассмотрен выбор оптимальных маршрутов движения поездов и путей назначения. В [10–11] предложены модели участковых станций, которые детально воспроизводят характерные технологические операции (смену локомотивов, технический и коммерческий осмотры, отцепку вагонов), при этом одна из станций расположена на Байкало-Амурской магистрали (далее — БАМ). В работе [12] имитационное моделирование используется для оценки проектов по реконструкции путевого развития внутризаводских станций и перегонов.

При всех достоинствах программных комплексов, встречаются случаи, когда описание функционирования объектов транспортной инфраструктуры с их помощью выполнить проблематично или даже невозможно. Тогда для исследования необходимо разрабатывать оригинальный модельно-алгоритмический и программный инструментарий. Зачастую в качестве математического базиса здесь выступает теория массового

обслуживания (далее — ТМО), еще с 1960-х гг. применяющаяся в области железнодорожного транспорта [13]. Представим современные и близкие к данному исследованию работы.

Наиболее часто ТМО используется при исследовании железнодорожных станций и перегонов. В [14] представлена модель сортировочной станции, в [15–16] — грузовых станций с учетом особенностей работы сортировочных устройств и путей необщего пользования. В [17] проведено моделирование лимитирующих участков при организации пропуска поездопотоков по однопутным линиям. Данный аппарат также используется для анализа пропускной способности железнодорожных линий [18–19]. Отдельно стоит упомянуть работы авторов, в которых строятся и исследуются модели сортировочных станций и однопутного участка БАМ [20–22].

Целью данного исследования является оценка эксплуатационного состояния железнодорожной станции Большой Луг с использованием методов имитационного моделирования. Эта станция является ключевой на лимитирующем горно-перевальном участке Транссибирской магистрали (далее — Транссиб), где из-за крутого подъема для движения тяжеловесных поездов в гору используются подталкивающие локомотивы, что существенно усложняет технологию работы и не позволяет применять стандартные подходы.

Научная новизна исследования определяется тем, что, во-первых, модель AnyLogic построена для нового (чрезвычайно важного для Транссиба) транспортного объекта, который ранее в этой парадигме не рассматривался, при этом использован не только агентный [5], но и дискретно-событийный подход, что позволяет повысить эффективность моделирования движения транспортных потоков. Во-вторых, построены математическая и имитационная модели рассмотренной станции на основе ТМО, которые также обладают новизной за счет учета возможности перехода к диспетчерскому управлению посредством допущения отказа. Наконец, помимо описания инструментария, была проведена его апробация посредством комплексных расчетов, которые позволили оценить эффективность работы станции, в результате чего было получено близкое соответствие между результатами моделирования по разным методам, что косвенным образом свидетельствует об их надежности и достоверности.

Отметим, что ситуации, когда моделирование работы станции только одним стандартным способом не позволяет подтвердить достоверность результатов расчета вследствие невозможности оценить их адекватность, встречаются нередко. В таких случаях необходимо проводить сравнение с реальными данными, что не всегда доступно, либо выполнять моделирование при помощи двух или более (в особых случаях) различных подходов.

Объект исследования. Станция Большой Луг находится на Восточно-Сибирской железной дороге. По характеру работы она является промежуточной и предназначена для выполнения следующих операций: безостановочный пропуск всех категорий поездов, прием и отправление грузовых поездов, прицепка-отцепка подталкивающих локомотивов, технический и коммерческий осмотр вагонов, работа с местными вагонами, посадка-высадка пассажиров пригородных поездов.

Станция включает 3 главных пути — для приема пассажирских и пригородных поездов с возможным пропуском транзитных поездов, 6 приемоотправочных путей — для транзитных и грузовых поездов с последующей прицепкой подталкивающего локомотива, а также пути необщего пользования.

На станцию прибывают поезда с двух направлений, всего 120 пар/сут с интервалом в 12 мин. Поездоток с западного направления состоит на 75% из грузовых поездов с подталкиванием и на 25% — из транзитных без подталкивания. С восточного — обратное соотношение между поездами с подталкиванием и без. Согласно технологии работы станции и в соответствии с нормативным графиком движения поездов время движения поездов в горловинах станции T_1 составляет от 1 до 3 мин, время обработки с прицепкой (отцепкой) подталкивающего локомотива в головную часть состава T_2 — от 18 до 24 мин, в хвостовую часть T_3 — от 9 до 15 мин.

Материалы и методы. В рамках данного исследования для оценки работоспособности станции Большой Луг применяются два способа имитационного моделирования.

Первый способ основан на использовании среды разработки AnyLogic [4–5], которая обеспечивает возможность моделирования как на микроуровне с детализацией отдельных элементов станции, так и на макроуровне с агрегированием характерных свойств исследуемого объекта.

Второй способ основан на применении математического аппарата ТМО, а именно — сетей массового обслуживания (далее — СеМО), которые представляют собой совокупность конечного числа взаимодействующих систем массового обслуживания (далее — СМО, узлов) и являются эффективным аппаратом для анализа сложных транспортных систем [18–20].

Далее опишем общие предположения и допущения, которые используются при построении моделей двумя способами.

Для описания поездотока применяется детерминированная модель, отображающая минимально возможный межпоездной интервал при идеальных эксплуатационных условиях. Если в получаемой модели пропускная способность недостаточна при заданном интервале, то в реальности с неизбежными

отклонениями она будет ниже. Такой подход задает «потолок», на основании которого можно произвести оценку пропускной способности станции. Отметим также, что детерминированные модели применяются в современных исследованиях. В [23] при моделировании движения поездов на участке используются 8- и 5-минутные межпоездные интервалы. В [24] анализируются потоки пассажирских поездов в различных режимах движения.

При моделировании каждым из способов выделяются только те структурные элементы станции, которые непосредственно взаимодействуют с поездами. Для каждого из них учитываются вместимость, специализация и выполняемые технологические операции с поездами. В модели такого элемента отображается суммарная продолжительность всех выполняемых в нем операций как время обслуживания, которое имеет вид случайной величины. Ее параметры разыгрывания подбираются согласно технологическому процессу с учетом минимального и максимального допустимых значений. Это позволяет косвенно учесть не только всю последовательность операций, но и различные случайные факторы, в частности продолжительность времени на приготовление маршрута, разное время движения поезда в горловинах станции в зависимости от его категории, случайный промежуток времени между моментом замыкания стрелочных переводов в маршруте и моментом прохождения поезда по ним.

Модели отдельных элементов образуют иерархическую структуру, которая соответствует структуре станции и позволяет учесть последовательность операций, проходящих в разных элементах станции. В частности, интервал попутного прибытия учитывается в модели входящего потока, и он «наследуется» моделью, которая описывает движение прибывающего поезда по горловине. Аналогично интервал попутного отправления отображается косвенно, через модели, описывающие работу путей станции и движение отправляющегося поезда по горловине. Между элементами присутствуют обратные связи, которые имеют вид временной блокировки работы текущего элемента до тех пор, пока в следующем не освободится место.

Для описания особенностей обращения подталкивающих локомотивов необходимо комплексно рассмотреть работу всего участка Большой Луг — Слюдянка-1, что выходит за рамки данного исследования. Поэтому при моделировании работы станции Большой Луг применяются следующие допущения:

- технологические операции с толкачами, производимые непосредственно на рассматриваемой станции (маневры, прицепка и др.), описываются как время обслуживания;

- предполагается, что подталкивающие локомотивы всегда имеются в достаточном количестве на станции;

- время обращения толкачей и число действующих на участке единиц не учитываются.

Операции по пропуску поездов и подстановке толкачей выполняются на разных путях и в рамках одной модели описываются различными элементами. При этом неявно учитывается приоритет по пропуску транзитных поездов и поездов с подталкиванием за счет иерархической структуры имитационных моделей.

На участке Иркутск-Сортировочный – Слюдянка-1 нередко возникают нештатные ситуации, когда составы не могут быть приняты из-за занятости станции и требуется диспетчерское вмешательство. Наступление подобной ситуации не описывается в моделях явно, а опосредованно учитывается как отказ в обслуживании. В данном исследовании отказ означает выход за рамки применимости моделей. С точки зрения объекта исследования это означает, что для движения поезда требуется диспетчерское управление. Чтобы нештатные ситуации не оказывали существенного влияния на работу всего участка, предусмотрена небольшая вероятность отказа. Подробнее этот момент описан при проведении вычислительного эксперимента.

Модель в среде AnyLogic. Начнем с описания имитационной модели AnyLogic Rail Station (далее – ARS), которая была построена авторами статьи в среде разработки AnyLogic на основе агентного и дискретно-событийного подходов к моделированию. Данная модель отображает технологический процесс обработки поездов разных категорий на станции Большой Луг, поэтому учитываются только поездопотоки и работа

основных структурных элементов — горловин и путей станции. В ARS под агентом понимается поезд целиком и используются следующие блоки:

- source — генерирует моменты времени поступления агентов;
- selectOutput — определяет дальнейший маршрут агента в системе;
- queue — отвечает за накопление агентов, ожидающих принятия в следующий блок;
- delay — выполняет задержку агента на случайный промежуток времени в соответствии с заданным распределением;
- sink — удаляет агентов, попавших в блок, и фиксирует их количество;
- tStart и tEnd — хранят времена поступления агента в блок и выход из него.

В основе работы модели лежит генерация двух встречных потоков агентов — блоки source1 и source2, моделирующие поездопотоки с запада и востока. Блоки selectOutput определяют тип агента (пассажирский, транзитный грузовой поезд, с подталкиванием) и направляют его в следующий элемент согласно маршруту (рис. 1). Ключевым принципом работы является проверка состояния блоков delay1 и delay2 (западной и восточной горловин соответственно): если они заняты, агент направляется в sink1 и удаляется, что имитирует отказ в приеме поезда. Если агент прошел от блока source до sink2, то считается, что поезд был принят, обслужен на станции, а затем покинул ее. При движении агента внутри системы учитывается загрузка ее элементов, в частности, если блок queue1 переполнен, то агенты могут быть направлены в queue2. Например, в ситуации, когда главные пути заняты и транзитные поезда принимаются на приемоотправочные пути.

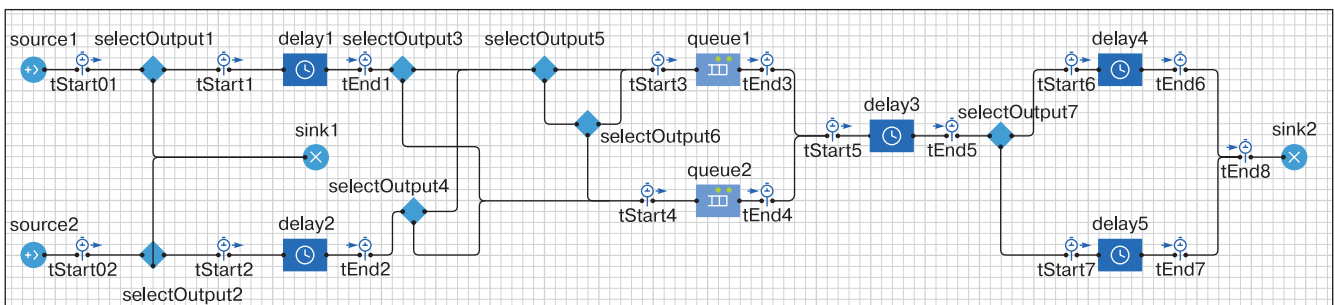


Рис. 1. Модель ARS станции Большой Луг (блоки)*:

source 1, 2 — генерация поездопотоков; selectOutput 1–7 — определение типа агента и его маршрута; delay 1, 2 — работа горловин станции; queue 1, 2 — пути парка станции; delay 3–5 — выполнение операций с поездами; sink 1, 2 — удаление агентов и учет их количества; tStart 01, 02, 1–7 и tEnd 1–8 — учет времени нахождения агента в блоках

* Источник: данные авторов

Fig. 1. ARS model of the Bolshoy Lug station (blocks)*:

source 1, 2 — train flow generation; selectOutput 1–7 — agent type and route determination; delay 1, 2 — operation of the station throats; queue 1, 2 — station yard tracks; delay 3–5 — train operations; sink 1, 2 — agent deletion and agent counting; tStart 01, 02, 1–7 и tEnd 1–8 — agent dwell time accounting in blocks

* Source: authors' data

Блоки delay моделируют время выполнения технических операций (движение в горловинах, обработка состава на путях), которое подчиняется равномерному распределению $U(\min; \max)$, где \min и \max — минимальное и максимальное значение времени в минутах для T_1 , T_2 или T_3 , за счет чего учитывается случайный характер работы объекта. Сбор статистических данных (время поступления агента в блок и выхода из него) происходит в tStart и tEnd. Таким образом, модель позволяет оценить пропускную способность станции и эффективность обработки поездов в зависимости от загрузки ее основных элементов. Схема авторской модели ARS приведена на рис. 1.

Математическое описание станции Большой Луг в СеМО. При описании работы станции с помощью методов ТМО выделяются три ее компонента: входящие поездопотоки, структурные элементы станции и маршруты движения поездов между ними.

Входящие поездопотоки. Под заявкой на обслуживание понимается весь поезд. Поездопотоки с запада и востока независимы, поэтому они моделируются отдельными входящими потоками заявок D_1 и D_2 , в которых время между поступлениями фиксировано и равно 12 мин.

Структурные элементы станции описываются в виде СМО с отказами (узлами СеМО), выбор которых обусловлен тем, что станция Большой Луг рассматривается обособленно, без учета соседних перегонов. Это необходимо, так как при текущей интенсивности поездопотоков остановка одного поезда на перегоне приводит к задержкам в движении на всем участке и появлению нештатных ситуаций.

Через горловину в одном направлении может одновременно следовать только один поезд, поэтому две горловины описываются узлами 1, 2, 6 и 7 — одноканальными СМО. Пути станции имеют разную специализацию, и на них выполняются три типа операций с существенно разной продолжительностью времени в минутах (T_1 , T_2 или T_3). Для моделирования их работы используются три узла: узел 3 — трехканальная СМО отображает вместимость главных путей, узел 4 — шестиканальная СМО отображает вместимость приемоотправочных путей, узел 5 — двухканальная СМО, в которой распределение времени обслуживания меняется в зависимости от категорий и направления следования поездов.

Выбор конкретного распределения вероятностей поездопотоков p происходит случайным образом в момент поступления заявки в узел: $p_1 = 0,5$ для T_1 , $p_2 = p_3 = 0,25$ для T_2 и T_3 . Значения вероятностей распределения поездопотоков определяют на основании графика движения поездов. Распределение времени обслуживания в представленных СМО выбрано на основе технологии работы соответствующих элементов

станции. Описание узлов СеМО представлено в табл. 1 в виде кода Кендалла — Башарина:

$$D_i/G/n/m,$$

где D_i — детерминированные потоки заявок, описывающие поступление нечетных ($i = 1$) и четных ($i = 2$) поездопотоков;

символ «#» на первой позиции означает, что параметры входящего в узел потока заявок не могут быть определены по тем или иным причинам;

G — произвольное распределение времени обслуживания;

n — число каналов;

m — число мест в очереди.

Маршруты движения поездов хранятся в маршрутной матрице P . Ее элементы $P_{x,y}$ — вероятности перехода заявки из узла x в узел y — рассчитываются по формуле:

$$P_{x,y} = \frac{n}{N}, \quad (1)$$

где n — число поездов, поступающих в структурный элемент станции за сутки;

N — суммарное число поездов за сутки, движущихся в одном направлении.

Таблица 1

Описание узлов СеМО*

Table 1

Description of queuing network nodes*

Узел	Элемент	Модель	Время обслуживания, мин
1	Движение прибывающего поезда по западной горловине станции	$D_1/G/1/0$	$U(1; 3)$
2	Движение прибывающего поезда по восточной горловине станции	$D_2/G/1/0$	$U(1; 3)$
3	Главные пути	$\#/G/3/0$	Const = 1/60
4	Приемоотправочные пути	$\#/G/6/0$	Const = 1/60
5	Обслуживание транзитного поезда (в т. ч. пассажирский, пригородный)	$\#/G/2/0$	$U(1; 3); p_1 = 0,5$
	Прицепка подталкивающего локомотива в головную часть грузового поезда		$U(18; 24); p_2 = 0,25$
	Прицепка подталкивающего локомотива в хвостовую часть грузового поезда		$U(9; 15); p_3 = 0,25$
6 и 7	Движение отправляющегося поезда по восточной и западной горловинам станции	$\#/G/1/0$	$U(1; 3)$

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

Значения поездопотока для формулы (1) определяются из графика движения поездов. Особенность работы железнодорожных станций заключается в том, что транзитные поезда могут приниматься на приемоотправочные пути, если главные заняты. Это учитывается в модели тем, что вероятности переходов поездопотоков с подталкиванием и без составляют $P_{1,3} = 0,75$ и $P_{2,3} = 0,25$, соответственно, вероятности противоположных событий вычисляются как $P_{1,4} = 1 - P_{1,3} = 0,25$ и $P_{2,4} = 1 - P_{2,3} = 0,75$ при наличии свободных мест в узле 3, иначе $P_{1,3} = 0$, $P_{2,3} = 0$. Маршрутная матрица имеет следующий вид:

$$P = \begin{matrix} & O_1 & O_2 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \begin{matrix} O_1 \\ O_2 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{1,3} & P_{1,4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{2,3} & P_{2,4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 1/2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \end{matrix}, \quad (2)$$

где O_i — источники заявок (фиктивные узлы);
1, 2, 3...7 — номера узлов.

На рис. 2 кругами обозначены узлы, стрелками — направление движения заявок, веса 1, 1/2 — ненулевые элементы маршрутной матрицы (2).

Таким образом, в представленной модели в виде СеМО описывается вместимость и продолжительность технологических операций в ключевых элемен-

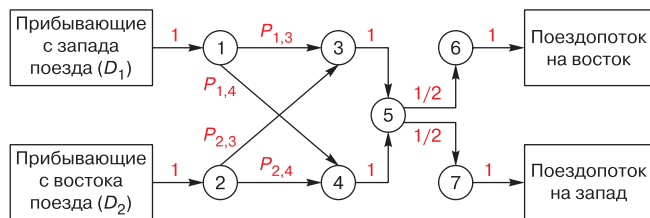


Рис. 2. Схема СеМО*:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 — узлы СеМО; $P_{1,3}, P_{2,4}, P_{2,3}, P_{1,4}$ — вероятности перехода поездопотоков из узла в узел; 1, 1/2 — веса заявок (красный цвет)

* Источник: данные авторов

Fig. 2. Scheme of the queuing network nodes*:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 — queuing network nodes; $P_{1,3}, P_{2,4}, P_{2,3}, P_{1,4}$ — probabilities of train flows moving from one node to another; 1, 1/2 — weight matrices (red)

* Source: authors' data

тах станции, непосредственно взаимодействующих с поездопотоком, явно отображаются иерархическая структура системы и прямые и обратные связи между ее частями, для транзитных и грузовых поездов с подталкиванием учитываются разные маршруты внутри станции, включая их динамическое изменение при заполнении конкретных элементов. В итоге модель отображает основной технологический процесс работы станции.

Для исследования построенной модели далее используется имитационная модель работы СеМО, основанная на дискретно-событийном подходе моделирования и методе Монте-Карло и реализованная в виде программы для ЭВМ с использованием авторского алгоритмического аппарата¹ [25].

Вычислительный эксперимент. С помощью построенных моделей выполнены два вычислительных эксперимента. В первом сравниваются результаты моделирования, полученные с помощью обеих моделей, и делаются выводы об их адекватности. Во втором проводится оценка работы станции при уменьшении интервала движения поездов. Для каждого эксперимента выполнялось по 10 пусков программ. Усредненные результаты представлены далее в таблицах. Виртуальное время моделирования каждого пуска — 30 сут.

Эксперимент 1. Проведем сравнительный анализ результатов моделирования, полученных с использованием моделей ARS и СеМО.

Обозначения в табл. 2:

t_i — среднее время нахождения агентов в блоке (заявок в узлах для СеМО), мин;

t_s — среднее время нахождения заявки в системе, мин;

R_i — среднее число агентов, находящихся в блоке в единицу времени (для ARS);

K_i — среднее число заявок в узле (число занятых каналов);

P_{ARS} и P_{QN} — вероятности отказа, полученные с помощью соответствующих моделей;

Δ — относительное отклонение, %.

Время между поступлением поездов T составляет 12 мин.

При построении модели ARS использовалась комбинация агентного и дискретно-событийного подходов, тогда как имитационная модель СеМО реализована исключительно в рамках дискретно-событийной парадигмы. Для разработки моделей применялось различное программное обеспечение: среда AnyLogic и авторское программное обеспечение, созданное

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684839 Российская Федерация. Программа расчета показателей эффективности транспортных объектов и сетей на основе теории массового обслуживания: № 2023683916: заявл. 14.11.2023; опубл. 21.11.2023 / Х. З. Ву, М. Л. Жарков, А. Л. Казаков; заявитель ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет». EDN: <https://elibrary.ru/vxpvxj>.

Таблица 2

Результаты Эксперимента 1*

Table 2

Experiment 1 results*

Узел	Элемент модели i	Среднее время нахождения агентов в блоке, модель ARS t_i , мин	Среднее время нахождения заявок в блоке, модель СеМО t_i , мин	Относительное отклонение Δ , %	Среднее число агентов, находящихся в блоке в единицу времени R_i , 1/мин	Среднее число заявок в узле K_i	Относительное отклонение Δ , %
1	delay1	2,01	2,01	0	0,17	0,17	0
2	delay2	2,01	2,01	0	0,17	0,17	0
3	queue1	4,13	4,09	0,97	0,34	0,34	0
4	queue2	4,41	4,44	0,68	0,37	0,37	0
5	delay3	9,39	9,41	0,21	1,57	1,56	0,64
6	delay4	1,99	2	0,50	0,17	0,17	0
7	delay5	2,01	2	0,50	0,17	0,17	0
—	—	17,66 ¹	17,70 ¹	0,23	—	—	—

¹ среднее время нахождения заявки в системе t_s , мин

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

на языке С# (Си-шарп). Относительное расхождение результатов моделирования во всех случаях не превышает 1,25%. Полученные показатели согласуются с известными эксплуатационными данными станции Большой Луг, что позволяет сделать вывод о достаточной адекватности разработанных моделей реальному технологическому процессу.

Под отказом в обслуживании понимается ситуация, когда поезд выбивается из расписания и остается на соседней станции из-за занятости рассматриваемой. Через некоторое время он может получить новое расписание и продолжить следование по маршруту. Для рассматриваемого горно-перевального участка Транссиба значения вероятности отказа не должны превышать 0,006. Они составили по расчетам для модели ARS — $P_{ARS} = 0,000247$, для СеМО — $P_{QN} = 0,000250$ ($\Delta = 1,21\%$), т. е. в среднем 1,8 поезда в месяц не будут приняты. Предельное значение вероятности отказа было получено на основе экспертных оценок специалистов по управлению движением ОАО «РЖД».

Среднее число занятых главных (R_3 и K_3) и приемоотправочных (R_4 и K_4) путей значительно меньше, чем их максимальное количество ($R_3 = K_3 = 0,34 < 3$, $R_4 = K_4 = 0,37 < 6$), где 3 и 6 — число главных и приемоотправочных путей согласно техническому описанию станции. Среднее время пребывания (прохождение) поезда на станции не превышает 18 мин. Таким образом, станция работает в штатном режиме и имеет запас пропускной способности. В следующем эксперименте оценим имеющийся запас производительности системы.

Эксперимент 2. Рассмотрим задачу, аналогичную Эксперименту 1. В данном случае отличие состоит в том, что время между поступлением заявок T в потоках D_1 и D_2 последовательно уменьшается с 11 до 9 мин. В табл. 3 представлены результаты моделирования, где P_{loss} — вероятность отказа в соответствующей модели.

Интерпретируем представленные в табл. 3 результаты для станции Большой Луг. При $T = 11$ мин поездопоток составит 131 пару поездов/сут, т. е. на 9,2% больше текущего значения. В этом случае наблюдается незначительный рост вероятности отказа P_{loss} и времени пребывания поезда в системе t_s , что свидетельствует о штатной работе станции (в табл. 3 выделено цветом). При $T = 10$ мин вероятность отказа превышает допустимое значение в 3 раза, а t_s приближается к 28 мин, что на 10 мин больше по сравнению с Экспериментом 1. Это можно расценивать как приближение загрузки станции к ее максимальной пропускной способности. Дальнейший рост объемов транспортной работы, который ожидается к 2035 году, потребует изменения технологии работы и/или проведения реконструкции объекта.

Выводы об эффективности моделей. При $T = 10$ мин в работе отдельных элементов двух моделей появляются значимые различия, которые, тем не менее, не оказывают существенного влияния на конечный результат (P_{loss} и t_s). Такие различия свидетельствуют, что при приближении загрузки системы к некоторому критическому значению структура модели и особенности ее работы становятся ключевым фактором для изучения внутренних процессов выбранного объекта.

Таблица 3

Результаты Эксперимента 2*

Table 3

Experiment 2 results*

Время между поступлением заявок T , мин	Имитационная модель и относительное отклонение Δ , %	Среднее время нахождения агентов (заявок) в блоке (узле), мин							Среднее время нахождения заявки в системе t_s , мин	Вероятность отказа P_{loss}
		1, t_1	2, t_2	3, t_3	4, t_4	5, t_5	6, t_6	7, t_7		
11	ARS	2,06	2,04	6,73	8,47	9,44	2	2	21,78	0,00236
11	CeMO	2,07	2,04	6,85	8,46	9,43	2,01	2	21,15	0,00243
11	Δ , %	0,49	0	1,78	0,12	0,11	0,50	0	2,89	2,97
10	ARS	2,3	2,21	10,69	17,7	9,4	2	2	28,03	0,01836
10	CeMO	2,38	2,22	11,29	16,54	9,46	2	2	27,81	0,01829
10	Δ , %	3,48	0,45	5,61	6,55	0,64	0	0	0,78	0,38
9	ARS	3,15	2,72	14,39	31,09	9,42	2	2	37,73	0,07086
9	CeMO	3,27	2,66	15,93	28,27	9,47	2,01	2	37,18	0,07129
9	Δ , %	3,81	2,21	10,70	9,07	0,53	0,50	0	1,46	0,61

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

Тем не менее, регулярно возникают задачи, в которых требуется анализ этого объекта в составе более крупной системы и достаточно найти наиболее значимые параметры его работы, например, при моделировании работы всего железнодорожного участка (Большой Луг – Слюдянка-1). В таком случае можно использовать более простой и универсальный аппарат, позволяющий сократить трудоемкость построения и анализа модели. В данной работе таким инструментом является ТМО, что еще раз подтверждает ее эффективность при исследовании железнодорожных систем.

Обсуждение и заключение. Проанализированы подходы к решению задачи оценки эксплуатационных характеристик железнодорожной станции Большой Луг при условии уменьшения интервала прибытия поездов. В качестве инструментов использованы математическое и компьютерное (имитационное) моделирование. Разработаны две модели работы станции. Первая из них построена в программной среде AnyLogic. Вторая — на основе теории массового обслуживания и авторского программного обеспечения. Модели рассмотрены при определенных упрощающих допущениях, однако даже с учетом этого задачи их разработки и исследования оказались весьма затруднительными.

С помощью построенных моделей были выполнены численные эксперименты по изучению эффективности работы станции и допустимой загрузке при увеличении поездопотоков. На основе полученных результатов установлено, что станция Большой Луг при текущем техническом оснащении способна обрабатывать в штатном режиме поездопоток с интервалом дви-

жения поездов в 11 мин, что соответствует поступлению 131 пары поездов в сутки. Это позволит увеличить грузовое движение на 9,2%, что обеспечит заметный положительный эффект в условиях растущих объемов перевозок на Восточном полигоне, однако полученное значение является предельным, и дальнейший рост поездопотока потребует изменения технологии работы и/или проведения реконструкции станции.

Перспективным направлением для дальнейшего исследования может стать построение и исследование моделей крупных инфраструктурных объектов железных дорог, в частности, всего горно-перевального участка. Вторым возможным направлением является усложнение модельного аппарата, например, анализ внутренних (переходных) процессов, происходящих на станции в результате нарушения графика движения поездов. Возможность применения моделей, приведенных в данной статье, на цифровой железнодорожной станции требует дополнительных исследований.

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. Жарков М. Л., Казаков А. Л., Супруновский А. В. Оценка пропускной способности однопутного участка БАМа с использованием теории массового обслуживания // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 4. С. 370–384. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-4-370-384>. EDN: <https://elibrary.ru/omugju>.
- Zharkov M. L., Kazakov A. L., Suprunovsky A. V. Estimation of line capacity of single-track section of Baikal-Amur Mainline using mass service theory. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(4):370–384. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-4-370-384>. EDN: <https://elibrary.ru/omugju>.
2. Сотников Е. А., Гоник М. М., Хомяков С. В., Михайлов С. В. Имитационная модель определения рациональных размеров неснижаемого резерва локомотивов на станциях их оборота // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77, № 3. С. 157–164. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-3-157-164>. EDN: <https://elibrary.ru/xrroeh>.
- Sotnikov E. A., Gonik M. M., Khomyakov S. V., Mikhaylov S. V. Simulation model for determining the rational dimensions of the irreducible reserve of locomotives at the stations of its turnover. *Russian Railway Science Journal*. 2018;77(3):157–164. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-3-157-164>. EDN: <https://elibrary.ru/xrroeh>.
3. 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, Москва, 22 октября 2021 г. М.: РУТ МИИТ, 2021. С. 174–181. <https://doi.org/10.47581/2022/Obrazcov.25>. EDN: <https://elibrary.ru/wylmqv>.
- 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/wylmqv>.
4. Любченко А. А., Бартош С. В., Смирнов В. А., Castillo P. Á. Дискретно-событийная модель железнодорожного узла в среде AnyLogic // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 3. С. 87–92. EDN: <https://elibrary.ru/xbfksh>.
- Lyubchenko A. A., Bartosh S. V., Smirnov V. A., Castillo P. Á. Discrete-event model of a railway junction in the AnyLogic environment. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2016;(3):87–92. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/xbfksh>.
5. Рахмангулов А. Н., Корнилов С. Н., Мишкuroв П. Н., Александрин Д. В. Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных узлов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3 (55). С. 43–59. <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2022-3-43-59>. EDN: <https://elibrary.ru/hhjeee>.
- Rakhmangulov A. N., Kornilov S. N., Mishkurov P. N., Alexandrin D. V. Simulation models in digital twins of railway junctions. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2022;(3(55)):43–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2022-3-43-59>. EDN: <https://elibrary.ru/hhjeee>.
6. Александров А. Э., Ковалев И. А., Пермикин В. Ю., Сурин А. В., Лесных В. В. Логическая верификация оптимизационной модели переработки вагонопотоков на сортировочной станции // Транспорт Урала. 2022. № 2 (73). С. 17–22. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2022-2-17-22>. EDN: <https://elibrary.ru/oxnzrs>.
- Alexandrov A. E., Kovalev I. A., Permikin V. Yu., Surin A. V., Lesnykh V. V. Logic verification of optimization model of car traffic processing at marshalling station. *Transport of the Urals*. 2022;(2(73)):17–22. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/oxnzrs>.
7. Бессоненко С. А., Осипов Н. И., Медведев В. И. Оценка эффективности интервального регулирования движения поездов как альтернативы сооружению вторых главных путей // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4 (67). С. 21–29. https://doi.org/10.52170/1815-9265_2023_67_21. EDN: <https://elibrary.ru/getujp>.
- Bessonenko S. A., Osipov N. I., Medvedev V. I. Evaluating the effectiveness of interval train control as an alternative to the constructing second main tracks. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2023;(4(67)):21–29. (In Russ.). https://doi.org/10.52170/1815-9265_2023_67_21. EDN: <https://elibrary.ru/getujp>.
8. Король Р. Г., Числов О. Н. Моделирование терминально-логистических процессов переработки внешнеторговых грузов на пограничной станции Гродеково // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 3. С. 258–266. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-258-266>. EDN: <https://elibrary.ru/cgqhjd>.
- Korol' R. G., Chislov O. N. Simulation of terminal and logistics processes of foreign trade cargo processing at the Grodekovo border station. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(3):258–266. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-3-258-266>. EDN: <https://elibrary.ru/cgqhjd>.
9. Багинова В. В., Кузьмин Д. В. Применение алгоритмов маршрутизации агента при разработке дискретно-событийных имитационных моделей с использованием инструментов железнодорожной библиотеки AnyLogic // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (58). С. 109–118. <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2023-2-109-118>. EDN: <https://elibrary.ru/pziltm>.
- Baginova V. V., Kuzmin D. V. Application of agent routing algorithms in the development of discrete-event simulation models using AnyLogic Railway Library tools. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2023;(2(58)):109–118. (In Russ.). <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2023-2-109-118>. EDN: <https://elibrary.ru/pziltm>.
10. Власов М. А., Казаков А. Л., Супруновский А. В. Моделирование участковой железнодорожной станции Байкало-Амурской магистрали в среде AnyLogic // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2025. № 3 (67). С. 41–52. <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2025-3-41-52>. EDN: <https://elibrary.ru/oajteh>.
- Vlasov M. A., Kazakov A. L., Suprunovsky A. V. Modeling of a district railway station of the Baikal-Amur Mainline in the AnyLogic environment. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2025;(3(67)):41–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2025-3-41-52>. EDN: <https://elibrary.ru/oajteh>.
11. Дудакова А. В., Упырь Р. Ю. Моделирование технологических процессов на примере работы приемо-отправочного парка участковой станции с использованием среды имитационного моделирования AnyLogic // Общество. 2023. № 3-1 (30). С. 37–40. EDN: <https://elibrary.ru/epqmdp>.
- Dudakova A. V., Upyr R. Yu. Modeling of technological processes on the example of the operation receiving-departure yard train station using AnyLogic simulation environment. *Society*. 2023;(3-1(30)):37–40. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/epqmdp>.
12. Корнилов С. Н., Мишкuroв П. Н., Антонов А. Н. Оптимизация работы промышленного железнодорожного транспорта в условиях реконструкции на металлургических предприятиях // Вестник транспорта Поволжья. 2025. № 5 (113). С. 78–84. EDN: <https://elibrary.ru/xbijhk>.
- Kornilov S. N., Mishkurov P. N., Antonov A. N. Optimization of the work of industrial railway transport in the conditions of reconstruction at metallurgical enterprises. *Vestnik transporta Povolzhya*. 2025;(5(113)):78–84. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/xbijhk>.
13. Сотников И. Б. Взаимодействие станций и участков железных дорог. М.: Транспорт, 1976. 270 с.
- Sotnikov I. B. *Interaction of railway stations and sections*. Moscow: Transport; 1976. 270 p. (In Russ.).

14. Dorda M., Teichmann D. Modelling of Freight Trains Classification Using Queueing System Subject to Breakdowns. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013;2013(1):1–11. <https://doi.org/10.1155/2013/307652>.

15. Шабельников А. Н., Шаповалова Ю. В. Моделирование систем технического обслуживания объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта на основе теории массового обслуживания // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77, № 3. С. 165–171. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-3-165-171>. EDN: <https://elibrary.ru/xgroep>.

Shabel'nikov A. N., Shapovalova Yu. V. Modeling of maintenance systems for railway infrastructure facilities based on the theory of mass service. *Russian Railway Science Journal*. 2018;77(3):165–171. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-3-165-171>. EDN: <https://elibrary.ru/xgroep>.

16. Москвичев О. В., Москвичева Е. Е., Грузд А. А. Научно-методический подход к интеграции цифровых технологий в работу железнодорожных грузовых станций и примыкающих путей необщего пользования // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2025. № 3 (118). С. 43–47. EDN: <https://elibrary.ru/xgbqlt>.

Moskvichev O. V., Moskvicheva E. E., Gruzd A. A. Scientific and methodological approach to integrating digital technologies in railway freight stations and private tracks. *Transport of the Russian Federation*. 2025;(3(118)):43–47. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/xgbqlt>.

17. Карасев С. В., Калидова А. Д. Моделирование пропуска поездопотоков через однопутный лимитирующий элемент трассы при организации скоростного движения с использованием существующей инфраструктуры // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77, № 1. С. 34–43. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-1-34-43>. EDN: <https://elibrary.ru/yrmrxq>.

Karasev S. V., Kalidova A. D. Modeling of train flow handling through a limiting single-track section of the route at the organization of high-speed operation using the existing infrastructure. *Russian Railway Science Journal*. 2018;77(1):34–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-1-34-43>. EDN: <https://elibrary.ru/yrmrxq>.

18. Weik N., Niebel N., Nießen N. Capacity analysis of railway lines in Germany — A rigorous discussion of the queueing based approach. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2016;6(2):99–115. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.06.001>.

Weik N., Nießen N. Quantifying the effects of running time variability on the capacity of rail corridors. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2020;15(5):100203. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2020.100203>.

20. Казаков А. Л., Пavidис М. М. О современных методах моделирования работы сортировочной станции // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2019. Т. 1. С. 110–117. EDN: <https://elibrary.ru/zrnuts>.

Kazakov A. L., Pavidis M. M. On modern methods of studying the operation of a marshalling yard. *Transport infrastructure of the Siberian region*. 2019;1:110–117. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/zrnuts>.

21. Жарков М. Л., Казаков А. Л., Супруновский А. В., Пavidис М. М. Моделирование крупнейшей в мире железнодорожной сортировочной станции с использованием теории массового обслуживания // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2021. № 3 (51). С. 4–14. <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2021-3-4-14>. EDN: <https://elibrary.ru/jfibuc>.

Zharkov M. L., Kazakov A. L., Suprunovsky A. V., Pavidis M. M. Simulation of the world's largest railway marshalling yard using queueing theory. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2021;(3(51)):4–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2021-3-4-14>. EDN: <https://elibrary.ru/jfibuc>.

22. Бычков И. В., Жарков М. Л., Казаков А. Л. Оценка технико-технологических решений по использованию инфраструктуры на однопутном участке Восточного полигона // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2025. № 1-2. С. 41–51.

Bychkov I. V., Zharkov M. L., Kazakov A. L. Assessment of technical and technological solutions to the operation of infrastructure on the single-track section of the Eastern polygon. *Bulletin of the Unified Scientific Council of JSC "RZD"*. 2025;(1-2):41–51. (In Russ.).

23. Бушуев С. В., Ковалев И. А. Восстановление движения после отказов с применением виртуальной сцепки поездов // Автоматика на транспорте. 2024. Т. 10, № 1. С. 64–73. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2024-10-01-64-73>. EDN: <https://elibrary.ru/rxirjc>.

Bushuev S. V., Kovalev I. A. Restoration of traffic after failures using a virtual train coupling. *Transport automation research*. 2024;10(1):64–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2024-10-01-64-73>. EDN: <https://elibrary.ru/rxirjc>.

24. Weik N. Macroscopic traffic flow in railway systems — A discussion of the applicability of fundamental diagrams. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2022;23(5):100330. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100330>.

25. Лемперт А. А., Жарков М. Л., Казаков А. Л., Ву Х. З. Моделирование морского контейнерного терминала с использованием сети массового обслуживания // Управление большими системами. 2024. № 112. С. 310–337. <https://doi.org/10.25728/ubs.2024.112.15>. EDN: <https://elibrary.ru/dclwoc>.

Lempert A. A., Zharkov M. L., Kazakov A. L., Vu G. Z. Modeling of a sea container terminal using a queueing network. *Large-Scale Systems Control*. 2024;(112):310–337. (In Russ.). <https://doi.org/10.25728/ubs.2024.112.15>. EDN: <https://elibrary.ru/dclwoc>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матвей Алексеевич ВЛАСОВ,

аспирант, кафедра «Управление эксплуатационной работой», Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15), SPIN-код: 7817-9451, <https://orcid.org/0009-0000-5881-6270>

Александр Леонидович КАЗАКОВ,

д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова СО РАН (ИДСТУ СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 134); профессор, кафедра «Управление эксплуатационной работой», Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15), SPIN-код: 8101-9424, <https://orcid.org/0000-0002-3047-1650>

Антон Викторович СУПРУНОВСКИЙ,

старший преподаватель, кафедра «Управление эксплуатационной работой», Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15), SPIN-код: 3416-9461, <https://orcid.org/0000-0001-8356-4271>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Matvey A. VLASOV,

Postgraduate, Department of Operational Management, Irkutsk State Transport University (664074, Irkutsk, 15, Chernyshevskogo St.), SPIN-code: 7817-9451, <https://orcid.org/0009-0000-5881-6270>

Alexander L. KAZAKOV,

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Researcher, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (664033, Irkutsk, 134, Lermontova St.); Professor, Department of Operational Management, Irkutsk State Transport University (664074, Irkutsk, 15, Chernyshevskogo St.), SPIN-code: 8101-9424, <https://orcid.org/0000-0002-3047-1650>

Anton V. SUPRUNOVSKY,

Senior Lecturer, Department of Operational Management, Irkutsk State Transport University (664074, Irkutsk, 15, Chernyshevskogo St.), SPIN-code: 3416-9461, <https://orcid.org/0000-0001-8356-4271>

Alexander L. KAZAKOV. Research direction development, goal setting, problem, conclusions, and recommendations formulation, article editing (40 %).

Anton V. SUPRUNOVSKY. Description of the research object and interpretation of experimental results, article editing (30 %).

ВКЛАД АВТОРОВ

Матвей Алексеевич ВЛАСОВ. Построение моделей. Сбор и подготовка данных для их работы. Проведение вычислительных экспериментов, написание текста статьи, формирование выводов (30 %).

Александр Леонидович КАЗАКОВ. Формирование направления исследования, определение цели, постановка задачи, выводов и рекомендаций, редактирование текста статьи (40 %).

Антон Викторович СУПРУНОВСКИЙ. Описание объекта исследования, интерпретация результатов экспериментов, редактирование текста статьи (30 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Matvey A. VLASOV. Model construction. Data collection and preparation. Computational experiments conduction, article writing, and drawing conclusions (30 %).

Статья поступила в редакцию 24.02.2026, рецензия от первого рецензента получена 12.03.2026, рецензия от второго рецензента получена 16.03.2026, принята к публикации 05.05.2026.

The article was submitted 24.02.2026, first review received 12.03.2026, second review received 16.03.2026, accepted for publication 05.05.2026.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Оригинальная научная статья

УДК 656.223.2

EDN: <https://elibrary.ru/zrvzaa>DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-123-133>

Научная специальность: 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (транспорт и логистика)



Оценка эффективности использования грузовых вагонов в современных условиях

Д. А. Мачерет^{1, 2}, Н. А. Валеев¹✉¹Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация²Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Парк грузовых вагонов является ключевым производственно-экономическим ресурсом железнодорожного транспорта, эффективному использованию которого традиционно уделяется большое внимание в отраслевой науке и практике. В связи с этим важное значение имеет релевантный анализ использования парка грузовых вагонов, необходимый для выработки мероприятий по его улучшению в современных условиях, что, в свою очередь, требует совершенствования оценки его использования. Целью настоящей статьи является анализ существующих подходов к оценке использования грузовых вагонов и выработка предложений по ее совершенствованию.

Материалы и методы. В работе проведен анализ традиционного подхода к оценке использования грузовых вагонов и предложенных в научной литературе альтернативных подходов. Рассмотрены применяемые в настоящее время показатели использования грузовых вагонов, а также возможности интеграции маржинального и компонентного анализа. Сделан вывод об актуальности совершенствования методического инструментария оценки использования грузовых вагонов.

Результаты. Предложен новый подход к оценке использования грузовых вагонов с помощью показателя «темпоральная емкость пробега грузового вагона». Выполнен компонентный и маржинальный анализ данного показателя в долгосрочной ретроспективе.

Обсуждение и заключение. Сопоставление динамики темпоральной емкости пробега грузового вагона с динамикой иных показателей использования вагонного парка показывает, что предложенный в статье показатель характеризует реальное ускорение или замедление оборачиваемости грузовых вагонов, а его применение позволяет осуществлять адекватную оценку использования парка грузовых вагонов и резервов его улучшения. Для реализации этих резервов необходимо совершенствование организации вагонопотоков, внедрение инновационных технологий станционной и поездной работы. При этом снижение темпоральной емкости пробега грузового вагона может выступать как целевой показатель для разработки мероприятий по реализации выявленных резервов и критерий успешности осуществления этих мероприятий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный транспорт, парк грузовых вагонов, система показателей использования грузовых вагонов, оборот вагона, темпоральная емкость пробега грузового вагона

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мачерет Д. А., Валеев Н. А. Оценка эффективности использования грузовых вагонов в современных условиях // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2026. Т. 85, № 2. С. 123–133. EDN: <https://elibrary.ru/zrvzaa>.

Original article
UDK 656.223.2
EDN: <https://elibrary.ru/zrvzaa>
DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-123-133>
Scientific specialty: 5.2.3. Regional and sectoral economics (transport and logistics)



Evaluation of the efficiency of freight cars in modern conditions

Dmitry A. Macheret^{1, 2}, Nadir A. Valeev¹✉

¹Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

²Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Freight car fleet is a crucial production and economic asset for railway transport. Its effective utilisation is a major focus in both industry research and practical applications. Therefore, a relevant analysis of freight car utilisation is essential for developing strategies to improve it in modern environment. This, in turn, necessitates refining the methods used to evaluate the effectiveness of the freight car fleet. The purpose of the article is the analysis of existing approaches to assessing the use of freight cars and proposal development for its improvement.

Materials and methods. This paper examines the conventional approach to evaluating freight car utilisation and alternative approaches proposed in academic literature. The article emphasizes the need to enhance the methodological tools used for assessing freight car utilisation.

Results. A novel approach to assessing freight car utilisation is proposed, using the “temporal capacity of freight car mileage” indicator. Component and marginal analysis of this indicator is conducted, considering data from a long-term historical perspective.

Discussion and conclusion. Comparison of the dynamics of the temporal capacity of freight car mileage with other indicators of car fleet utilisation reveals that the new indicator effectively reflects the actual acceleration or deceleration of freight car turnover. Its application enables an accurate evaluation of the freight car fleet utilisation and the potential for improvement. This necessitates improvements in car flows organisation and implementation of innovative technologies for station and train operations. Simultaneously, a decrease in the temporal capacity of freight car mileage may serve as a cost indicator for implementing identified improvements and as a benchmark for evaluating the success of these strategies.

KEYWORDS: railway transport, freight car fleet, system of indicators for freight car utilisation, car turnover, temporal capacity of car mileage

FOR CITATION: Macheret D. A., Valeev N. A. Evaluation of the efficiency of freight cars in modern conditions. *Russian Railway Science Journal*. 2026;85(2):123–133. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-123-133>.

✉ valeev_na@mail.ru (N. A. Valeev)

© Macheret D. A., Valeev N. A., 2026

Введение. Парк грузовых вагонов является ключевым производственно-экономическим ресурсом железнодорожного транспорта. Это одна из важнейших составляющих активной части основных фондов отрасли, оказывающих наиболее значимое влияние на общий уровень фондоотдачи, эффективность использования трудовых и материальных ресурсов, а, следовательно, и окупаемость инвестиций, вкладываемых в развитие железных дорог.

Если применить теорию экономических благ [1] к анализу парка грузовых вагонов, то он может рассматриваться как капитальное благо, комплементарное по отношению к другим капитальным благам, используемым на железнодорожном транспорте в процессе грузовых перевозок (поездные и маневровые локомотивы, объекты инфраструктуры). При этом из всех перечисленных капитальных благ грузовые вагоны обладают наибольшей пространственной мобильностью, а, следовательно, и адаптируемостью, т. е. возможностью приспособить их использование к изменениям ситуации на транспортном рынке. Это свойство особенно значимо в существующих условиях трансформации транспортного рынка, изменения направлений и интенсивности грузопотоков.

В отечественной железнодорожной науке и практике обеспечению эффективного использования парка грузовых вагонов уделялось первостепенное внимание еще с конца XIX века, когда была реализована система взаимного пользования товарными (такая терминология была принята в то время) вагонами [2], что позволило обеспечить существенно более высокий уровень их производительности (в расчете на единицу грузоподъемности) по сравнению с ведущими зарубежными железнодорожными системами.

Эффективное использование грузовых вагонов актуально и в современных условиях, и в перспективе. В частности, оно является важной составляющей эффективного управления железнодорожными активами¹.

Для того, чтобы обеспечить релевантный анализ использования парка грузовых вагонов, а также рациональную выработку мероприятий по его улучшению, необходимы адекватные методы оценки использования.

Целью настоящей статьи является анализ существующих подходов к оценке использования парка грузовых вагонов и выработка предложений по совершенствованию этой оценки, позволяющих повысить качество анализа и управления им в современных условиях.

Анализ мирового опыта свидетельствует о том, что для зарубежных железнодорожных систем приоритет-

ными являются показатели использования грузовых вагонов по мощности, такие как статическая нагрузка (этот показатель используется и в отечественной железнодорожной науке и практике) и, в качестве обобщающей характеристики, коммерческий грузооборот в расчете на один вагон² (в отечественной железнодорожной науке и практике используется аналогичный показатель — среднесуточная производительность грузового вагона). Увеличение указанных показателей достигается, прежде всего, за счет улучшения конструкций грузовых вагонов, дающих возможность повысить погонную и осевую нагрузку в рамках системной организации тяжеловесного движения [3].

Что касается использования грузовых вагонов по времени, то внимание на зарубежных железных дорогах фокусируется на скорости и надежности движения грузовых вагонов в поездах, в том числе в тяжеловесных, строго по графику [4–6]. Это обеспечивает гарантированную доставку грузов «точно в срок», а при перевозке высокоценных товаров, чувствительных ко времени доставки (например, скоропортящейся продукции), необходимая скорость перевозки достигается организацией ускоренных поездов, следующих по соответствующим расписаниям [7–8].

Отечественные железные дороги в отношении приоритетных характеристик использования грузовых вагонов имеют существенную специфику. С одной стороны, возможности роста показателей использования грузовых вагонов по мощности, во-первых, ограничены, так как вагоны обращаются на всей сети, а не на отдельных маршрутах, и, во-вторых, требуют повышения осевой нагрузки и соответствующего усиления инфраструктуры. Усиливать же всю железнодорожную инфраструктуру под осевые нагрузки 27–30 т и более экономически нецелесообразно и практически труднореализуемо. С другой стороны, в условиях дефицита вагонного парка в прошлом и его избытка относительно инфраструктурных мощностей в настоящем (ни то, ни другое не характерно для ведущих зарубежных железнодорожных систем), традиционным приоритетом для отечественных железных дорог и научных исследований является не просто ускорение продвижения поездопотоков, а использование грузовых вагонов по времени в рамках полного цикла их работы — от погрузки до следующей погрузки. Указанные обстоятельства определяют и фокус данного исследования, а также его базирование, прежде всего, на отечественном опыте и научных заделах.

Традиционный подход к оценке использования грузовых вагонов. Система показателей использования грузовых вагонов развивалась с конца XIX века,

¹ Lapidus B. M., Zhurkowski A., Wishniewski Y., Schut D. Global Vision for Railway Development. Paris: UIC; 2019. 52 p.

² AAR. Railroad Facts. Washington, DC: Policy and Economics Department Association of American Railroads; 2017. 84 p.

и к началу XXI века сформировалось категорирование этих показателей.

В качестве важнейшего показателя не только использования парка грузовых вагонов, но и уровня всей эксплуатационной работы железнодорожного транспорта традиционно рассматривался оборот вагона.

Оборот вагона характеризует продолжительность полного цикла работы грузового вагона от момента погрузки до момента следующей погрузки. Впервые научные методические подходы к его использованию в качестве ключевого показателя для оценки и управления работой парка грузовых вагонов были предложены выдающимся ученым И. И. Васильевым [9]. С тех пор оборот вагона применялся в качестве ключевого показателя для оценки использования парка грузовых вагонов и всей эксплуатационной работы железных дорог не только в техническом, но и в экономическом аспекте. В частности, большое значение придавал ему крупнейший ученый-экономист, занимавшийся проблемами железнодорожного транспорта, академик Т. С. Хачатуров [10]. Оборот вагона был одним из основных компонентов концепции производительной силы железнодорожного транспорта, предложенной в конце 1980-х гг. профессором И. В. Беловым [11] и развитой профессорами М. Е. Мандриковым [12] и Н. П. Терешинной [13]. Он активно используется в работах ученых, занимающихся проблемами железнодорожной экономики и технологии, и в современных условиях [14–15].

Можно выделить ряд достоинств показателя «оборот вагона», благодаря которым он в свое время занял центральное место в системе показателей использования парка грузовых вагонов и качества эксплуатационной работы железных дорог.

Во-первых, он зависит от многих факторов, в совокупности характеризующих организацию эксплуатационной работы, технологию управления вагонопотоками и отдельными элементами железнодорожного транспорта и качество ее реализации, а также качество работы большинства хозяйств железнодорожной отрасли.

Во-вторых, оборот вагона может быть декомпозирован на элементы, что имеет важное значение как для анализа использования парка грузовых вагонов, так и для разработки мероприятий по его улучшению и нормированию эксплуатационной работы.

Существуют различные варианты такого декомпозирования. Наиболее распространенным вариантом, который используется и в настоящей работе, является разделение оборота вагона на четыре элемента. А наиболее детальным является декомпозирование на пять элементов, когда время на технических станциях

разделяется на простой с переработкой и простой без переработки.

В-третьих, оборот вагона удобно использовать для экономической оценки через изменение вагоно-часов при его ускорении или замедлении и расходную ставку на 1 вагоно-час. При этом значение указанной расходной ставки может существенно меняться в зависимости от условий и задач такой оценки³.

Наряду с отмеченными достоинствами, оборот вагона имеет и существенный недостаток: он напрямую зависит от рейса вагона, который, в свою очередь, зависит от средней дальности перевозки грузов, имеющей долгосрочную тенденцию к росту, определяемую фундаментальными социально-экономическими факторами.

На российских железных дорогах тенденция к росту средней дальности перевозки грузов усилилась во второй половине 1990-х гг. в связи с развитием экспортных возможностей экономики страны и продолжилась в дальнейшем. Только за последние полтора десятилетия (с 2010 по 2024 гг.) средняя дальность перевозки грузов возросла на 28,5%. Почти в той же мере — на 26,9% — увеличился груженный рейс вагона, т.е. среднее расстояние, проходимое грузовым вагоном от погрузки до выгрузки. Несколько меньше (на 22,7%) вырос полный рейс вагона — среднее расстояние, проходимое грузовым вагоном за время полного оборота, от погрузки до следующей погрузки. Замедленное увеличение полного рейса в сравнении с груженым связано с тем, что в последние годы достигнуто сокращение доли порожнего пробега и, соответственно, порожнего рейса вагона — среднего расстояния, проходимого грузовым вагоном от выгрузки до погрузки. Тем не менее, учитывая превалирование груженого рейса, полный рейс также увеличивается вслед за ростом средней дальности перевозок и груженого рейса вагона.

Рост полного рейса приводит к увеличению оборота вагона. Хотя в отдельные годы изменения полного рейса и оборота вагона происходили разнонаправленно (рис. 1), долгосрочное увеличение полного рейса является важным фактором увеличения оборота вагона.

Нивелировать влияние полного рейса вагона позволяет использование показателя «среднесуточный пробег грузового вагона», который определяется как отношение полного рейса к обороту вагона. Однако этот показатель не обладает свойством декомпозирования на элементы и удобством экономической оценки через изменение вагоно-часов (расчет все равно должен вестись с использованием оборота вагона). Таким образом, нивелируя присущий обороту вагона недостаток, среднесуточный пробег вагона не обладает присущими

³ Экономика железнодорожного транспорта: учебник для вузов / под ред. И. В. Белова. М.: Транспорт, 1989. С. 139–142.

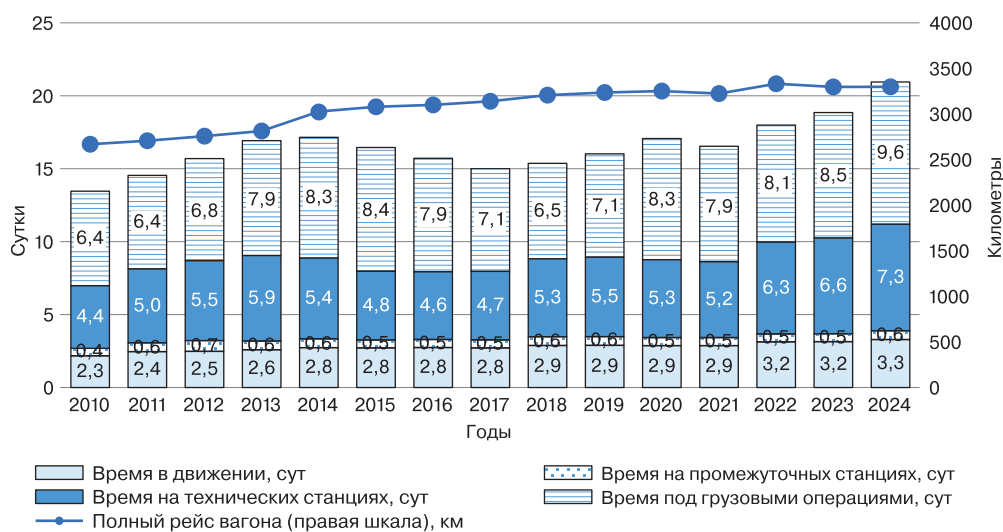


Рис. 1. Динамика оборота вагона (сут) и полного рейса вагона (км)*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 1. Dynamics of freight car turnover (days) and total freight car journey (km)*

* Source: compiled by the authors according to the research

обороту вагона важными достоинствами. В связи с этим он не занял центрального места в системе показателей оценки использования грузовых вагонов.

Альтернативные подходы к оценке использования грузовых вагонов. При переходе железнодорожного транспорта к работе в рыночных условиях и последующей структурной реформе отрасли разрабатывались предложения по совершенствованию оценки использования грузовых вагонов.

В частности, в статье [16] был предложен новый показатель — среднесуточный полезный пробег вагона, определяемый как отношение грузного рейса к обороту вагона и характеризующий расстояние, проходимое вагоном в грузном состоянии за сутки полного оборота. Преимущество этого показателя перед оборотом вагона состоит в том, что он не ухудшается под воздействием роста грузного рейса вагона, а перед среднесуточным пробегом — в том, что он не демонстрирует улучшения использования парка грузовых вагонов в случае ускорения их пробега за счет увеличения доли порожнего рейса в полном. Среднесуточный полезный пробег также можно рассматривать в качестве удельной среднесуточной производительности грузового вагона, приходящейся на 1 т динамической нагрузки грузного вагона.

Преимущества среднесуточного полезного пробега вагона наиболее отчетливо проявлялись при существовании общего парка грузовых вагонов, находившегося в распоряжении сначала МПС, а затем ОАО «РЖД», когда перемещение порожнего вагона было лишь технологическим элементом обеспечения процесса грузовых перевозок в рамках деятельности перевозчика.

В условиях приватизации вагонного парка и его отделения от перевозчика, когда перемещение порожнего вагона превратилось в особую рыночную услугу, релевантность данного показателя несколько снизилась. Кроме того, он не обладает теми же отмеченными выше преимуществами оборота вагона, как и среднесуточный пробег вагона.

Другой новацией в оценке использования парка грузовых вагонов, позволяющей нивелировать искажающее влияние рейса вагона на результаты этой оценки, было разделение оборота вагона на составляющие: не зависящую от рейса вагона (время под грузовыми операциями) и зависящую от рейса вагона (сумма всех остальных элементов) с определением скорости продвижения грузового вагона — отношения полного рейса вагона к той части оборота вагона, которая зависит от полного рейса [17]. Такая оценка важна при фокусировании внимания именно на *перемещении* вагона в рамках перевозочного процесса. С другой стороны, она не обладает полнотой характеристики полного цикла работы вагона. Поэтому данный показатель может рассматриваться как дополняющий привычную систему показателей использования грузовых вагонов. Долгосрочная динамика ключевых показателей использования грузовых вагонов, как традиционных, так и альтернативных, показана на рис. 2.

В современных условиях при оценке использования парка грузовых вагонов внимание по-прежнему фокусируется на обороте вагона. Впрочем, если в период существования централизованно планируемой экономики это было связано с дефицитом погрузочных (как и многих других) ресурсов и необходимостью

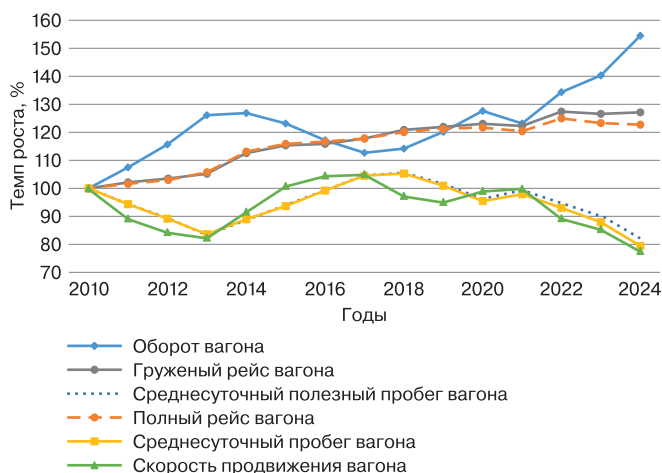


Рис. 2. Динамика основных показателей использования грузовых вагонов (2010–2024 гг. к 2010 г.), %*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 2. Dynamics of the main indicators of freight car utilisation, %*
* Source: compiled by the authors according to the research

ускорять оборачиваемость вагонов, чтобы этот дефицит уменьшить, то в настоящее время — с проблемой профицита вагонного парка и необходимостью оценки его потребной величины [18].

В любом случае использование данного показателя сопряжено с его вышеотмеченным недостатком, что делает актуальным совершенствование методического инструментария оценки использования парка грузовых вагонов.

Новый подход к оценке использования грузовых вагонов. С учетом проведенного анализа показателей использования грузовых вагонов и с целью совершенствования оценки их использования, предлагается ввести новый показатель — темпоральная емкость пробега грузового вагона (T_{eS_B} , ч/100 км) (1):

$$T_{eS_B} = \frac{O_B}{R_{\text{полн}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где O_B — оборот вагона, ч;

$R_{\text{полн}}$ — полный рейс вагона, км.

Этот показатель характеризует часть времени оборота грузового вагона, приходящуюся на 100 км полного рейса вагона. Он обладает всеми вышеперечисленными достоинствами оборота вагона, но лишен его отмеченного недостатка, так как влияние величины полного рейса было нивелировано.

Динамика темпоральной емкости пробега грузового вагона и используемых для его расчета показателей представлена в таблице.

Как видно из рис. 3, темпоральная емкость пробега грузового вагона имела тенденцию к увеличению в рассматриваемый период времени, что характеризует действительное замедление оборачиваемости грузовых вагонов. Однако это замедление не было столь существенным, как увеличение времени оборота вагона, связанное не только с реальным замедлением оборачиваемости вагонного парка, но и с ростом полного рейса вагона. В период 2014–2018 гг. темпоральная емкость пробега грузового вагона неуклонно снижалась, достигнув минимального значения в 2018 г.

Как и оборот вагона, темпоральная емкость пробега вагона может быть декомпозирована на элементы, поэтому для ее углубленного изучения целесообразно применить компонентный анализ, методология которого представлена в [19]. Результаты компонентного анализа темпоральной емкости пробега грузового вагона показаны на рис. 4.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в целом в рассматриваемом периоде увеличение темпоральной емкости грузового вагона произошло прежде всего за счет роста времени простоя на технических станциях. Сопоставимое влияние оказало также увеличение простоев под грузовыми операциями. Несколько иной вывод можно сделать по отношению к последнему году рассматриваемого периода (2024 г.) в сравнении с предшествующим, когда влияние роста простоев под грузовыми операциями превалировало.

Таблица

Динамика темпоральной емкости пробега грузового вагона и показателей, используемых для ее расчета*

Table

Dynamics of the temporal mileage capacity of a freight car and the indicators used for its calculation*

Показатели	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Полный рейс вагона $R_{\text{полн}}$ (правая шкала), км	2671	2708	2755	2816	3013	3080	3105	3145	3210	3240	3253	3220	3337	3294	3277
Оборот вагона O_B , ч	322,8	345,7	371,9	406,1	408,0	395,2	377,7	361,5	366,5	385,9	409,2	394,8	433,1	450,1	498,9
Темпоральная емкость пробега вагона T_{eS_B} , ч/100 км	12,1	12,8	13,5	14,4	13,5	12,8	12,2	11,5	11,4	11,9	12,6	12,3	13,0	13,7	15,2

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

* Source: compiled by the authors according to the research

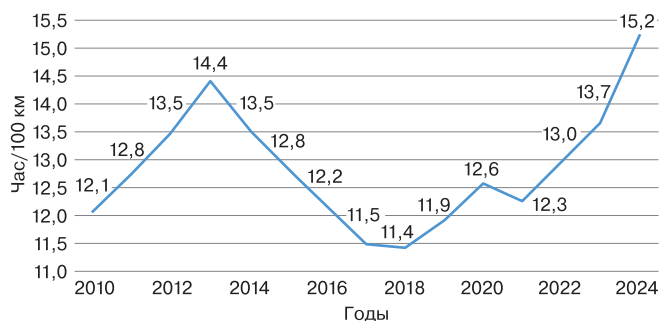


Рис. 3. Динамика темпоральной емкости пробега грузового вагона, ч/100 км*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 3. Dynamics of the temporal capacity of freight car mileage, h/100 km*

* Source: compiled by the authors according to the research

Соответственно, снижение простоев под грузовыми операциями и на технических станциях должно быть в фокусе внимания при выработке мер по ускорению оборачиваемости грузовых вагонов.

Следует отметить, что в отдельные годы рассматриваемого периода наблюдалась совершенно иная картина. Например, в 2018 г. общая темпоральная емкость пробега вагона была незначительно ниже, чем в 2017 г. При этом время простоя на технических станциях тогда существенно возросло, но этот рост был с избытком компенсирован снижением времени под грузовыми операциями при неизменных значениях остальных компонентов.

Таким образом, результаты компонентного анализа темпоральной емкости пробега вагона весьма чувствительны к изменению эксплуатационной ситуации на сети железных дорог и позволяют выявлять проблемные зоны в использовании парка грузовых вагонов как в долгосрочном, так и в краткосрочном периоде.

Парадигмой современных экономических исследований является маржинальный анализ, применение которого может быть адаптировано и к специфике железнодорожного транспорта [19] и успешно интегрировано с компонентным. Опираясь на апробированную методологию интеграции маржинального и компонентного анализа, можно выполнить соответствующий анализ темпоральной емкости пробега грузового вагона (рис. 5).

Маржинальный анализ компонентов темпоральной емкости пробега вагона (рис. 5) позволяет раскрыть дополнительные аспекты по сравнению с анализом динамики их средних величин (рис. 4). Он свидетельствует о том, что на каждые 100 км прироста полного рейса вагона в рассматриваемый период затрачивалось свыше 29 ч. Безусловно, этот прирост времени распределялся на всем рейсе вагона, а не был связан с его маржинальной частью, но сам результат сопоставления дополнительного расстояния, проходимого вагоном, и дополнительного времени весьма показателен как свидетельство значимости проблемы замедления оборачиваемости вагонов в рассматриваемый период.

Об этом же свидетельствует и тот факт, что маржинальная величина темпоральной емкости пробега

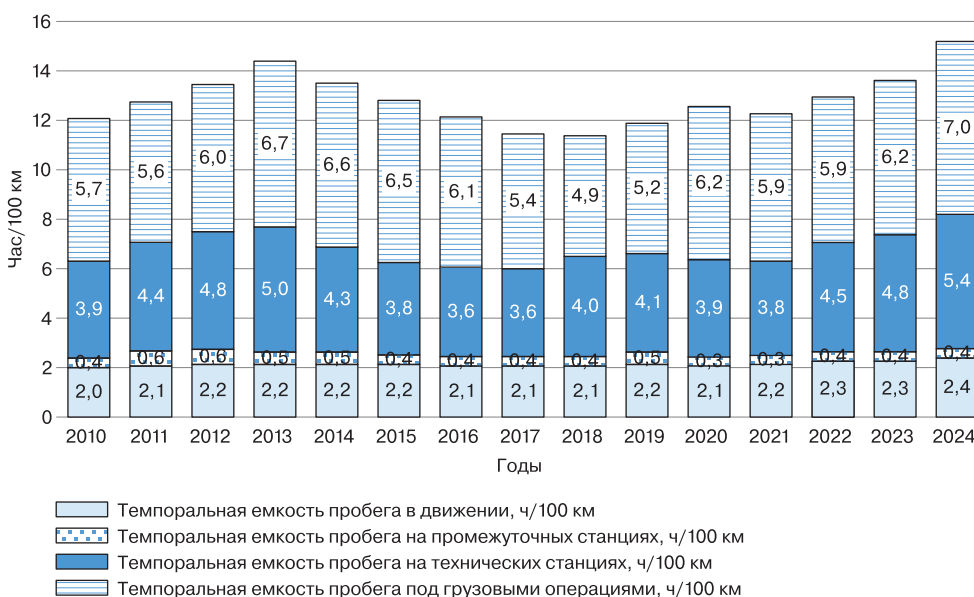


Рис. 4. Компонентный анализ темпоральной емкости пробега грузового вагона, ч/100 км*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 4. Component analysis of the temporal capacity of freight car range, h/100 km*

* Source: compiled by the authors according to the research



Рис. 5. Маржинальный анализ темпоральной емкости пробега грузового вагона, ч/100 км*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 5. Marginal analysis of the temporal capacity of freight car mileage, h/100 km*

* Source: compiled by the authors according to the research

вагона в рассматриваемый период примерно вдвое превышает ее среднее значение. При этом дополнительный простой под грузовыми операциями составил 12,8 ч, т. е. более полусуток в расчете на 100 км, и этот компонент лидирует в маргинальном значении темпоральной емкости пробега вагонов. Дополнительный простой на технических станциях составил почти полсуток. Приросты времени в движении и на промежуточных станциях не столь велики, но суммарно значимы и свидетельствуют о замедлении продвижения вагонов по участкам сети железных дорог. Таким образом, маржинальный анализ компонентов темпоральной емкости пробега грузового вагона позволяет углубить понимание происходящих изменений использования вагонного парка.

Обсуждение. Показательным является сопоставление динамики темпоральной емкости пробега вагона с динамикой рассмотренных выше традиционных и альтернативных показателей использования вагонного парка (рис. 6).

Значение оборота вагона в рассматриваемом периоде минимально в 2010 г. В дальнейшем, несмотря на сокращение его величины в отдельные годы, начальный уровень ни разу не достигался, что, как установлено выше, связано в том числе с влиянием увеличения средней дальности перевозок и, соответственно, рейса вагона. При этом максимальные значения среднесуточного пробега вагона и среднесуточного полезного пробега достигались в 2018 г., а скорости продвижения грузового вагона — в 2017 г. Таким образом, существующие показатели использования грузовых вагонов дают неоднозначную оценку.

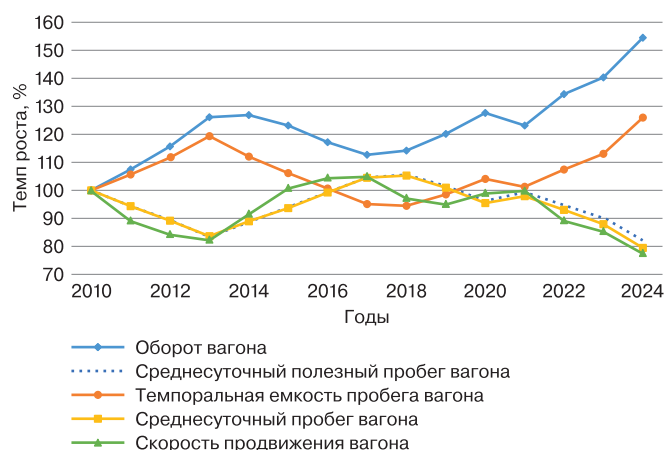


Рис. 6. Сопоставление динамики темпоральной емкости пробега грузового вагона и иных показателей использования вагонного парка, %*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 6. Comparison of the dynamics of the temporal capacity of freight car mileage and other car fleet utilization indicators, %*

* Source: compiled by the authors according to the research

Динамика темпоральной емкости пробега грузового вагона подтверждает, что в рассматриваемом периоде наиболее быстро грузовые вагоны оборачивались в 2018 г. Примечательно ее сравнение с динамикой оборота вагона. Оборот вагона в течение рассматриваемого периода демонстрировал ускорение только в 2015–2017 гг. и в 2021 г., при этом, как уже отмечено, ни разу не достигнув уровня 2010 г. Темпоральная емкость пробега вагона, характеризующая реальное ускорение или замедление его оборачиваемости, независимое от влияния полного рейса, сокращалась в течение более длительного периода (2014–2018 гг.) и также в 2021 г. При этом она была ниже уровня 2010 г. на протяжении трех лет (2017–2019 гг.), а в 2021 г. приблизилась к этому уровню.

Показательно также сопоставление компонентной динамики оборота вагона (рис. 1) и темпоральной емкости пробега вагона (рис. 4). Так, время нахождения вагона на промежуточных станциях за оборот в рассматриваемом периоде существенно возросло — на 23,4%. Но так как этот рост приблизительно соответствует увеличению полного рейса вагона (на 22,7%), существенного влияния на реальную оборачиваемость вагонного парка время нахождения на промежуточных станциях не оказало, что и подтверждается компонентным и маргинальным анализом темпоральной емкости пробега вагона (рис. 4–5).

Использование показателя «темпоральная емкость пробега грузового вагона» позволяет достаточно просто и обоснованно осуществлять экономическую оценку использования парка грузовых вагонов и резервов его улучшения.

Во-первых, с его помощью может осуществляться актуальная стоимостная оценка пробега вагона в расчете на 100 км (C_{100} , руб./100 ваг.-км) (2):

$$C_{100} = T_{e_{S_B}} e_{B-ч}, \quad (2)$$

где $e_{B-ч}$ — расходная ставка на 1 вагоно-час грузового вагона, руб./ваг.-ч.

Во-вторых, может оцениваться потенциальная годовая экономия (Θ , руб.) от снижения темпоральной емкости пробега грузового вагона до целевого уровня (3):

$$\Theta = \Delta T_{e_{S_B}} e_{B-ч} S_B n_{\text{раб}} N_{\text{год}} / 100, \quad (3)$$

где $\Delta T_{e_{S_B}}$ — потенциал снижения темпоральной емкости пробега грузового вагона, который может быть определен как разность существующего значения и целевого значения, оценка которого описана ниже;

S_B — среднесуточный пробег грузового вагона, км;

$n_{\text{раб}}$ — среднесуточный рабочий парк грузовых вагонов, ваг.;

$N_{\text{год}}$ — число дней в году.

Так, для условий 2024 г., принимая значение $e_{B-ч}$ по данным [20], стоимостная оценка стокилометрового пробега грузового вагона составляет 376,20 руб.

При определении потенциала снижения темпоральной емкости пробега грузового вагона, т.е. реального ускорения оборачиваемости вагонного парка, можно руководствоваться:

- набором (программой) конкретных мероприятий по сокращению отдельных компонентов темпоральной емкости пробега вагонов;
- фактически достигавшимися минимальными значениями темпоральной емкости пробега вагона, принимаемыми в качестве эталонных.

Выполненный анализ позволил выявить такое значение (11,4 ч/100 км), достигнутое в 2018 г. В условиях 2024 г. при обеспечении темпоральной емкости пробега вагона на указанном уровне годовая экономия, рассчитанная по формуле (3), составила бы 64,6 млрд рублей. Другими словами, экономический потенциал реального ускорения оборачиваемости грузовых вагонов весьма масштабен, однако реализовать его достаточно затруднительно. Выход на минимальное значение темпоральной емкости пробега вагона в 2018 г. стал результатом ее пятилетнего неуклонного сокращения (рис. 3). Для достижения такого значения или хотя бы приближения к нему необходимо совершенствование организации вагонопотоков [21] и технологий станционной работы. Серьезного внимания заслуживают инновационные предложения по сокращению простаивающих вагонов под грузовыми операциями с использованием современных цифровых решений [20]. Ключевое значение имеет улучшение работы технических станций и их взаимодействия с прилегающими

участками. Эти вопросы находились в фокусе внимания отечественной железнодорожной науки еще в 1970-е гг. [22] и по-новому осмысливаются в современных условиях [23–24].

Реализация результатов новейших научных исследований и разработок должна сыграть важную роль в достижении реального ускорения оборачиваемости грузовых вагонов.

Заключение. Выполненный в статье анализ показателей использования грузовых вагонов позволяет сделать вывод, что при актуальности такой оценки сама система показателей нуждается в совершенствовании. Предложенный новый показатель — темпоральная емкость пробега грузового вагона — позволяет более релевантно оценивать использование вагонного парка, чем традиционно используемый оборот вагона. Использование нового показателя позволит определить целевой (эталонный) уровень оборачиваемости вагонного парка и масштаб возможной экономии при его достижении. Ускорение оборачиваемости вагонного парка должно достигаться за счет совершенствования организации вагонопотоков, реализации инновационных технологий станционной и поездной работы. При этом снижение темпоральной емкости пробега грузового вагона может выступать и как целевой показатель разрабатываемых мер, и как критерий успешности их реализации, для чего целесообразно осуществлять его мониторинг, а также компонентный и маржинальный анализ.

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. Von Mises L. *Human Action: A Treatise on Economics*. Mansfield Centre, CT: Martino Fine Books; 2012. 908 p.
2. Сотников Е.А., Левин Д.Ю., Алексеев Г.А. История развития системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте (отечественный и зарубежный опыт). М.: Техинформ, 2007. 237 с. EDN: <https://elibrary.ru/tuaplt>.
3. Sotnikov E. A., Levin D. Yu., Alekseev G. A. *History of the development of the control system of the transportation process in railway transport (domestic and foreign experience)*. Moscow: Tekhinform; 2007. 237 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tuaplt>.
3. Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием подвижного состава. Том 1. Грузовые вагоны / под ред. С. М. Захарова. М.: ВНИИЖТ, 2021. 456 с. EDN: <https://elibrary.ru/xwnntt>.

- Generalization of global experience in heavy-haul transportation: Rolling stock maintenance management. Volume 1. Freight cars* / red. by S. M. Zakharov. Moscow: VNIIZhT; 2021. 456 p. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/xwnntt>.
4. Lu F., Wang L., Hu J., Zhang Q., Li X. Integrated optimization of train diagrams and rolling stock circulation with full-length and short-turn routes of virtual coupling trains in urban rail transit. *Applied Sciences*. 2024;14(12):5006. <https://doi.org/10.3390/app14125006>. EDN: <https://elibrary.ru/sunhkn>.
 5. Wang R., Zhou M., Wang H., Yang B., Dong H., Wang F.-Yu. Coordinated rescheduling of train timetable and crew scheme for passenger-freight collinear railway. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*. 2024;11(5):5828–5838. <https://doi.org/10.1109/TCSS.2024.3379214>.
 6. Polyanov V.V., Atuchin V.V., Bessonenko S.A. Stochastic timetable disturbances in heavy haul and extra-long train traffic. *T-Comm*. 2025;19(2):53–60. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2025-19-2-53-60>. EDN: <https://elibrary.ru/sxjuf>.
 7. Гулый И. М., Теребова С. В. Инновационные средства обеспечения поставок агропродовольственных грузов между Россией и Узбекистаном // Экономика Центральной Азии. 2023. Т. 7, № 4. С. 347–362. <https://doi.org/10.18334/asia.7.4.120260>. EDN: <https://elibrary.ru/rxiipb>.
 - Guly I. M., Terebova S. V. Innovative means of ensuring the supply of agro-food goods between Russia and Uzbekistan. *Economy of Central Asia*. 2023;7(4):347–362. (In Russ.). <https://doi.org/10.18334/asia.7.4.120260>. EDN: <https://elibrary.ru/rxiipb>.
 8. Баротов Ж., Кабулов Ж., Мехриев М. Мероприятия по достижению экономической эффективности путем ускорения срока доставки груза в логистической цепи // Iqtisodiy Taraqqiyot va Tahlil. 2025. Т. 3, № 4. С. 49–58. <https://doi.org/10.60078/2992-877X-2025-vol3-iss4-pp49-58>. EDN: <https://elibrary.ru/pldqar>.
 - Barotov J., Qobulov J., Mekhriev M. Activities aimed at achieving economic efficiency through the acceleration of cargo delivery times within the logistics chain. *Iqtisodiy Taraqqiyot va Tahlil*. 2025;3(4):49–58. (In Uzb.). <https://doi.org/10.60078/2992-877X-2025-vol3-iss4-pp49-58>. EDN: <https://elibrary.ru/pldqar>.
 9. Котенко О. В. Система измерителей работы железных дорог и ее развитие в трудах И. И. Васильева // Феноменология транспорта в литературе и искусстве: прошлое, настоящее, будущее. Материалы III Междунар. науч.-метод. конф. Гомель: БелГУТ, 2023. С. 119–123. EDN: <https://elibrary.ru/ohawkt>.
 - Kotenko O. V. The system of indicators of railway operations and its development in the works of I. I. Vasiliev. *Phenomenology of Transport in Literature and Art: Past, Present, Future: Proceedings of the Third International Scientific and Methodological Conference*. Gomel: Belarusian State University of Transport; 2023. P. 119–123. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ohawkt>.
 10. Хачатуров Т. С. Экономика транспорта. М.: АН СССР, 1959. 587 с.
 - Khachaturov T. S. *Economics of Transport*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR; 1959. 587 p. (In Russ.).
 11. Белов И. В., Персианов В. А. Экономическая теория транспорта в СССР: Исторический опыт, современные проблемы и решения, взгляд в будущее. М.: Транспорт, 1993. 415 с.
 - Belov I. V., Persianov V. A. *Economic theory of transport in the USSR: Historical experience, modern problems and solutions, a look into the future*. Moscow: Transport; 1993. 415 p. (In Russ.).
 12. Мандриков М. Е., Смехова Н. Г., Шульга А. М., Сугрובה М. В. Затраты на грузовые перевозки по участкам сети железных дорог. М.: Транспорт, 1991. 223 с.
 - Mandrikov M. E., Smekhova N. G., Shulga A. M., Sugrobova M. V. *Costs of freight transportation by railway network sections*. Moscow: Transport; 1991. 223 p. (In Russ.).
 13. Терешина Н. П. Экономическое регулирование и конкурентоспособность перевозок. М.: ЦНТБ МПС РФ, 1994. 132 с.
 - Teryoshina N. P. *Economic regulation and competitiveness of transportation*. Moscow: TsNTB MPS RF; 1994. 132 p. (In Russ.).
 14. Хусаинов Ф. И. Уроки статистики: оборот вагона // Вестник транспорта. 2017. № 3. С. 28–32. EDN: <https://elibrary.ru/yfmlur>.
 - Khusainov F. I. Lessons of statistics: wagon turnover. *Transport Bulletin*. 2017;(3):28–32. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/yfmlur>.
 15. Псеровская Е. Д., Жаркова А. А., Дружинина М. Г. Показатели взаимодействия ОАО «РЖД», грузоотправителей и операторских компаний // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 2 (61). С. 5–15. https://doi.org/10.52170/1815-9265_2022_61_5. EDN: <https://elibrary.ru/xnvdgl>.
 - Pserovskaya E. D., Zharkova A. A., Druzhinina M. G. Indicators of interaction between Russian Railways, shippers, and operating companies. *Bulletin of Siberian State University of Railway Transport*. 2022;(2(61)):5–15. (In Russ.). https://doi.org/10.52170/1815-9265_2022_61_5. EDN: <https://elibrary.ru/xnvdgl>.
 16. Мачерет Д. А. Рыночные категории и ценовая политика // Железнодорожный транспорт. 1994. № 1. С. 37–45.
 - Macheret D. A. Market categories and pricing policy. *Railway Transport*. 1994;(1):37–45. (In Russ.).
 17. Мачерет Д. А., Мачерет А. А. Оценка эффективности использования грузовых вагонов // Экономика железных дорог. 2019. № 11. С. 25–31. EDN: <https://elibrary.ru/npdmc>.
 - Macheret D. A., Macheret A. A. Evaluation of freight cars usage efficiency. *Economics of Railways*. 2019;(11):25–31. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/npdmc>.
 18. Хусаинов Ф. И. К вопросу об уточнении теоретического подхода к расчету потребного парка грузовых вагонов // Современные экономические проблемы развития и эксплуатации транспортной инфраструктуры. М.: Прометей, 2025. С. 231–236. EDN: <https://elibrary.ru/vzeixf>.
 - Khusainov F. I. On the issue of clarifying the theoretical approach to calculating the required fleet of freight cars. *Modern Economic Problems of Development and Operation of Transport Infrastructure*. Moscow: Prometei; 2025. P. 231–236. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vzeixf>.
 19. Мачерет Д. А., Валеев Н. А. Анализ эффективности деятельности в сфере железнодорожного транспорта: новые подходы // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике и экономике. 2025. № 6 (121). С. 20–25. EDN: <https://elibrary.ru/gtdcrq>.
 - Macheret D. A., Valeev N. A. Efficiency analysis in the railway sector: new approaches. *Transport of the Russian Federation*. 2025;(6(121)):20–25. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/gtdcrq>.
 20. Федорова М. В. Экономическая оценка совершенствования перевозочного процесса за счет внедрения технологии блокчейн // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 1. С. 152–167. <https://doi.org/10.17816/transsys628807>. EDN: <https://elibrary.ru/tdybsk>.
 - Fedorova M. V. Feasibility study of the transportation process improvement due to blockchain implementation. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(1):152–167. (In Russ.). <https://doi.org/10.17816/transsys628807>. EDN: <https://elibrary.ru/tdybsk>.
 21. Бородин А. Ф., Николаев К. Ю., Шиндеров Р. В., Проzorov В. В. Организация вагонопотоков: условия, ограничения, цифровые решения // Железнодорожный транспорт. 2025. № 6. С. 11–19. EDN: <https://elibrary.ru/ppyttu>.
 - Borodin A. F., Nikolaev K. Yu., Shinderov R. V., Prozorov V. V. Organization of wagon flows: conditions, constraints, digital solutions. *Railway Transport*. 2025;(6):11–19. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ppyttu>.
 22. Сотников И. Б. Взаимодействие станций и участков железных дорог. М.: Транспорт, 1976. 270 с.
 - Sotnikov I. B. *Interaction of railway stations and sections*. Moscow: Transport; 1976. 270 p. (In Russ.).
 23. Мугинштейн Л. А., Мехедов М. И. Вопросы организации стабильного пропуска транзитных грузовых поездов на направлениях железных дорог с учетом технических и технологических особенностей работы технических станций и перегонов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2016. Т. 75, № 1. С. 3–11. EDN: <https://elibrary.ru/vmfswv>.

Muginshtein L. A., Mekhedov M. I. Issues of organization of stable passage of transit freight trains on the railway lines in accordance with technical and technological features of operation of technical stations and running sections. *Russian Railway Science Journal*. 2016;75(1):3–11. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vmfsww>.

24. Мехедов М. И., Мугинштейн Л. А. О процессе взаимодействия технических станций и перегонов при пропуске поездопотоков // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79, № 2. С. 59–65. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-59-65>. EDN: <https://elibrary.ru/sakbkw>.

Mekhedov M. I., Muginshtein L. A. On the process of interaction between technical stations and hauls when passing train flows. *Russian Railway Science Journal*. 2020;79(2):59–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-2-59-65>. EDN: <https://elibrary.ru/sakbkw>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитрий Александрович МАЧЕРЕТ,

д-р экон. наук, профессор, первый заместитель председателя Объединенного ученого совета ОАО «РЖД», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1); профессор, Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), SPIN-код: 9138-4634, <https://orcid.org/0000-0002-1322-3030>

Надир Абдулхамитович ВАЛЕЕВ,

канд. экон. наук, доцент, эксперт Объединенного ученого совета ОАО «РЖД», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), SPIN-код: 5515-7613, <https://orcid.org/0000-0003-0594-7538>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry A. MACHERET,

Dr. Sci. (Econ.), Professor, First Deputy Chairman, Joint Scientific Council of JSC "Russian Railways", Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.);

Professor, Russian University of Transport (127994, Moscow, bldg. 9, 9, Obratsova St.), SPIN-code: 9138-4634, <https://orcid.org/0000-0002-1322-3030>

Nadir A. VALEEV,

Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Expert, Joint Scientific Council of JSC "Russian Railways", Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), SPIN-code: 5515-7613, <https://orcid.org/0000-0003-0594-7538>

ВКЛАД АВТОРОВ

Дмитрий Александрович МАЧЕРЕТ. Постановка цели и задач исследования. Выполнение теоретической части исследования (50 %).

Надир Абдулхамитович ВАЛЕЕВ. Выполнение эмпирической части исследования. Написание статьи (50 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Dmitry A. MACHERET. Setting the research goals and objectives. Completing the theoretical part of the research (50 %).

Nadir A. VALEEV. Completing the empirical part of the research. Article preparation (50 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

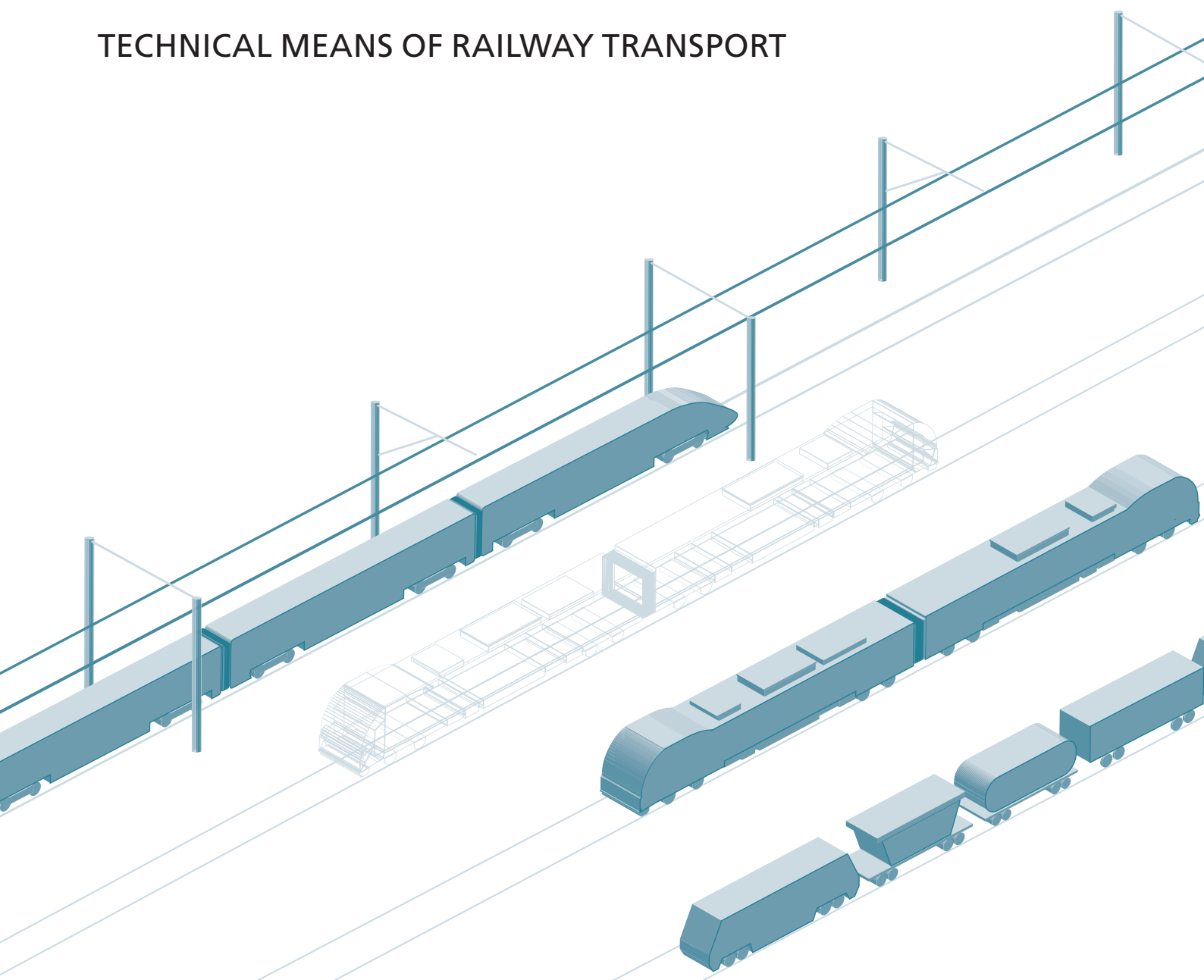
The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 22.12.2025, рецензия от первого рецензента получена 16.03.2026, рецензия от второго рецензента получена 27.03.2026, рецензия от третьего рецензента получена 08.04.2026, принята к публикации 14.04.2026.

The article was submitted 22.12.2025, first review received 16.03.2026, second review received 27.03.2026, third review received 08.04.2026, accepted for publication 14.04.2026.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 625.143.54

EDN: <https://elibrary.ru/achyfi>DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-135-151>

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



Особенности усталостного разрушения упругих клемм промежуточных рельсовых скреплений

Л. Р. Ботвина¹, Ю. А. Демина¹, В. О. Березин²✉, М. Р. Тютин¹, А. В. Замуховский²

¹Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

²Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема повышения качества и продления эксплуатационного ресурса рельсовых скреплений, в частности, упругих клемм, стала наиболее острой в настоящее время. Причиной является развитие высокоскоростного и грузонапряженного движения поездов. В эксплуатации упругая клемма воспринимает преднагрузку монтажным усилием и динамическое нагружение циклами догружения и частичной разгрузки, обусловленное воздействием подвижного состава. Усталостная долговечность является наиболее важным параметром, определяющим надежность клеммы и безопасность движения поездов. Цель настоящего исследования — анализ основных механизмов усталостного разрушения трех клемм, испытанных при различных режимах циклического нагружения (по стандартной и ускоренной методикам испытаний) путем исследования изломов.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования была выбрана упругая клемма ЦП 369.102 (клемма ЖБР-65). Испытания были выполнены и стандартным методом, удовлетворяющим требованиям ГОСТ 33186–2014, и ускоренным методом Локати. При анализе изломов клеммы применялся фрактографический метод.

Результаты. Установлено подобие процессов, приводящих к усталостному разрушению для клемм, подвергнутых испытаниям по стандартному и ускоренному методам. Проведен фрактографический анализ изломов трех упругих клемм. Для каждой из клемм представлен анализ механизма усталостного разрушения. У одной клеммы, испытанной по стандартному методу, в очаге зарождения трещины было найдено неметаллическое включение.

Обсуждение и заключение. Во всех рассмотренных случаях разрушение сопровождалось зарождением усталостных микротрещин от неметаллических включений или дефектов на поверхности прутка клеммы. Действующий на данный момент стандарт не нормирует загрязненность неметаллическими включениями сталей, предназначенных для изготовления клемм. Целесообразно провести дополнительные исследования для оценки влияния неметаллических включений на усталостную долговечность клемм.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: промежуточное рельсовое скрепление, клемма, фрактография, сложное напряженно-деформированное состояние, среднее напряжение цикла, излом, усталостная долговечность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ботвина Л. Р., Демина Ю. А., Березин В. О., Тютин М. Р., Замуховский А. В. Особенности усталостного разрушения упругих клемм промежуточных рельсовых скреплений // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2026. Т. 85, № 2. С. 135–151. EDN: <https://elibrary.ru/achyfi>.

Original article
UDK 625.143.54
EDN: <https://elibrary.ru/achyfi>
DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-135-151>
Scientific specialty: 2.9.2. Railway track, survey and design of railways



Investigation of fatigue fracture features in elastic clamps of railway fastening systems

Ludmila R. Botvina¹, Yulia A. Demina¹, Vadim O. Berezin²✉,
Marat R. Tyutin¹, Alexander V. Zamukhovskiy²

¹Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

²Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In this article, a study was conducted focusing on the investigation of fatigue fracture characteristics of elastic clamps used in railway fastening systems, which were subjected to fatigue tests following standard and accelerated methodologies. The problem of improving the quality and extending the service life of rail fasteners, particularly elastic clamps, has become the most acute at the present time. The reason is the development of high-speed and heavy train traffic. In operation, the elastic clamp perceives preloading by mounting force and dynamic loading by cycles of preloading and partial unloading due to the impact of rolling stock. Fatigue life is the most important parameter determining clamps reliability and train safety. The purpose of this study is to analyse the main mechanisms of fatigue fracture of three clamps tested under various cyclic loading modes (according to standard and accelerated test methods) by examining fatigue fracture surfaces.

Materials and methods. The elastic clamp CP 369.102 (clamp ZhBR-65) was chosen as the object of the study. The tests were performed using both the standard method that meets the requirements of GOST 33186–2014 and the accelerated Locati method. Fractographic method was used in the analysis of clamps fatigue fracture surfaces.

Results. The similarity of processes leading to fatigue fracture has been established for clamps tested using standard and accelerated methods. A fractographic analysis was conducted on the fatigue fracture surfaces of three elastic clamps. An analysis of the fatigue fracture mechanism is provided for each clamp. For the clamp tested by the standard method, a non-metallic inclusion was found at the crack initiation site.

Discussion and conclusion. In all studied cases, the fracture of the clamps was accompanied by the initiation of fatigue microcracks originating from inclusions or defects on the lateral surface (the rod surface of the clamp). Current standard does not normalise contamination with non-metallic inclusions intended for the manufacture of clamps. It is reasonable to conduct additional studies in order to assess the influence of non-metallic inclusions in the steel on the fatigue durability of the clamps.

KEYWORDS: intermediate rail fastening, clamp, fractography, complex stress-strain condition, mean stress, fracture, fatigue durability

FOR CITATION: Botvina L.R., Demina Yu.A., Berezin V.O., Tyutin M.R., Zamukhovskiy A.V. Investigation of fatigue fracture features in elastic clamps of railway fastening systems. *Russian Railway Science Journal*. 2026;85(2):135–151. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-135-151>.

✉ berezin.vadim@bk.ru (V.O. Berezin)

Введение. Среди наиболее важных параметров, определяющих надежность клеммы рельсового скрепления и влияющих на безопасность движения поездов, следует выделить усталостную долговечность. Компании — лидеры в сфере проектирования упругих клемм приводят в своих информационных изданиях¹ для каждой клеммы величину размаха перемещений рельса, при которой обеспечивается требуемая усталостная долговечность изделия в процессе усталостных испытаний или эксплуатации. Этот параметр в данном случае является аналогом «привычного» предела выносливости.

Для определения среднего значения предела выносливости материалов или конструкций в статистической постановке широко применяется метод лестницы, при котором образцы испытывают при напряжениях, близких к предполагаемому пределу выносливости, по следующему правилу: если образец не разрушился до базового числа циклов, напряжения для следующего образца увеличивают на фиксированный шаг, если разрушился — напряжения снижают на фиксированный шаг [1–3]. Для сокращения времени усталостных испытаний при определении среднего значения предела выносливости изделий применяют методы ускоренных испытаний [4–6]. Наиболее эффективным из данных методов по результатам анализа ряда исследований^{2, 3, 4} признан метод Локати [4]. В основу метода положена гипотеза линейного накопления повреждений Пальмгрена — Майнера, при которой усталостное повреждение материала пропорционально наработанному числу циклов. Согласно этой гипотезе, при нестационарном нагружении усталостное разрушение испытываемого образца должно происходить при сумме относительных долговечностей $(\sum \frac{n_i}{N_i})$, равной единице. Здесь n_i — число циклов, накопленное изделием при i -м уровне нагрузки; N_i — долговечность (ресурс) изделия при том же уровне нагрузки. Нагрузка на изделие увеличивается ступенями до разрушения, и на каждом уровне нагрузки изделие нарабатывает n_i циклов.

После проведения испытаний, при которых разрушение образца происходит на одной из ступеней, переходят к обработке результатов путем введения условных кривых A , B , V в полулогарифмических коор-

динах (реальная усталостная кривая изделия лежит внутри диапазона этих кривых) и для каждой кривой подсчитывают относительные долговечности, исходя из трассы испытаний (рис. 1). Зная значения $n_0, n_1, n_2, \dots, n_i$ и определив по каждой из условных кривых усталости соответствующие значения $N_0, N_1, N_2, \dots, N_i$ для каждой кривой усталости, можно вычислить числовые значения $\sum \frac{n_i}{N_i}$. Таким образом, получают три числовых значения суммы относительных долговечностей, соответствующих трем условным кривым усталости с пределами выносливости $\sigma_{R^a}, \sigma_{R^b}, \sigma_{R^v}$. Затем по графику в координатах $(\sum \frac{n_i}{N_i}; \sigma_R)$ (рис. 2) методом графической интерполяции по кривой I определяется значение предела выносливости σ_{R^y} , соответствующее величине $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$. Это значение считается оценкой предела выносливости методом Локати⁵.

Авторами настоящей работы в целях проверки применимости метода Локати для проведения ускоренных усталостных испытаний упругих клемм были определены средние значения предела выносливости упругой клеммы ЦП 369.102 (клеммы ЖБР-65), рис. 3, двумя методами: лестницы и Локати [7].

Следует отметить, что одиночное испытание на усталость клеммы при определении среднего значения предела выносливости по методу лестницы идентично стандартному испытанию на усталость по ГОСТ 33186–2014⁶. Метод лестницы предъявляет требования только к необходимому количеству испытаний и правилу изменения уровней нагружения в зависимости от результатов предыдущего испытания клеммы на усталость.

Было показано, что среднее значение предела выносливости клеммы ЦП 369.102 (клеммы ЖБР-65), полученное двумя методами, практически совпадает (разница составила 5%), что позволяет рекомендовать метод Локати для усталостных испытаний клемм как альтернативный. Кроме того, существует ряд современных исследований, подтверждающих его эффективность в разных областях науки и техники (железнодорожный транспорт, авиационная техника, медицина и т.д.) [8–11]. В процессе проведения усталостных

¹ High-elasticity rail fastening System 300. Vossloh. URL: https://media.vossloh.com/media/01_product_finder/vfs/pf_system_300/Vossloh_System_300_EN.pdf (дата обращения: 13.04.2026).

² Шварев В. В. Исследование ускоренных методов определения предела выносливости стали в условиях концентрации напряжений: дисс. канд. техн. наук: 05.00.00. М., 1964. 152 с.

³ Соболев В. Л. Исследование, разработка и стандартизация методов ускоренной оценки сопротивления усталости материалов и деталей машин: дисс. канд. техн. наук: 05.02.02. М., 1973. 267 с.

⁴ Олейник Н. В., Скляр С. П. Ускоренные испытания на усталость. Киев: Наукова думка, 1985. 304 с.

⁵ Соболев В. Л. Исследование, разработка и стандартизация методов ускоренной оценки сопротивления усталости материалов и деталей машин.

⁶ ГОСТ 33186–2014. Клеммы пружинные прутковые для крепления рельсов. Технические условия: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 февраля 2015 г. № 93-ст. М.: Стандартинформ, 2015. 5 с.

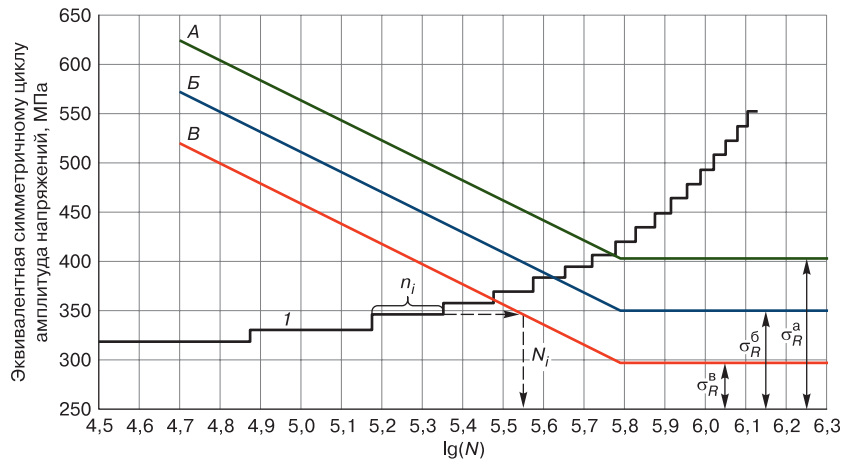


Рис. 1. Условные кривые усталости (*A*, *B*, *B*) и трасса нагружения (*I*) по методу Локати (пример)*:

A — условная кривая усталости, соответствующая вероятности разрушения 95 %; *B* — условная кривая усталости, соответствующая вероятности разрушения 50 %; *B* — условная кривая усталости, соответствующая вероятности разрушения 5 %; σ_R^a — предел выносливости для условной кривой усталости *A*; σ_R^b — предел выносливости для условной кривой усталости *B*; σ_R^B — предел выносливости для условной кривой усталости *B*; n_i — число циклов, накопленное изделием при *i*-м уровне нагрузки; N_i — долговечность (ресурс) изделия при *i*-м уровне нагрузки

* Источник: данные авторов

Fig. 1. Conditional fatigue curves and test route according to the Locati method (example)*:

A — conditional fatigue curve corresponding to a 95 % probability of failure; *B* — conditional fatigue curve corresponding to a 50 % probability of failure; *B* — conditional fatigue curve corresponding to a 5 % probability of failure; σ_R^a — endurance limit for conditional fatigue curve *A*; σ_R^b — endurance limit for conditional fatigue curve *B*; σ_R^B — endurance limit for conditional fatigue curve *B*; n_i — number of cycles accumulated by the component at the *i*-th load level; N_i — service life (durability) of the component at the *i*-th load level

* Source: authors' data

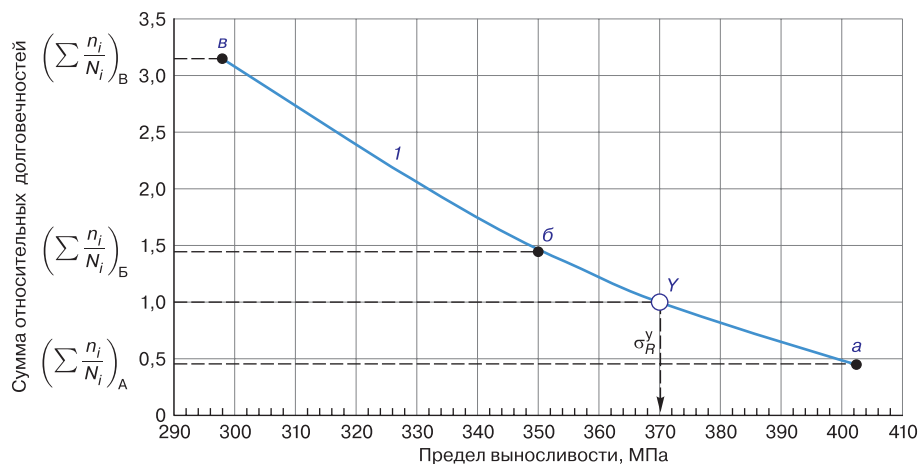


Рис. 2. График для определения предела выносливости по методу Локати (пример)*:

σ_R^y — предел выносливости, соответствующий величине $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$; $\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right)_A$ — сумма относительных долговечностей для условной кривой усталости *A*; $\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right)_B$ — сумма относительных долговечностей для условной кривой усталости *B*; $\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right)_B$ — сумма относительных долговечностей для условной кривой усталости *B*; *I* — кривая по точкам (*a*; ϑ)

* Источник: данные авторов

Fig. 2. Graph for determining the endurance limit using the Locati method (example)*:

σ_R^y — endurance limit corresponding to the value $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$; $\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right)_A$ — the sum of relative durabilities for conditional fatigue curve *A*; $\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right)_B$ — the sum of relative durabilities for conditional fatigue curve *B*; $\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right)_B$ — the sum of relative durabilities for conditional fatigue curve *B*; *I* — curve through points (*a*; ϑ)

* Source: authors' data

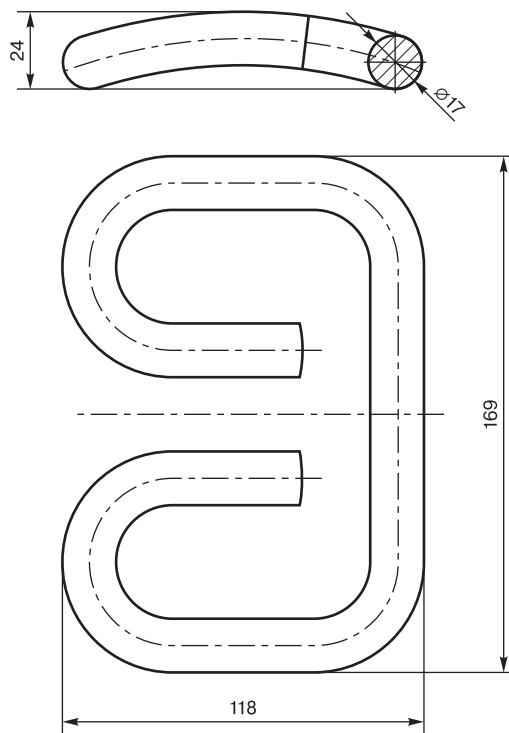


Рис. 3. Эскиз клеммы ЦП 369.102 (клеммы ЖБР-65)*
* Источник: данные авторов

Fig. 3. Sketch of clamp CP 369.102 (clamp ZhBR-65)*
* Source: authors' data

испытаний по методу лестницы была выявлена следующая особенность: упругая клемма могла разрушиться как при 202 тыс. циклов, так и не разрушиться до базы испытаний в 2 млн циклов на уровне нагрузки, соответствующей размаху перемещений рельса 3,1 мм. Полученные результаты привели к необходимости установления причин раннего усталостного разрушения одной из указанных выше клемм. Интерес представляло изучение особенностей усталостного разрушения клемм, испытанных по методу Локати.

Авторы работы [12] выделили следующие факторы, влияющие на усталостные характеристики клемм: обезуглерожженный слой, концентрация напряжений, качество поверхности, неметаллические включения, режимы термообработки. При проведении фрактографического анализа они обнаружили, что причиной преждевременного разрушения исследованной клеммы была твердая частица в поверхностном слое, которая была вдавлена в него в процессе гибки при производстве клеммы и служила концентратором напряжений, приведшим к преждевременному усталостному разрушению.

В работах [13–14] приведена информация о влиянии режимов термообработки на величину обезуглеро-

женного слоя и на микроструктуру материала, что подтверждает их влияние на усталостные характеристики клемм.

В работе [15] на примере клеммы E-clip (упругая клемма компании Pandrol⁷) показано влияние положения клеммы в узле скрепления на ее усталостную долговечность. Так, при наихудшем варианте установки клеммы (прогиб клеммы при установке составил 14 мм, величина зазора между клеммой и анкером — 1,5 мм) ее усталостная долговечность может снижаться до 1,7 % от ожидаемого срока службы.

При оценке усталостных характеристик клемм также важно учитывать влияние сложного напряженно-деформированного состояния и среднего напряжения цикла. Нагружение упругой клеммы при эксплуатации включает в себя преднапряжение монтажным усилием и сопровождается обусловленными нагрузками от подвижного состава, содержащими в себе циклы дополнительного нагружения и частичной разгрузки. Указанные нагрузки вызывают сложное напряженно-деформированное состояние. При этом монтажное прижатие обуславливает высокие средние напряжения цикла в клемме, что оказывает значительное влияние на ее усталостную долговечность [15–18].

В качестве материала клемм используют высокопрочные рессорно-пружинные стали, такие как стали 60С2, 60С2А и 65Г [19]. Для сравнения работоспособности этих сталей в качестве материала клемм в работе [19] оценены их механические свойства в условиях статического и циклического растяжения и изгиба с кручением, оценено напряженно-деформированное состояние путем численного анализа и изучен микрорельеф изломов. В результате было получено, что эксплуатационные свойства менее прочной, но более пластичной стали 60С2 были выше по сравнению со сталью 65Г. Микрорельеф усталостных изломов этой стали был вязкий, в отличие от вязко-хрупкого излома с фасетками меж- и внутризеренного скола стали 65Г. В качестве характеристики релаксационных свойств авторы работы предложили энергию деформации, оцениваемую по снижению усилия прижатия и остаточной деформации клеммы после определенного числа циклов нагружения, определили расположение области с максимальными напряжениями на клеммах и показали, что максимальные значения достигаются в поверхностных слоях клеммы.

Однако более детальное исследование усталости рессорно-пружинных сталей, близких по составу стали 60С2, было выполнено авторами работы [20], особенность которой состояла в том, что она была проведена в широком диапазоне чисел циклов, вплоть до гигациклов, были построены диаграммы усталостного

⁷ Pandrol: Homepage. URL: <https://www.pandrol.com/> (дата обращения: 01.04.2026).

разрушения с оценкой порогового значения трещиностойкости и оценено влияние размера включений на зарождение трещины. Авторы пришли к выводу о том, что включения не влияли на снижение усталостной долговечности вплоть до гигациклового режима, трещина зарождалась не от внутренних дефектов, а от поверхностных трещин, развивающихся по границам структурных элементов в поверхностном слое.

С другой стороны, исследования пружинной стали SWOSC-V (близка по составу стали 60C2XA) [21] приводят к выводам о том, что неметаллические включения являются основными источниками зарождения усталостной трещины в условиях сверхмногоциклового усталости (больше 10^7 циклов), а основными характеристиками включений, влияющими на усталостную долговечность, являются их размер [22] и форма. Показано, что оксиды наиболее опасны при осевом нагружении, а сульфидные включения (MnS) — при кручении из-за их вытянутой формы.

Роль поверхностного слоя клемм в зарождении усталостной трещины в стали 60Si2Mn детально изучена авторами работы [23], которые установили значительное влияние процесса производства клеммы на ее характеристики при эксплуатации. Во время первичного нагрева стального стержня для придания клемме ее формы происходит окисление и обезуглероживание поверхностного слоя с образованием оксида железа. Обезуглероживание снижает характеристики сопротивления усталости, а последующая дробеструйная обработка способствует проникновению оксида железа на глубину 20–50 мкм и зарождению в нем трещин, являющихся очагами усталостного разрушения.

По результатам проведенного анализа можно сделать вывод о том, что усталостная долговечность клемм и характер изломов зависят от свойств материала, технологии изготовления и условий эксплуатации. Причинами зарождения трещин могут быть как дефекты поверхностного слоя, так и неметаллические включения. Их идентификация возможна при фрактографическом исследовании изломов на разных стадиях развития трещины.

С учетом вышеизложенного, цель настоящего исследования состояла в анализе основных механизмов усталостного разрушения трех клемм, испытанных при различных режимах циклического нагружения путем исследования изломов.

Материалы и методы исследования. В качестве метода исследования выбран фрактографический метод.

Анализ макрорельефа изломов трех разрушенных клемм из рессорно-пружинной стали 60C2A выполнен с применением оптического микроскопа ЛОМО МСП-2 и цифрового фотоаппарата Canon, а исследование микрорельефа — с использованием электронного сканирующего микроскопа Jeol JXA-iSP100, оснащенного системой рентгеновского микроанализа.

Химический состав стали по ГОСТ 14959–2016⁸ приведен в табл. 1.

Подготовка к проведению усталостных испытаний. Перед испытаниями на усталость клеммы нагружали три раза в соответствии с ГОСТ 33186–2014⁹ согласно схеме, приведенной на рис. 4.

Нагружение концевых участков клеммы осуществляли через нагружающее приспособление до достижения усилия на штоке испытательной машины, равного 25 кН. Указанное усилие, приложенное к концевым участкам клеммы (половина расстояния между точками опор на упоре и на рельсе), обеспечивает требование ГОСТ 32698–2014¹⁰ к усилию монтажного прижатия рельса к шпале от двух клемм не менее 25 кН.

После контроля величины остаточной деформации клеммы допускались до усталостных испытаний.

Усталостные испытания клемм проводились согласно схеме, представленной на рис. 5 [16].

Важно отметить, что испытание на усталость по методу Локати в части подхода к нагружению упругих клемм отличалось от стандартного испытания по методу лестницы только наличием нескольких ступеней при проведении испытаний (клемма испытывалась со ступенчато возрастающей нагрузкой до разрушения). В связи с этим информацию о методике проведения усталостных испытаний, приведенную ниже, стоит оценивать с учетом указанного выше отличия.

Таблица 1

Химический состав стали 60C2A*

Table 1

Chemical composition of steel 60C2A*

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, % не более	Ni, % не более	Cu, % не более
0,58–0,63	1,6–2,0	0,6–0,9	0,3	0,25	0,2

* Источник: ГОСТ 14959–2016

* Source: GOST 14959–2016

⁸ ГОСТ 14959–2016.Metalloпродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали. Технические условия: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 марта 2017 г. № 112-ст. М.: Стандартинформ, 2017. 27 с.

⁹ ГОСТ 33186–2014. Клеммы пружинные прутковые для крепления рельсов. Технические условия.

¹⁰ ГОСТ 32698–2014. Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 августа 2014 г. № 932-ст. М.: Стандартинформ, 2015. 9 с.

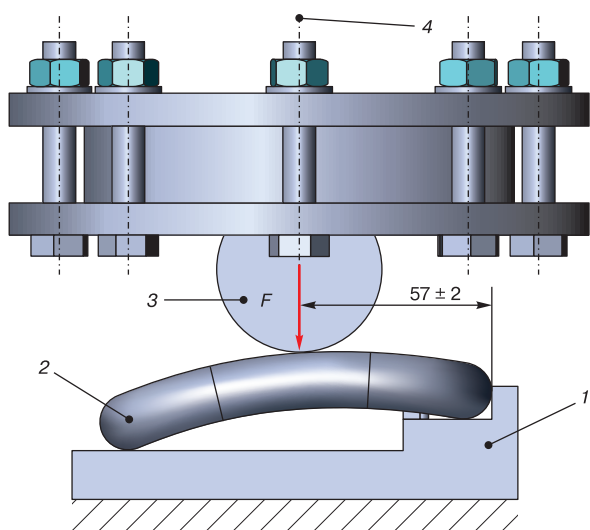


Рис. 4. Схема нагружения клеммы*:
1 — опорная плита; 2 — клемма; 3 — нагружающее приспособление;
4 — ось штока испытательной машины
* Источник: [24]

Fig. 4. Loading scheme*:
1 — base plate; 2 — clamp; 3 — loading device; 4 — testing machine rod axis
* Source: [24]

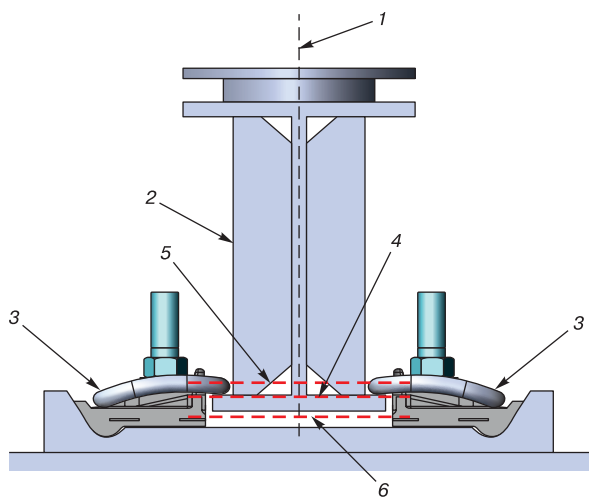


Рис. 5. Схема циклического нагружения клемм при испытаниях на усталость*:
1 — ось штока испытательной машины; 2 — нагружающее приспособление; 3 — клемма; 4 — положение штока № 1;
5 — положение штока № 2; 6 — положение штока № 3
* Источник: [16]

Fig. 5. Scheme of cyclic loading of clamps during fatigue tests*:
1 — testing machine rod axis; 2 — loading device; 3 — clamp; 4 — position of rod No. 1; 5 — position of rod No. 2; 6 — position of rod No. 3
* Source: [16]

Перед началом испытаний шток испытательной машины поднимали вверх до достижения усилия 25 кН, по 12,5 кН на каждую из клемм (положение штока № 1 на рис. 5). В процессе циклического нагружения шток испытательной машины многократно перемещался между положениями № 2 и № 3.

Дополнительное нагружение клеммы (положение штока № 2 на рис. 5) соответствует перемещению вверх относительно положения № 1 на величину, равную 10 % от задаваемого размаха перемещений для конкретного испытания.

Частичное снятие нагрузки на клемму (положение штока № 3 на рис. 5) соответствует перемещению вниз относительно положения № 1 на величину, равную 90 % от задаваемого размаха перемещений для конкретного испытания.

В связи с тем, что ГОСТ 33186–2014¹¹ не предъявляет требований к соотношению перемещений при нагрузке и разгрузке клеммы при проведении усталостных испытаний, оно выбрано в соответствии со стандартом DBS 918 127¹². Указанное соотношение перемещений позволяет обеспечить коэффициент асимметрии цикла при проведении стендовых усталостных испытаний, близкий к коэффициенту асимметрии цикла, в котором работает клемма при эксплуатации.

Трасса испытания по методу Локати (рис. 6) определяется следующими параметрами нагружения: начальное напряжение σ_0 , Па, приращение напряжения при переходе на новый уровень $\Delta\sigma$, Па, количество циклов для уровня нагружений n_i , средняя скорость роста напряжений α , $\frac{\text{Па}}{\text{цикл}}$.

Соответствующая трасса испытаний клемм по методу Локати представлена на рис. 6 [7].

Результаты усталостных испытаний клемм. Клеммы испытывались попарно до разрушения одной из клемм. Всего за время проведения исследований было испытано 14 пар клемм по методу лестницы и 5 пар клемм по методу Локати [7]. В настоящей работе приводятся результаты испытаний для двух клемм, № 11 и № 13, которые были испытаны при ступенчато возрастающей нагрузке по методу Локати, и для одной клеммы № 19, которая была испытана по стандартной методике¹³ на одном уровне нагрузки, соответствующем размаху перемещений рельса 3,1 мм. Указанные клеммы были доведены до разрушения. В работе [16] было установлено, что клеммы ЖБР-65 разрушаются при усталостных испытаниях в двух типичных местах, отмеченных на рис. 7.

¹¹ ГОСТ 33186–2014. Клеммы пружинные прутковые для крепления рельсов. Технические условия.

¹² DBS 918 127. Rail fastenings made of spring steel. Rail clips, tension clips, spring clips: Federal Railway Authority, January 2021. 25 p. URL: https://www.deutschebahn.com/resource/blob/6893394/47c33650ffc9416e71825854f59ac996/DBS918127_V4_0_EN_US-data.pdf (дата обращения: 01.04.2026).

¹³ ГОСТ 33186–2014. Клеммы пружинные прутковые для крепления рельсов. Технические условия.

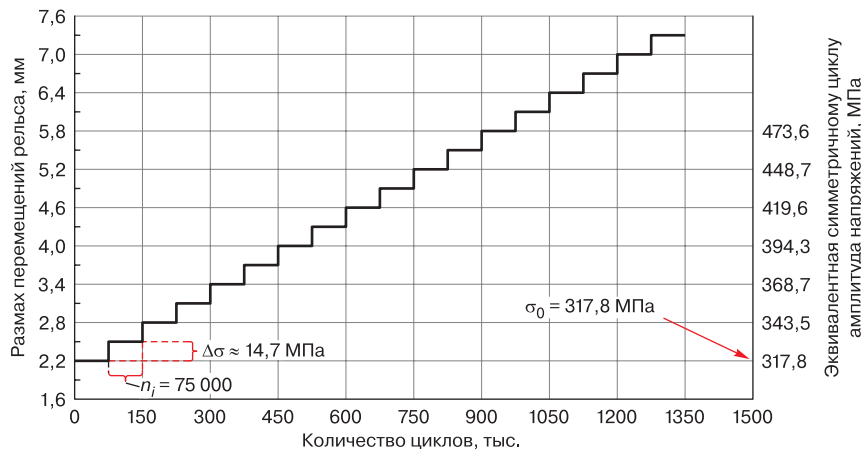


Рис. 6. Трасса испытания по методу Локати*:

σ_0 — начальное напряжение; $\Delta\sigma$ — приращение напряжения при переходе на новый уровень; n_i — количество циклов для уровня нагружений
* Источник: [7]

Fig. 6. Locati method test route*:

σ_0 — initial stress; $\Delta\sigma$ — stress increment when moving to the next level; n_i — number of cycles at a given loading level
* Source: [7]

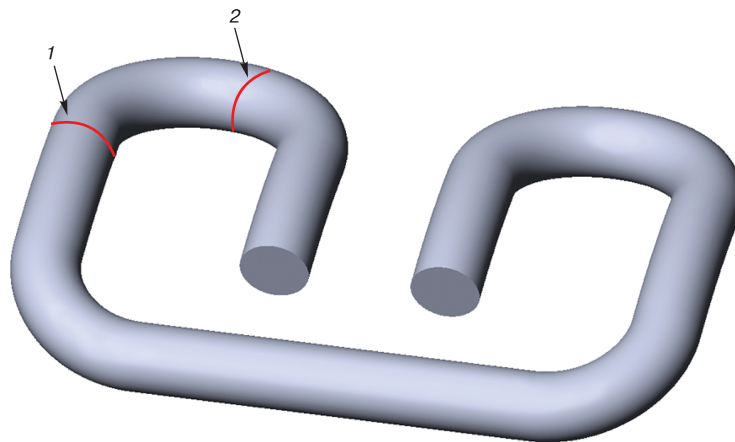


Рис. 7. Типичные места усталостных изломов клеммы ЖБР-65 согласно результатам работы [16] (вид сверху)*:

1 — место усталостного излома № 1; 2 — место усталостного излома № 2

* Источник: данные авторов

Fig. 7. Typical locations of fatigue fractures of the clamp ZhBR-65 according to the results of work [16] (top view)*:

1 — fatigue fracture location No. 1; 2 — fatigue fracture location No. 2

* Source: authors' data

Выбор клемм № 11 и 13 в качестве объекта исследования связан с необходимостью установления основных механизмов усталостного разрушения клемм, испытанных при ступенчато возрастающей нагрузке. Выбор клеммы № 19 в качестве объекта исследования связан с необходимостью установления причин ее раннего разрушения при стационарном нагружении (долговечность клеммы составила 202 тыс. циклов при размахе перемещений рельса 3,1 мм).

Режимы и результаты усталостных испытаний вышеописанных клемм сведены в табл. 2.

Результаты анализа макро- и микрорельефа изломов. На рис. 8–11 представлены картины макро- и микрорельефа усталостного разрушения испытанных клемм, для анализа которых были применены методы фрактографии¹⁴.

Для клеммы № 19 на рис. 8, а в нижней части излома хорошо видна зона стабильного роста усталостной трещины l_f и следующая за ней зона ее ускоренного

¹⁴ Ботвина Л. Р. Основы фрактодиагностики. М.: Техносфера, 2022. 394 с.

роста l_f (показаны стрелками). При большем увеличении наблюдается очаг зарождения трещины, сформировавшийся на микротрещинах боковой поверхности прутка клеммы с включениями внутри них (показан

стрелкой на рис. 8, б). Помимо основного очага обнаруживаются и несколько более мелких очагов (показаны стрелками на рис. 8, в), также развивающихся от поверхностных дефектов.

Таблица 2

Режимы и результаты усталостных испытаний*

Table 2

Modes and results of fatigue testing*

№ клеммы	Начальная эквивалентная симметричному циклу амплитуда напряжений σ_0 , МПа	Приращение напряжения при переходе на новый уровень $\Delta\sigma$, МПа	Кол-во циклов на одном уровне нагружения n_i	Кол-во циклов до разрушения	Кол-во ступеней до разрушения
11	317,8	14,7	75 000	548 695	8
13	317,8	14,7	75 000	809 522	11
19	351,8	—	—	202 000	—

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

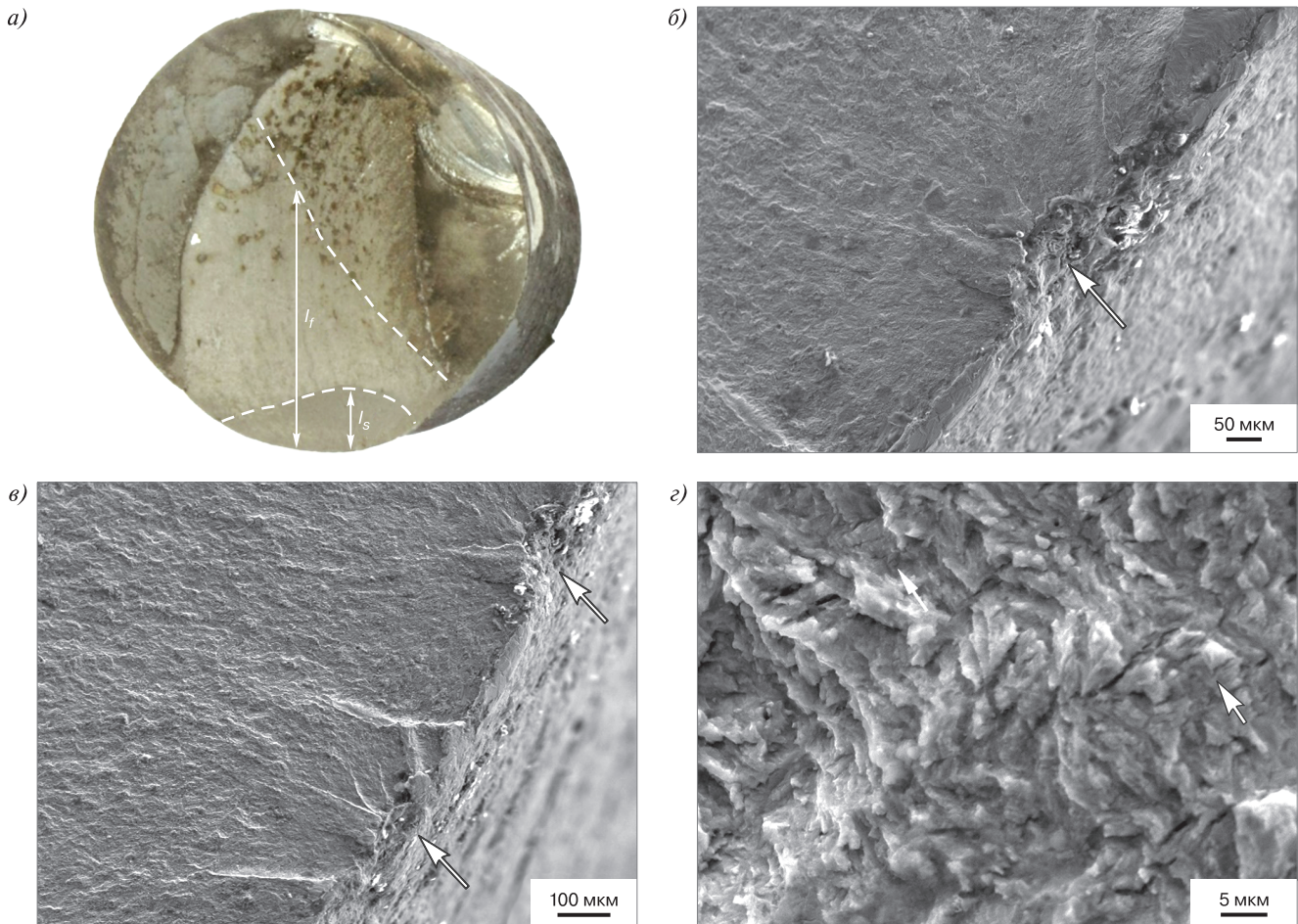


Рис. 8. Рельеф излома клеммы № 19*:
 а — общий вид; б, в — зона зарождения; г — зона стабильного роста l_s

* Источник: данные авторов

Fig. 8. Fracture surface relief of clamp No. 19*:
 а — macro view; б, в — origin zone; г — stable crack growth l_s zone

* Source: authors' data

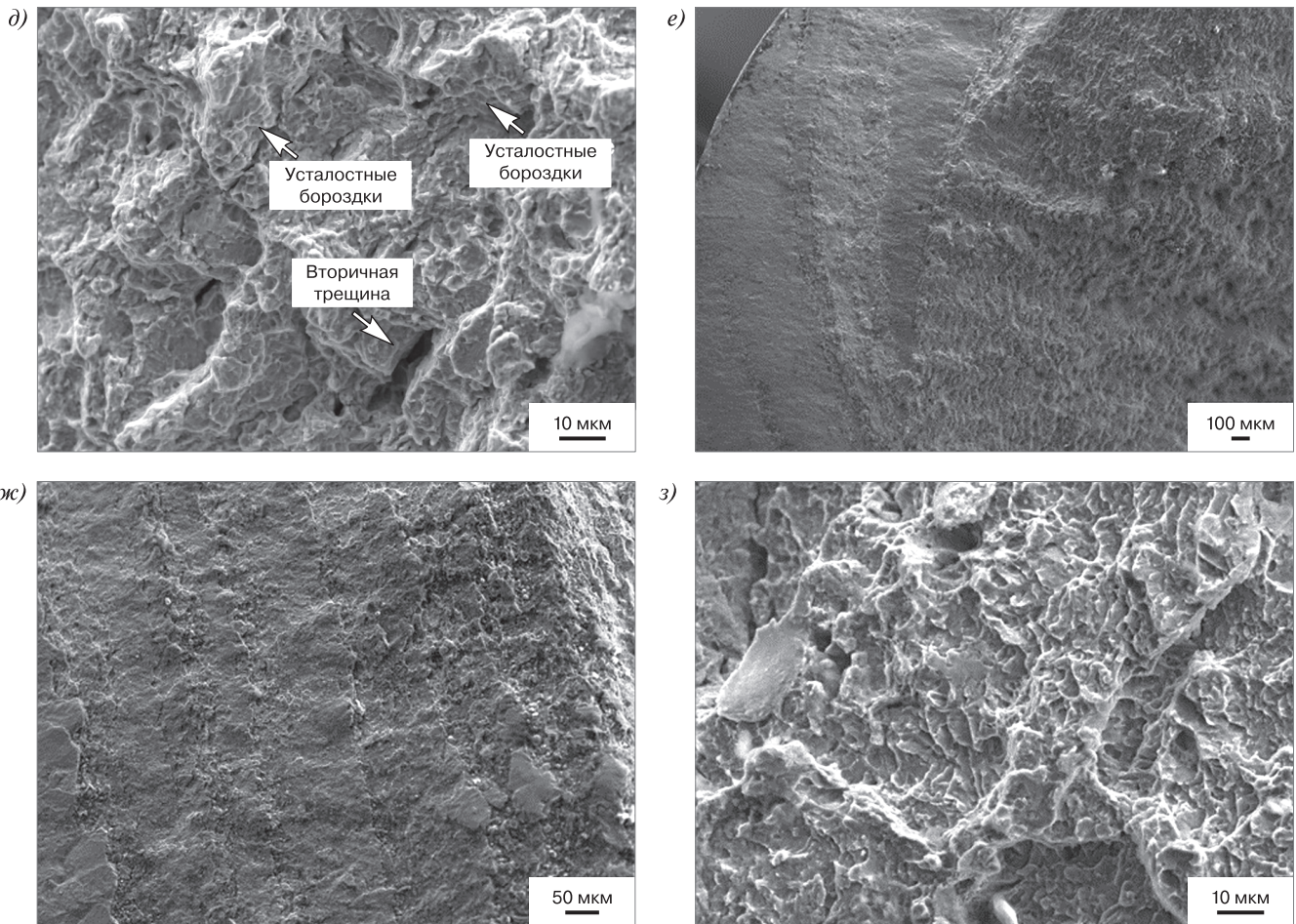


Рис. 8. (Окончание). Рельеф излома клеммы № 19*:
 д — зона ускоренного роста l_f ; е, ж, з — периферийные области
 * Источник: данные авторов

Fig. 8. (Final part). Fracture surface relief of clamp No. 19*:
 д — accelerated crack growth l_f zone; е, ж, з — peripheral areas
 * Source: authors' data

При исследовании микрорельефа в зоне стабильного усталостного развития трещины l_s видны радиальные гребни с бороздчатым микрорельефом между ними (рис. 8, з). Наряду с бороздками (показаны стрелками, рис. 8, д) появляются вторичные трещины, вязкие ямки, участки сглаженного, вероятно, сдвигового разрушения (рис. 8, д) и начинается ускоренный рост трещины l_f , который заканчивается преимущественно вязким ямочным доломом. В периферийных областях (рис. 8, е–з), сопровождающих развитие основной трещины, наблюдаются участки с полосчатым (рис. 8, е, ж) и квазихрупким рельефом (рис. 8, з).

Путем рентгеновского микроанализа на электронном микроскопе Jeol JXA-iSP100 было оценено содержание химических элементов в неметаллических включениях, наблюдаемых в области очага зарождения усталостной трещины клеммы № 19 на рис. 9.

Как следует из табл. 3, неметаллические включения, обнаруженные на поверхности излома клеммы, представлены оксидами кальция (спектры 1 и 2, рис. 9) и алюмосиликатами (спектр 3, рис. 9).

На рис. 10 приведены фрактограммы разрушенной клеммы № 13. Вид макроизлома (рис. 10, а) подобен виду макроизлома клеммы № 19, показанному на рис. 8, а, так же как и микрорельеф в области очага трещины (показан стрелками на рис. 10, б, в) с тем отличием, что в самом очаге не наблюдается включений. Как и на изломе клеммы № 19, обнаруживается типичный для усталостного разрушения бороздчатый микрорельеф (рис. 10, г, д) с вторичными микротрещинами (рис. 10, д) в области ускоренного роста трещины. С увеличением длины макротрещины и переходом к долому число вторичных трещин увеличивается, наблюдаются вязкие ямки

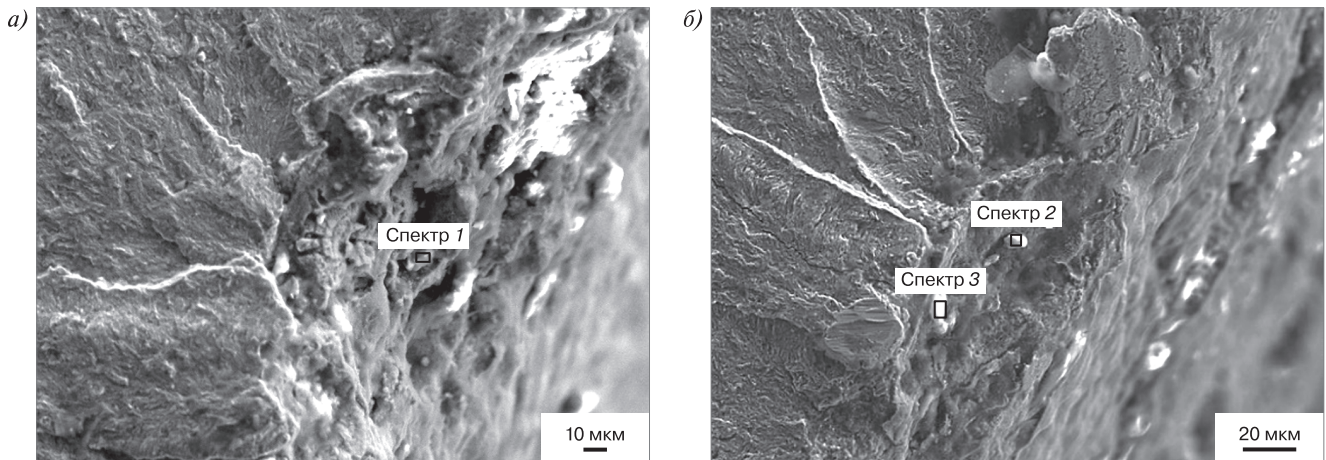


Рис. 9. Очаг зарождения усталостной трещины в клемме № 19, наблюдаемый на рис. 8, б, с указанием места расположения включения и номера спектра*

* Источник: данные авторов

Fig. 9. Fatigue crack origin in clamp No. 19, observed in fig. 8, б, indicating the location of the inclusion and the spectrum number*

* Source: authors' data

Таблица 3

Содержание элементов в неметаллических включениях на изломе клеммы № 19*

Table 3

Content of elements in nonmetallic inclusions on the fracture surface of clamp No. 19*

Спектр	Химический элемент, масс. %											
	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
1	18,91	24,13	1,60	0,83	7,89	1,92	—	0,37	—	25,62	0,55	18,21
2	18,45	35,75	—	14,98	—	—	—	—	—	28,95	—	1,86
3	12,51	38,27	1,34	0,76	14,09	17,62	0,53	0,52	7,28	2,85	0,54	3,71

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

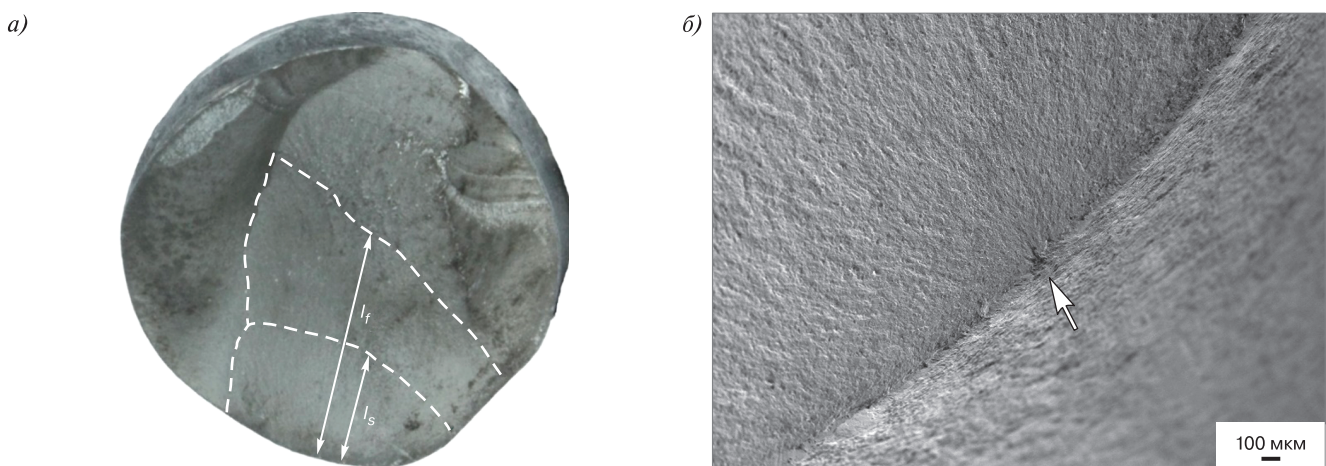


Рис. 10. Рельеф излома клеммы № 13*:

а — общий вид; б — зона зарождения

* Источник: данные авторов

Fig. 10. Fracture surface relief of clamp No. 13*:

а — macro view; б — origin zone

* Source: authors' data

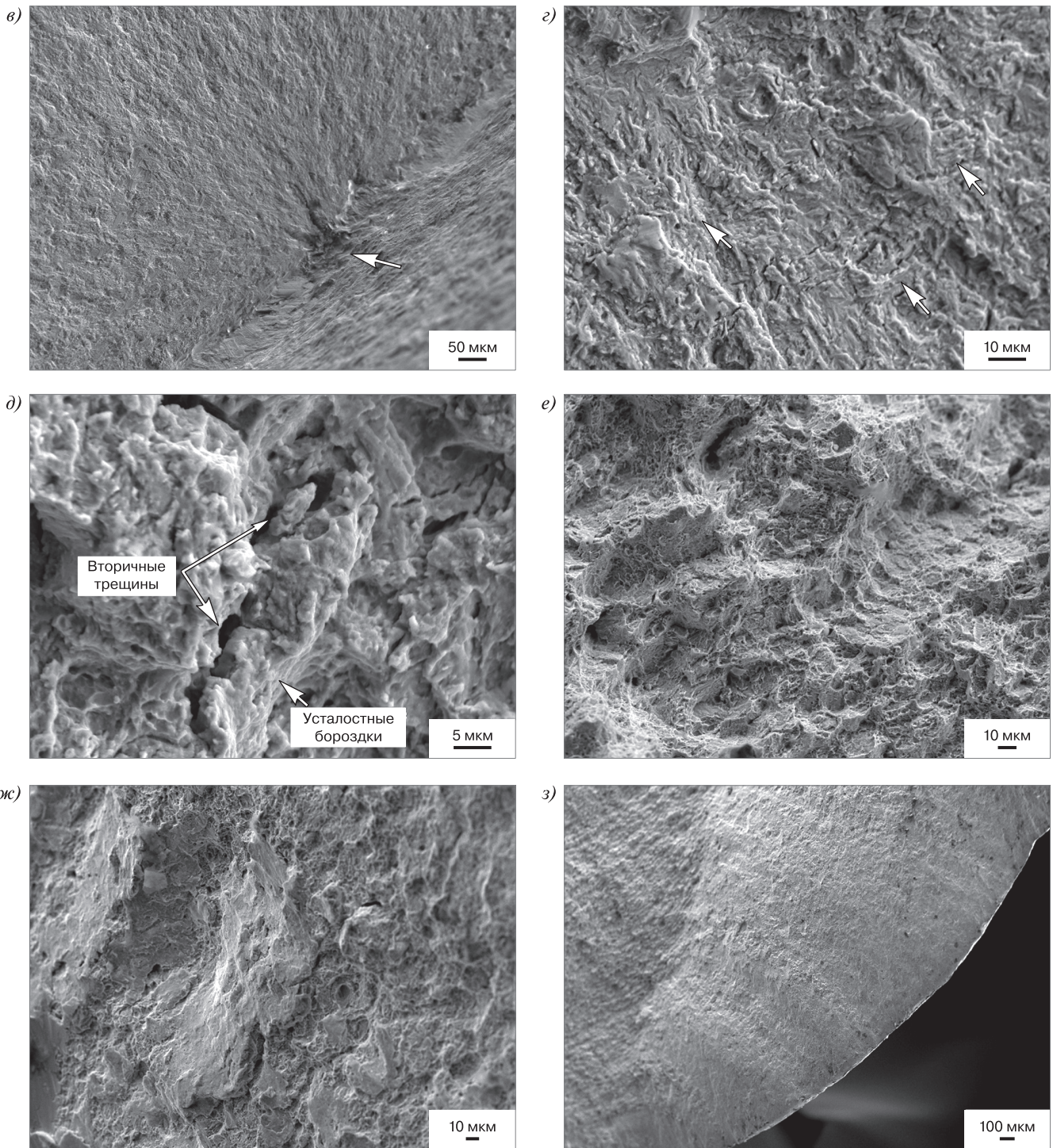


Рис. 10. (Окончание). Рельеф излома клеммы № 13*:
 а — зона зарождения; б — зона стабильного роста l_s ; в — зона ускоренного роста l_f ; г — зона долома;
 д, е — периферийные области
 * Источник: данные авторов

Fig. 10. (Final part). Fracture surface relief of clamp No. 13*:
 а — origin zone; б — stable crack growth l_s zone; в — accelerated crack growth l_f zone; г — final rupture zone;
 д, е — peripheral areas
 * Source: authors' data

и участки сглаженного, возможно сдвигового разрушения (рис. 10, *е*). На рис. 10, *ж, з*, представлен микрорельеф зон, сопровождающих движение основной трещины.

При изучении микрорельефа разрушения клеммы № 11 (рис. 11) обнаружены те же особенности, что и при исследовании изломов предыдущих клемм: зона очага трещины (рис. 11, *а*), зарожденная на поверхностных дефектах (не на включениях) (показана стрелками на рис. 11, *б, в*), бороздки в зоне стабильного усталостного развития трещины (рис. 11, *г, д*), вязкие ямки с вторичными трещинами и сглаженными сдвиговыми участками в области ускоренного роста трещины (рис. 11, *е*) и долома (рис. 11, *ж*) и полосами скачкообразного роста трещины в периферических областях (рис. 11, *з*).

Обсуждение. Проблема повышения качества и продления эксплуатационного ресурса рельсовых скреплений, в частности, упругих клемм, стала наиболее острой в настоящее время в результате развития высокоскоростного и грузонапряженного движения поездов на территории Российской Федерации [25–27]. Упругие клеммы являются одним из наиболее важных элементов рельсовых скреплений, обеспечивающих стабильность прижатия рельса к основанию.

Одной из главных проблем применения упругих клемм является их преждевременное усталостное разрушение при эксплуатации, которое обусловлено влиянием таких факторов как микроструктура, состояние поверхности, остаточные напряжения, загрязненность неметаллическими включениями, концентрация напряжений при геометрических переходах и т. д.

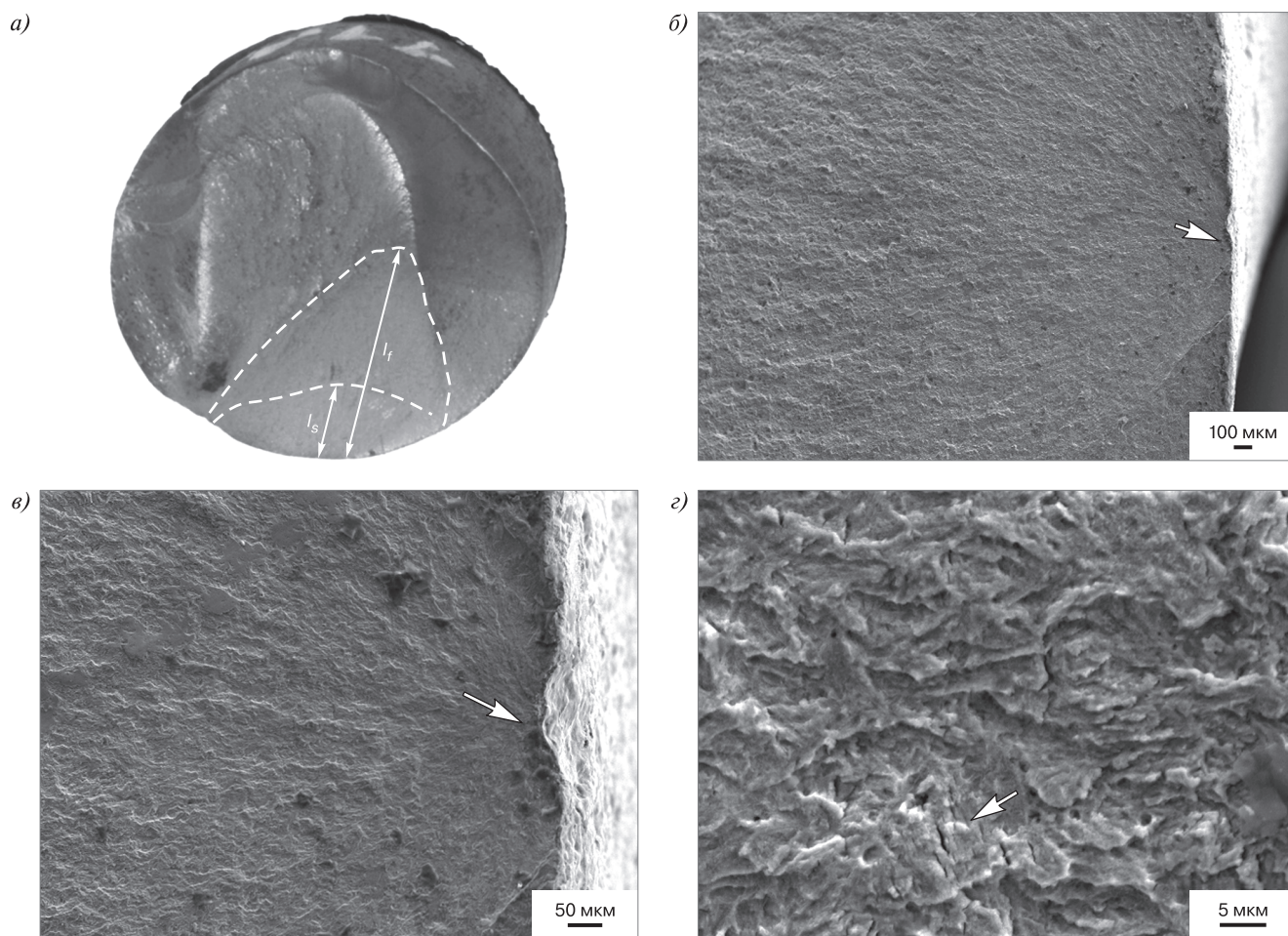


Рис. 11. Рельеф излома клеммы № 11*:
а — общий вид; *б, в* — зона зарождения; *г* — зона стабильного роста l_s
 * Источник: данные авторов

Fig. 11. Fracture surface relief of clamp No. 11*:
a — macro view; *б, в* — origin zone; *г* — stable crack growth l_s zone
 * Source: authors' data

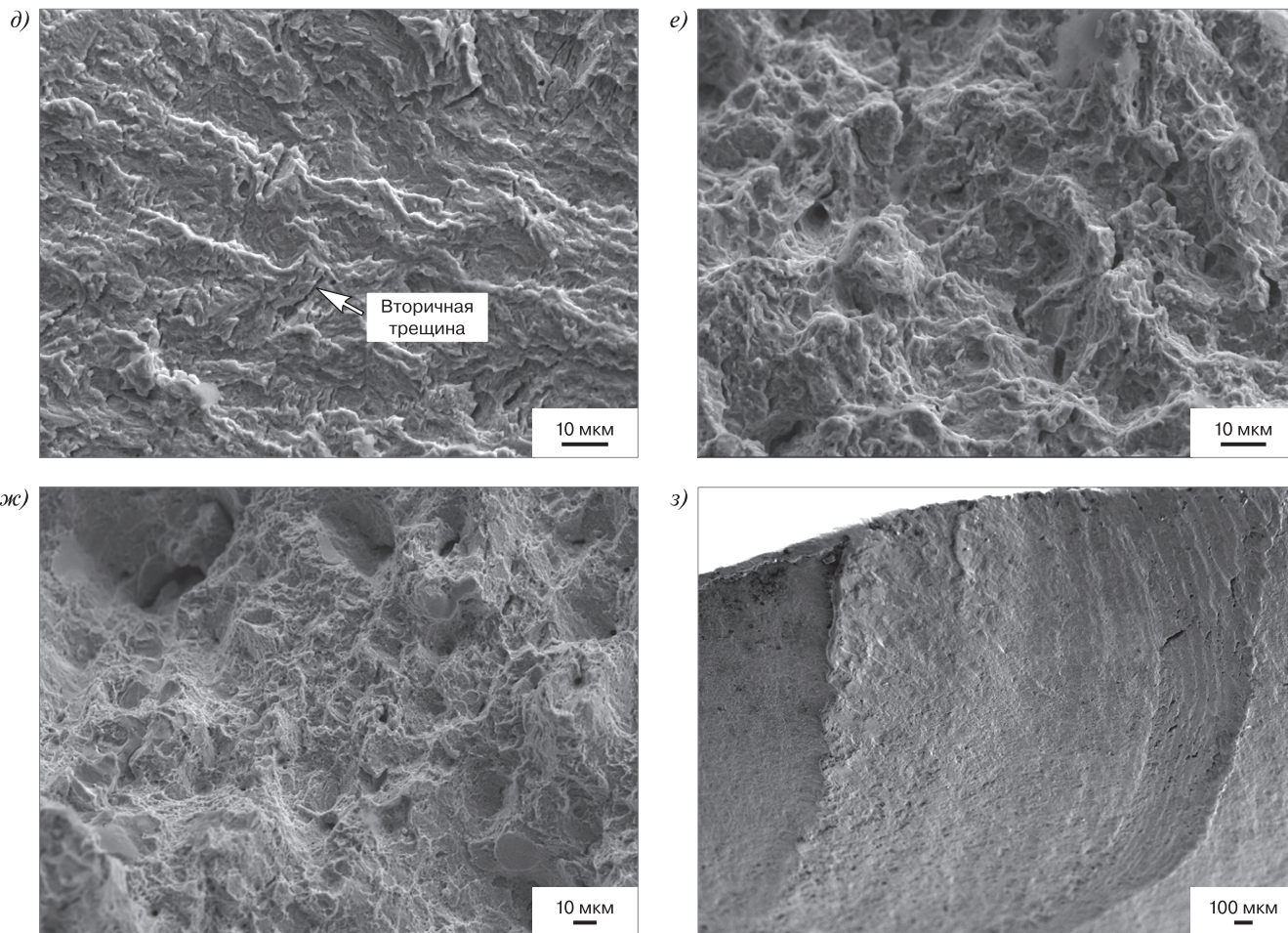


Рис. 11. (Окончание). Рельеф излома клеммы № 11*:
 д — зона стабильного роста l_s ; е — зона ускоренного роста l_f ; ж — зона долома; з — периферийная область
 * Источник: данные авторов

Fig. 11. (Final part). Fracture surface relief of clamp No. 11*:
 д — stable crack growth l_s zone; е — accelerated crack growth l_f zone; ж — final rupture zone; з — peripheral area
 * Source: authors' data

Как показали результаты настоящей работы, наличие неметаллических включений и дефектов боковой поверхности клемм может оказывать влияние на изменение усталостных свойств и преждевременное разрушение клемм и, как следствие, на характерные особенности изломов. Это согласуется с результатами работы [28], авторы которой установили, что наличие неметаллических включений, а именно их размер, оказывает существенное влияние на изменение усталостных свойств и преждевременное разрушение закаленных и отпущенных деталей.

При этом действующий на данный момент ГОСТ 33186–2014¹⁵ не нормирует загрязненность неметаллическими включениями сталей, предназначенных для изготовления клемм, что представляется важным.

Заключение. В результате проведенного исследования установлено, что развитие рельефа усталостного разрушения клемм вне зависимости от метода усталостных испытаний (стандартный или ускоренный по методу Локати) соответствует общим закономерностям формирования рельефа изломов при усталостном разрушении и сопровождается зарождением усталостных микротрещин от включений или дефектов боковой поверхности (поверхности прутка клеммы), развитием трещин с образованием типичных усталостных бороздок в зоне усталостного разрушения и вторичных трещин, гребней, вязких ямок, участков со сглаженным сдвиговым микрорельефом в зоне ускоренного роста, а также формированием макрополос скачкообразного роста трещины.

¹⁵ ГОСТ 33186–2014. Клеммы пружинные прутковые для крепления рельсов. Технические условия.

Влияние типа включений, их объемной доли и критического размера на характер усталостного разрушения и циклическую долговечность клемм требует дальнейших исследований. При этом использование ускоренного метода усталостных испытаний позволит сократить временные затраты на проведение исследований упругих клемм.

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

Acknowledgements: 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. Беляев М. С., Кошкин С. Б., Горбовец М. А. Определение предела усталости жаропрочного сплава способом ступенчатого изменения нагрузки // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 1 (18). С. 27–30. EDN: <https://elibrary.ru/rnecun>.
2. Belyaev M. S., Koshkin S. B., Gorbovetz M. A. Determination of superalloy fatigue strength by the loading step change method. *Aviation Materials and Technologies*. 2011;(1(18)):27–30. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/rnecun>.
3. Pollak R., Palazotto A., Nicholas T. A simulation-based investigation of the staircase method for fatigue strength testing. *Mechanics of Materials*. 2006;38(12):1170–1181. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2005.12.005>.
4. Spiteri P., Ho S., Lee Y.-L. Assessment of bending fatigue limit for crankshaft sections with inclusion of residual stresses. *International Journal of Fatigue*. 2007;29(2):318–329. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.03.009>.
5. Locati L. Le prove di fatica come ausilio alla progettazione ed alla produzione. *Metallurgia Italiana*. 1955;47(9):301–308.
6. Prot E.-M. L'essai de fatigue sous charge progressive. Une nouvelle technique d'essai des matériaux. *Revue de Métallurgie*. 1948;45(12):481–489. <https://doi.org/10.1051/metal/194845120481>.
7. Enomoto N. A method for determining the fatigue limit of metals by means of stepwise load increase tests. *Proceedings — American Society for Testing and Materials*. 1959;59:711–722.
8. Березин В. О., Замуховский А. В. Об актуальности методики ускоренных усталостных испытаний упругих клемм // Путь и путевое хозяйство. 2026. № 4. С. 14–17. EDN: <https://elibrary.ru/sqethr>.
9. Berezin V. O., Zamukhovskiy A. V. The relevance of developing a methodology for accelerated fatigue testing of elastic clamps. *Railway Track and Facilities*. 2026;(4):14–17. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/sqethr>.
10. Чернов В. А., Даниленко Д. В., Цыганская Л. В., Комиченко С. О., Ефимов В. П. Ускоренный метод испытания боковых рам инновационной тележки модели 18-9891 // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22, № 3. С. 643–656. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2025-3-643-656>. EDN: <https://elibrary.ru/zuyqes>.
11. Chernov V. A., Danilenko D. V., Cyganskaya L. V., Komichenko S. O., Efimov V. P. Accelerated test method for the side frames of the 18-9891 model innovative bogie. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2025;22(3):643–656. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2025-3-643-656>. EDN: <https://elibrary.ru/zuyqes>.
12. Brodbeck M., Spiegel A., Hunt J., Gruenert J. Mechanical fatigue analysis comparing two locking plates in a metaphyseal fracture model of the distal ulna. *Journal of Musculoskeletal Disorders and Treatment*. 2016;2(3):16–19. <https://doi.org/10.23937/2572-3243.1510018>.
13. Topoliński T., Nowicki K. Verification of selected hypotheses attempting to explain the effect of fatigue damage build-up in trabecular bones. *AIP Conference Proceedings*. 2016;1780(1):020009. <https://doi.org/10.1063/1.4965941>.
14. Бойцов Б. В. Статистический анализ точности метода ускоренных испытаний // Заводская лаборатория. 1972. Т. 38, № 9. С. 1129–1132.
15. Boytsov B. V. Statistical analysis of the accuracy of the accelerated testing method. *Industrial Laboratory*. 1972;38(9):1129–1132. (In Russ.).
16. Veramiayuk S., Paczkowska M. Analysis of factors influencing the fatigue strength of railway fastening clips. *Advancements in Civil Engineering and Technology*. 2025;6(4). <https://doi.org/10.31031/ACET.2025.06.000644>.
17. Wang X.-W., Hu Q.-F., Zhang Ch.-L., Chen L., Zhu Ch.-Y., Tao B., Jiang B., Liu Y.-Zh. Optimization of heat treatment for 38Si7 spring steel with excellent mechanical properties and controlled decarburization. *Materials*. 2022;15(11):3763. <https://doi.org/10.3390/ma15113763>. EDN: <https://elibrary.ru/zhccke>.
18. Cui Zh.-N., Kang Y.-L., Guo M.-Zh., Li B.-Sh., Qui Q.-Q., Liu R.-D., Liu H.-B. Effect of process parameters on microstructure and properties of 1500 MPa grade hot formed steel without boron but containing niobium. *Materials Science Forum*. 2019;944:283–293. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.944.283>.
19. Xiao H., Guo X., Wang H., Ling X., Wu S. Fatigue damage analysis and life prediction of E-clip in railway fasteners based on ABAQUS and FE-SAFE. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018;10(3):168781401876724. <https://doi.org/10.1177/1687814018767249>.
20. Березин В. О., Замуховский А. В., Ефимов А. А. Выбор расчетных методов учета сложного напряженно-деформированного состояния и среднего напряжения цикла для локализации места зарождения усталостной трещины в упругой клемме // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 3. С. 199–214. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-199-214>. EDN: <https://elibrary.ru/izmvxi>.
21. Berezin V. O., Zamukhovskiy A. V., Efimov A. A. Selection of calculation methods for accounting complex stress-strain state and mean cycle stress for the origin of fatigue crack in elastic clamp localisation. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(3):199–214. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-199-214>. EDN: <https://elibrary.ru/izmvxi>.
22. Park Y.-Ch., An Ch., Sim H.-B., Kim M., Hong J.-K. Failure analysis of fatigue cracking in the tension clamp of a rail fastening system. *International Journal of Steel Structures*. 2019;19:1570–1577. <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00231-5>. EDN: <https://elibrary.ru/oiozcc>.
23. Kim S.-H., Fang X.-Ju., Park Y.-Ch., Sim H.-B. Evaluation of structural behavior and fatigue performance of a KR-type rail clip. *Applied Sciences*. 2021;11(24):12074. <https://doi.org/10.3390/app112412074>. EDN: <https://elibrary.ru/dpczcv>.
24. Ostash O. P., Chepil' R. V., Hrybovs'ka V. I. On the determining parameters of serviceability of the elastic clamps of rail fasteners. *Materials Science*. 2017;53:55–61. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0043-5>. EDN: <https://elibrary.ru/xnwvcn>.
25. Akiniwa Y., Stanzl-Tschegg S., Mayer H., Wakita M., Tanaka K. Fatigue strength of spring steel under axial and torsional loading in the very high cycle regime. *International Journal of Fatigue*. 2008;30(12):2057–2063. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.07.004>.
26. Karr U., Schönbauer B. M., Sandajji Y., Mayer H. Effects of non-metallic inclusions and mean stress on axial and torsion very high cycle fatigue of SWOSC-V spring steel. *Metals*. 2022;12(7):1113. <https://doi.org/10.3390/met12071113>. EDN: <https://elibrary.ru/tzwjrb>.

22. Murakami Y., Endo M. Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength. *International Journal of Fatigue*. 1994;16(3):163–182. [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0142-1123(94)90001-9).

23. Ali R., Shehbaz T., Felicis D.D., Sebastiani M., Bemporad E. Investigations into fatigue failure in E-type fastening clips used in railway track. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2021;235(7):898–905. <https://doi.org/10.1177/0954409720967802>.

24. Березин В. О., Замуховский А. В., Ефимов А. А., Гречаник А. В. Валидация конечно-элементной модели клеммы узла промежуточного рельсового скрепления // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 2. С. 113–125. EDN: <https://elibrary.ru/qyogfn>.

Berezin V.O., Zamukhovskiy A.V., Efimov A.A., Grechanik A.V. Validation of finite-element model of clamp of rail fastening system. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(2):113–125. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/qyogfn>.

25. Андреев В. Е., Кудряшов Е. В. Создание контактной сети КС-400 для российских высокоскоростных железнодорожных магистралей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 4. С. 235–250. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-235-250>. EDN: <https://elibrary.ru/dywrie>.

Andreev V.E., Kudryashov E.V. Design and construction of the KS-400 overhead contact line for Russian high-speed railways. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(4):235–250. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-235-250>. EDN: <https://elibrary.ru/dywrie>.

26. Романов А. В., Киселев А. А. Прочность и устойчивость безбалластной конструкции верхнего строения бесстыкового пути высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 4. С. 262–272. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-262-272>. EDN: <https://elibrary.ru/fqcvmj>.

Romanov A.V., Kiselev A.A. Strength and stability of continuous welded rail track of ballastless track superstructure of Moscow – Saint Petersburg high-speed main line. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(4):262–272. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-262-272>. EDN: <https://elibrary.ru/fqcvmj>.

27. Кореньков Д. А., Иванников М. А., Загитов Э. Д. Разработка конструкции и технологий содержания железнодорожного пути, обеспечивающих наработку 2,5 млрд т брутто пропущенного тоннажа // Путь и путевое хозяйство. 2024. № 12. С. 2–6. EDN: <https://elibrary.ru/mknjnj>.

Korenkov D.A., Ivannikov M.A., Zagitov E.D. Design and maintenance technology for railway track providing 2.5 billion gross tons of passing tonnage. *Railway Track and Facilities*. 2024;(12):2–6. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/mknjnj>.

28. Linhart V., Mikulova D., Cerny I. Effect of inclusions on fatigue strength of heat treated components. *Communications*. 2010;12(4):55–61. <https://doi.org/10.26552/com.C.2010.4.55-61>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Людмила Рафаиловна БОТВИНА,

д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук (119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49), SPIN-код: 8760-2586, <https://orcid.org/0000-0001-7717-0719>

Юлия Андреевна ДЕМИНА,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук (119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49), SPIN-код: 1199-8847, <https://orcid.org/0000-0002-0326-3071>

Вадим Олегович БЕРЕЗИН,

аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство», Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), SPIN-код: 2620-0199, <https://orcid.org/0009-0008-1831-6093>

Марат Равилевич ТЮТИН,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук (119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49), SPIN-код: 3545-9114, <https://orcid.org/0000-0002-0631-4794>

Александр Владимирович ЗАМУХОВСКИЙ,

канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство», Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), SPIN-код: 4211-6690

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ludmila R. BOTVINA,

Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (IMET RAS, 119334, Moscow, 49, Leninsky Ave.), SPIN-code: 8760-2586, <https://orcid.org/0000-0001-7717-0719>

Yulia A. DEMINA,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (IMET RAS, 119334, Moscow, 49, Leninsky Ave.), SPIN-code: 1199-8847, <https://orcid.org/0000-0002-0326-3071>

Vadim O. BEREZIN,

Postgraduate, Track and Track Facilities Department, Russian University of Transport (127994, Moscow, bldg. 9, 9, Obratzova St.), SPIN-code: 2620-0199, <https://orcid.org/0009-0008-1831-6093>

Marat R. TYUTIN,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (IMET RAS, 119334, Moscow, 49, Leninsky Ave.), SPIN-code: 3545-9114, <https://orcid.org/0000-0002-0631-4794>

Alexander V. ZAMUKHOVSKY,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Track and Track facilities Department, Russian University of Transport (127994, Moscow, bldg. 9, 9, Obratzova St.), SPIN-code: 4211-6690

ВКЛАД АВТОРОВ

Людмила Рафаиловна БОТВИНА. Постановка целей и задач исследования, поиск научных источников, подготовка литературного обзора, анализ результатов, написание текста статьи, обсуждение результатов, формирование выводов (30 %).

Юлия Андреевна ДЕМИНА. Исследование и анализ макро- и микроизломов, редактирование текста статьи (20 %).

Вадим Олегович БЕРЕЗИН. Поиск научных источников, подготовка литературного обзора, обсуждение результатов, написание текста статьи, формирование выводов (20 %).

Марат Равилевич ТЮТИН. Анализ макроизломов, поиск научных источников, редактирование текста статьи (15 %).

Александр Владимирович ЗАМУХОВСКИЙ. Поиск научных источников, обсуждение результатов, редактирование текста статьи (15 %).

Alexander V. ZAMUKHOVSKY. Searching for scientific sources, results discussion, article editing (15 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Ludmila R. BOTVINA. Research goals and objectives setting, scientific sources search, preparation of literature review, results analysis and discussion, article writing, conclusions formulation (30 %).

Yulia A. DEMINA. Investigation and analysis of macro- and micro-relief of fracture surface, article editing (20 %).

Vadim O. BEREZIN. Scientific sources search, preparation of literature review, results discussion, article writing, conclusions formulation (20 %).

Marat R. TYUTIN. Analysis of macrorelief of fracture surface, scientific sources search, article editing (15 %).

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 27.01.2026, рецензия от второго рецензента получена 02.02.2026, рецензия от третьего рецензента получена 06.02.2026, принята к публикации 16.02.2026.

The article was submitted 27.10.2025, first review received 27.01.2026, second review received 02.02.2026, third review received 06.02.2026, accepted for publication 16.02.2026.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 629.457: 536.2

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

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-152-163>

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



Использование метода неравновесных режимов при испытаниях кузовов пассажирских вагонов для оценки и мониторинга их теплотехнического состояния

П. О. Мусерский, С. Н. Науменко✉

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Теплотехнические показатели кузова пассажирского вагона строго нормируются, а их отклонение в сторону ухудшения от нормы приводит к существенному перерасходу потребляемой энергии, что отражается на увеличении себестоимости перевозки пассажиров. С течением времени, из-за отличающихся условий и полигонов эксплуатации, у каждого кузова серийного вагона величина коэффициента теплопередачи становится индивидуальной, как и тепловые потери через ограждения кузовов. Целью статьи является разработка нового методического подхода на основе коэффициента теплопередачи ограждающих конструкций, который позволит оценивать теплотехническое состояние кузова с меньшей трудоемкостью, более оперативно и не только при заводском выпуске вагона, но и после его ввода в эксплуатацию.

Материалы и методы. Расчеты величин среднего коэффициента теплопередачи ограждающих конструкций кузовов вагонов на стоянке выполнены по результатам проведенных теплотехнических испытаний кузовов пассажирских вагонов с применением стандартизированного метода равновесных режимов, а также с использованием метода неравновесных режимов.

Результаты. Сравнение расчетных величин среднего коэффициента теплопередачи кузовов четырех пассажирских вагонов, полученных в результате проведения серии теплотехнических испытаний по стандартизированной методике с аналогичными значениями, рассчитанными при использовании метода неравновесных режимов, не превысили 3 %.

Обсуждение и заключение. При проведении теплотехнических испытаний кузовов пассажирских вагонов на основе метода неравновесных режимов величина среднего коэффициента теплопередачи ограждающих конструкций вагона может быть определена в производственных условиях за 11 ч без ущерба для точности, что в 7–8 раз быстрее по сравнению с используемым в настоящее время стандартизированным методом. Применение метода неравновесных режимов позволяет организовать контроль нормативного теплотехнического показателя кузова и после ввода вагона в эксплуатацию на протяжении жизненного цикла, открывая возможности для планирования объемов энергопотребления вагонным парком.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пассажирский вагон, средний коэффициент теплопередачи кузова, теплоограждающая конструкция вагона, метод неравновесных режимов, расход электроэнергии

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мусерский П. О., Науменко С. Н. Использование метода неравновесных режимов при испытаниях кузовов пассажирских вагонов для оценки и мониторинга их теплотехнического состояния // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2026. Т. 85, № 2. С. 152–163. EDN: <https://elibrary.ru/wzahwb>.

Original article

UDK 629.457: 536.2

EDN: <https://elibrary.ru/wzahwb>DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-152-163>

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



Usage of nonequilibrium modes method in passenger car bodies test for their thermal condition estimation and monitoring

Prokopiyy O. Muserskiy, Sergey N. Naumenko✉

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The thermal performance of the passenger car body is strictly regulated, their deviation from the norm leads to a significant excess energy consumption, which is reflected in an increase in the cost of passenger transportation. Over time, due to different operating conditions and ranges, the value of the heat transfer coefficient becomes individual for each production carriage body and heat losses through carriage body guards. The purpose of the article is to develop a new methodological approach based on the heat transfer coefficient of enclosing structures, which would enable to assess the thermal condition of the carriage body with less labor intensity, more quickly and both during the factory production of the car and after its commissioning.

Materials and methods. Calculations of the values of the heat transfer average coefficient of the enclosing structures of the carriage bodies at train stand were performed based on the results of thermal engineering tests of passenger carriage bodies using the standardised method of equilibrium modes, as well as the method of nonequilibrium modes.

Results. Comparison of the calculated values of the heat transfer average coefficient bodies of four passenger carriage bodies, obtained as a result of a series of thermal engineering tests using a standardised method with similar values calculated according to the method of nonequilibrium modes, did not exceed 3 %.

Discussion and conclusion. When conducting thermal engineering tests of passenger carriage bodies based on the method of nonequilibrium modes, the value of the average heat transfer coefficient of the enclosing structures of the car could be determined in production conditions in 11 h without compromising accuracy, which is 7–8 times faster than the currently used standardised method. The use of nonequilibrium mode methods enables to organise control of the normative thermal technical indicator of the carriage body after car commissioning throughout the life cycle, which gives opportunities for planning the volume of car fleet energy consumption.

KEYWORDS: passenger carriage, average heat transfer coefficient, heat-insulating enclosing structures of a car, method of nonequilibrium modes, power consumption

FOR CITATION: Muserskiy P.O., Naumenko S.N. Usage of nonequilibrium modes method in passenger car bodies test for their thermal condition estimation and monitoring. *Russian Railway Science Journal*. 2026;85(2):152–163. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-152-163>.

Введение. При посадке пассажиров в вагон, а также во время его движения, внутри помещений происходит непрерывное изменение температурно-влажностного режима вследствие воздействия окружающей среды, тепло- и влаговыделения пассажиров. Количество теплотеплопоступлений в вагон летом или тепловых потерь через ограждение вагона в зимний период зависит от теплотехнических показателей кузова, определяющих необходимую мощность штатных энергетических устройств, и, в конечном итоге, влияющих не только на их массу и габариты, но и на тару вагона в целом¹. Теплотехнические показатели кузова вагона строго нормируются, их отклонение от нормативных величин в сторону ухудшения приводит к существенному перерасходу потребляемой энергии, что отражается на увеличении себестоимости рейсов при перевозке пассажиров.

В соответствии с общими требованиями к конструкции вагона² основным теплотехническим показателем кузова является средний коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций вагона на стоянке (далее — $K_{СР}$), величина которого не должна превышать значения $1,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Данный параметр контролируется при вводе вагонов в эксплуатацию по результатам проведения заводских теплотехнических испытаний, причем $K_{СР}$ определяется у одного из кузовов выпускаемой серии, а его величина распространяется на все вагоны серии.

С течением времени, из-за отличающихся условий и полигонов эксплуатации, у каждого кузова серийного вагона величина $K_{СР}$ становится индивидуальной, соответственно индивидуальными становятся и тепловые потери через ограждения кузовов. Согласно техническим требованиям³, в период жизненного цикла пассажирских вагонов увеличение $K_{СР}$ кузовов допускается не более чем на 10 % в течение 6 лет.

Однако контроль этого показателя, как правило, после ввода вагона в эксплуатацию не осуществляется, а состояние изоляции улучшают только однажды — при проведении капитального ремонта второго объема (далее — КР-2) с частичным вскрытием кузова

до металла и заменой теплоизоляции на вскрытых местах. Для вагонов со сроком службы 28 и 40 лет КР-2 проводится через 18 и 20 лет соответственно⁴, качество изоляции проверяют посредством использования тепловизора⁵ после завершения ремонтных работ. Ряд специалистов предлагает снижать данные затраты, выполняя перед проведением ремонта экспресс-анализ качества изоляции и в последующем осуществляя ее замену выборочно [1–4]. Другие, наряду с этим, аргументируют и побуждают к необходимости организации контроля величины $K_{СР}$ в течение жизненного срока вагона, в частности, что контролировать теплотехнические качества ограждающих конструкций следует сразу же после постройки, ремонта и во время технического обслуживания вагона [5].

Покажем значимость величины $K_{СР}$ и ее влияние на расход потребляемой электроэнергии, идущей на отопление вагонов, на примере пассажирского поезда, следующего в январе 2025 г. по маршруту № 267И «Иркутск – Москва». Сравним потребление электроэнергии составом, состоящим из 20 купейных вагонов различного года выпуска: 6, 12, 18 и 20 лет (при условии увеличения значения $K_{СР}$ в соответствии с допустимыми нормативными показателями⁶). Расстояние в 4206 км поезд преодолевает фактически за 75 ч, двигаясь с ходовой скоростью 70 км/ч, при этом средняя температура атмосферного воздуха за январь для каждого участка, согласно данным⁷, меняется на протяжении всего маршрута от $-18,4$ до $-7,8$ °С.

Расчет проведен в соответствии с изложенными в методике [6] данными, приведенными для купейных вагонов площадью 274 м^2 , количеством пассажиров в каждом вагоне, равным 20, и поддерживаемой комфортной температурой воздуха в салоне $+20$ °С.

Из полученных данных следует, что расход электроэнергии на отопление за один рейс составом, состоящим из новых вагонов, вырастет на 22 % при использовании в поезде вагонов, эксплуатируемых 18 лет, и на 25 % вагонов, эксплуатируемых 20 лет (рис. 1).

¹ Ворон О. А., Яицков И. А., Косаревский В. В., Петрушин А. Д., Булавин Ю. П. Устройство и расчет агрегатов и приводов для систем жизнеобеспечения пассажирских вагонов: учеб.-метод. пособие. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2022. 40 с.

² ГОСТ 34681–2024. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Общие технические требования: принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации, протокол от 31 июля 2024 г. № 175-П. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 45 с.

³ Памятка ОСЖД О+Р 538/1. Технические требования к термоизоляции и теплотехническим показателям кузовов пассажирских и рефрижераторных вагонов: утв. на заседании Конференции Генеральных директоров (ответственных представителей) железных дорог ОСЖД 20–24 апреля 2009 г., II изд. 5 с.

⁴ О введении новой системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов: приказ МПС России от 04 апреля 1997 г. № 9Ц.

⁵ ЛВ1.0030РК. Вагоны пассажирские. Руководство по капитальному ремонту (КР-2): утв. расп. ОАО «РЖД» от 11 января 2019 г. № 26/р.

⁶ Памятка ОСЖД О+Р 538/1. Технические требования к термоизоляции и теплотехническим показателям кузовов пассажирских и рефрижераторных вагонов.

⁷ Методика планирования расходов топливно-энергетических ресурсов для отопления служебно-технических вагонов ОАО «РЖД»: утв. расп. ОАО «РЖД» от 06 декабря 2022 г. № 3202р.

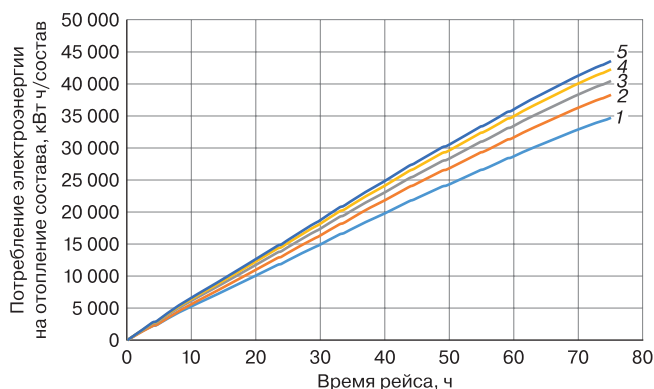


Рис. 1. Динамика расхода электроэнергии, потребляемой на отопление состава из 20 вагонов разного срока эксплуатации на маршруте № 267И «Иркутск – Москва»*:

1 – новый вагон; 2 – с наработкой 6 лет; 3 – 12 лет;
4 – 18 лет; 5 – 20 лет

* Источник: данные авторов

Fig. 1. Dynamics of electricity consumption consumed for 20-car train heating of different service life on route No. 267И “Irkutsk – Moscow”*:

1 – new wagon; 2 – with a service life of 6 years; 3 – 12 years;
4 – 18 years; 5 – 20 years

* Source: authors' data

С учетом информации АО «Федеральная пассажирская компания» (АО «ФПК»)»⁸ о среднем возрасте парка пассажирских вагонов дальнего следования, который по состоянию на начало 2025 г. находился на отметке 18,0 лет, а также, что в инвентарном парке имеется 16,6 тыс. вагонов, можно предположить, что дополнительные расходы электроэнергии на их отопление, в частности, в отопительный период 2024–2025 гг. по отношению к парку, который мог бы быть сформирован из новых вагонов, составят около 2,0 млн кВт·ч/парк в сутки, а в год — 650,0 млн кВт·ч/парк соответственно. Разумеется, что не все вагоны отапливаются с помощью электроэнергии, тариф на которую сегодня составляет около 8 руб./кВт·ч, часть из них отапливается менее дорогим натуральным топливом — углем, пеллетами и пр., но с учетом электропотребления установками кондиционирования воздуха в летний период, в целом, дополнительные затраты по парку, зависящие от изменяющегося в процессе эксплуатации вагонов значения $K_{СР}$, могут быть достаточно ощутимы и достигать нескольких млрд руб.

В связи с этим, располагая информацией об индивидуальных величинах $K_{СР}$ кузовов пассажирских вагонов, АО «ФПК» могло бы не только достаточно точно оценивать и планировать объемы потребления энерго-

ресурсов парка на обозримый период, но и управлять ими, перераспределяя вагоны по маршрутам в соответствии с критерием минимальных затрат.

Почему же такой важный показатель, как $K_{СР}$, определяют преимущественно только при вводе вагонов в эксплуатацию и не контролируют его величину в течение жизненного цикла? Вероятно, причина кроется в уровне трудоемкости, необходимом для его определения, и, что не менее важно, в возможности обеспечения основных условий, позволяющих добиться требуемой точности при расчете $K_{СР}$. В этой связи, в статье проведено исследование технологий, позволяющих уменьшить данную трудоемкость, сохранив при этом требуемую точность при расчете среднего коэффициента теплопередачи.

Как было отмечено ранее, величину $K_{СР}$ определяют по результатам теплотехнических испытаний, процедура которых регламентирована, в частности, межгосударственным стандартом⁹. Согласно ему испытываемый вагон должен неподвижно находиться в закрытом помещении без воздействия на него солнечных лучей при температуре воздуха 15 ± 5 °С. Кроме того, в течение всего периода испытаний (не менее 13 ч) эта температура не должна изменяться более чем на ± 2 °С, причем в последний час — не более чем на $\pm 0,5$ °С. В производственных помещениях цехов заводов и/или депо добиться соблюдения приведенных выше температурных условий без остановки производственного процесса достаточно сложно. В связи с этим испытания планируют, прежде всего, в выходные дни, однако, они могут отличаться нестабильностью сетевого напряжения, что будет сказываться на точности расчета $K_{СР}$. В период проведения испытаний для обогрева помещения вагона включают электронагреватели, напряжение которых не должно отличаться от номинального значения более чем на 2%, а температура воздуха внутри вагона при этом в течение как минимум последних 3 ч проведения испытаний не должна изменяться более чем на $\pm 0,5$ °С. Любой сбой температуры ведет к увеличению длительности эксперимента, что подтверждается на практике. Так, отмечается, что стандартизированный метод измерения среднего коэффициента теплопередачи стен кузова пассажирского вагона отличается большой продолжительностью (до четырех суток) и значительной погрешностью [7]. В международной практике для обеспечения условий проведения теплотехнических испытаний, как правило, используют специальные

⁸ Отчетность компании. Годовые отчеты // РЖД. Федеральная пассажирская компания. URL: <https://fpc.ru/ru/7034?ysclid=mo9x3jpkt3810651699>.

⁹ ГОСТ 33661–2015. Ограждающие конструкции помещений железнодорожного подвижного состава. Методы испытаний по определению теплотехнических показателей: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 января 2016 г. № 3-ст. М.: Стандартинформ, 2016. 25 с.

теплоизолированные станции, позволяющие поддерживать внутри стабильную температуру воздуха и неизменную мощность работы электронагревателей. Проведение испытаний также характеризуется высокой трудоемкостью, связанной с монтажом и демонтажом датчиков температуры, подключением электронагревателей, стабилизирующей и измерительной аппаратуры, потреблением значительных энергетических ресурсов, расходуемых на отопление производственного помещения и работу электроприборов в течение как минимум 100 ч.

Далее рассмотрим возможность определения величины $K_{\text{СР}}$ в производственных условиях в течение не более 13 ч, рекомендованных ГОСТ 33661–2015¹⁰, а также перспективы организации контроля над нормативным теплотехническим показателем после ввода кузова в эксплуатацию.

Материалы и методы. Схожие вопросы достаточно давно ставились при оценке теплотехнического состояния изотермических вагонов. Так, еще в 1976 г. Е. Т. Бартош отмечал, что «современные рефрижераторные депо и ремонтные заводы не располагают специальными изотермическими помещениями, т. е. практически лишены возможности проверки общего состояния ремонтируемого кузова вагона» [8, с. 259]. В связи с этим предлагалось разработать такие методы контроля, которые с некоторым ущербом для точности позволяли бы оценивать характеристику ограждения путем непродолжительных опытов непосредственно в ремонтных цехах. Впервые такой метод, в котором для определения $K_{\text{СР}}$ использованы неравновесные процессы нагрева и охлаждения воздуха в вагоне, был опубликован еще в 1965 г. [9]. Проведенные в ЦНИИ МПС (ныне — АО «ВНИИЖТ») исследования показали, что даже в самых благоприятных расчетных условиях погрешность метода достигала 14%. Дальнейшее его развитие в трудах В. Леви, Л. Путца, Ф. Фокенса, Н. Мефферта, Е. Т. Бартоша, К. В. Иванова, С. А. Сапожникова и др. позволило увеличить точность расчета $K_{\text{СР}}$ до 2%. Однако из-за существенного влияния коэффициента теплоусвоения кузова вагона результаты такой точности достигались, например, с электронагревателями мощностью около 3 кВт ориентировочно за 30 ч [8].

Учесть влияние коэффициента теплоусвоения кузова вагона и сохранить точность расчета $K_{\text{СР}}$ удалось

только в 1992 г. после разработки способа неравновесных режимов¹¹. Суть способа и пример его использования подробно изложены в [10]. Для выполнения расчета была предложена зависимость изменения темпа перепада температур, полученная опытным путем:

$$\frac{d\Delta t}{d\tau} = B\Delta t^A, \quad (1)$$

где Δt — перепад температур воздуха внутри и снаружи кузова вагона, °С;

τ — время проведения эксперимента, ч;

A и B — постоянные коэффициенты.

Формула (1) описывает начало процесса нагрева воздуха в вагоне, который затем в некоторой точке τ_k переходит в равновесный режим, которому соответствует выражение:

$$\frac{d\Delta t}{d\tau} = \frac{Q}{W} - \frac{K_{\text{СР}}F}{W}\Delta t, \quad (2)$$

где Q — мощность электронагревателя, Вт;

W — водяной эквивалент кузова;

F — среднегеометрическая площадь кузова, м².

Выражением (1) может быть описан и процесс остывания воздуха в вагоне после его первоначального нагрева и при последующем снижении мощности электронагревателя. Описанные уравнениями (1) и (2) последовательно рассматриваемые процессы нагрева и остывания кузова с последующим их решением относительно $K_{\text{СР}}$ позволяют определить искомую величину коэффициента. Однако даже в этом случае общая продолжительность эксперимента составляла около суток. Тем не менее разработанная на основании этого способа методика нашла широкое применение в 1990-х — начале 2000-х гг. в цехах рефрижераторных вагоноремонтных заводов при проверке общего состояния ремонтируемых кузовов изотермических вагонов.

Дальнейший поиск методических подходов для ускорения испытаний привел к варианту, при котором длительность расчета $K_{\text{СР}}$ была сокращена ориентировочно в два раза за счет исключения из последовательного анализа процесса остывания воздуха в кузове вагона¹². Учет динамики снижения перепада температур в процессе остывания в этом способе достигнут за счет того, что была найдена возможность один

¹⁰ Там же.

¹¹ Авторское свидетельство № 1730572 А1 СССР, МПК G01N 25/18. Способ определения среднего коэффициента теплопередачи кузова транспортного средства: № 4774819: заявл. 02.01.1990: опубл. 30.04.1992 / И. П. Екимовский, А. В. Коковихин, А. А. Крылов [и др.]; заявитель ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА. EDN: <https://elibrary.ru/timono>.

¹² Патент № 2269768 С1 Российская Федерация, МПК G01N 25/18, G01M 17/00. Способ определения среднего коэффициента теплопередачи кузова транспортного средства: № 2004129988/11: заявл. 12.10.2004: опубл. 10.02.2006 / С. Н. Науменко, Н. С. Теймуразов. EDN: <https://elibrary.ru/yxsgck>.

и тот же процесс начала нагрева воздуха в кузове вагона дважды аппроксимировать двумя разными уравнениями вида (1), которые с точки зрения конечного результата равнозначно заменяли начальные участки нагрева и остывания.

Параллельно разрабатывались и другие способы уменьшения времени проведения испытаний, среди которых для практического использования были рассмотрены методические подходы, описанные в стандарте¹³ и в работе¹⁴. Они оказались не универсальными: первый, продолжительностью 3,5 ч, был разработан исключительно для определения $K_{СР}$ в помещениях небольших объемов (кабины, салоны и др.) в составе локомотивов, моторвагонного и специального подвижного состава, а расчет по второму, длительностью от 5,5 до 11 ч, предусматривал получение значений $K_{СР}$ лишь в пределах от 0 до 1,0 Вт/(м²·К), что явно недостаточно для оценки всего диапазона теплотехнических свойств кузовов пассажирских вагонов.

Поиск иных способов ускоренного определения $K_{СР}$ для кузовов вагонов или автомобилей ожидаемых результатов не дал. Так, в стандартах Европы¹⁵ и Китая (КНР)¹⁶ для определения $K_{СР}$ рекомендован к применению метод равновесных режимов, как и в стандартной методике¹⁷. В большей части зарубежных публикаций по данной тематике рассмотрены решения в области числового моделирования $K_{СР}$ кузовов пассажирских вагонов [11–12] или механизмы определения параметров теплопередачи посредством разработки программных комплексов¹⁸ [13]. В основе российских стандартов также лежат методы равновесных режимов. Среди других публикаций в отечественных научных изданиях отмечены труды^{19, 20}, посвященные вопросам повышения безопасности

при проведении тепловых измерений, моделирования процессов нагрева²¹ (без учета влияния величины коэффициента теплоусвоения кузова) и практически во всех — увеличения точности значений $K_{СР}$ при проведении экспериментов.

В целом касательно оценки точности следует согласиться со многими исследователями, в том числе с авторами [3, 7], которые отмечают, что наличие многочисленных металлических элементов довольно сложной геометрической формы в многослойных стенках кузова вагона, зависящих, в свою очередь, от коэффициента теплопроводности его конструктивных элементов, делает точное расчетное определение $K_{СР}$ практически невозможным. Можно говорить лишь о методах, дающих наибольшие приближения расчетных и истинных средних теплофизических характеристик ограждения. На основе большого практического опыта в проведении теплотехнических испытаний специалистами был сделан финальный вывод об оценке точности величины $K_{СР}$ кузовов пассажирских вагонов методом равновесных режимов, а именно: «...на данный момент единственный стандартизованный метод определения $K_{СР}$ дает возможность лишь подтвердить соответствие вагона нормативным требованиям, но не определить его точно» [7, с. 349].

Следовательно, исходя из условий обеспечения проведения оценки $K_{СР}$ кузовов пассажирских вагонов в производственных цехах как по длительности, так и по точности ожидаемых результатов, для решения поставленной задачи более детально был изучен способ неравновесного определения коэффициента теплопередачи для изотермического транспортного средства²². Способ разработан преимущественно

¹³ СТ ССФЖТ ЦТ-ЦП129-2002. Локомотивы, моторвагонный и специальный подвижной состав железных дорог. Кабины, салоны, служебные и бытовые помещения. Методики испытаний по показателям систем обеспечения микроклимата. М., 2002. 56 с.

¹⁴ Голубин А. А. Экспресс-оценка величины коэффициента теплопередачи изотермического вагона: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.22.07. М., 2018. 24 с.

¹⁵ EN13129:2016. Railway applications. Air conditioning for main line rolling stock. Comfort parameters and type tests. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/841975df-fef2-4a01-b1a1-21361a6784cd/en-13129-2016> (дата обращения: 20.03.2026).

¹⁶ TB/T 1674-1993. Heat Insulation Test Method for Passenger Train. Railway & Train Industry Standard (Recommended). URL: <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/TBT1674-1993> (дата обращения: 20.03.2026).

¹⁷ ГОСТ 33661–2015. Ограждающие конструкции помещений железнодорожного подвижного состава. Методы испытаний по определению теплотехнических показателей.

¹⁸ US3971246A. Method and apparatus for measuring the coefficient of thermal conductivity of a sample / Sadao Sumikama, Nobuyoshi Tanaka, Yoshiaki Arakawa, Katsushi Akama. 1973.

¹⁹ Патент № 2512663 С2 Российская Федерация, МПК G01N 25/18, G01N 25/72. Устройство определения сопротивления теплопередачи многослойной конструкции в реальных условиях эксплуатации: № 2011143472/28: заявл. 28.10.2011; опубл. 10.04.2014 / Н. А. Быстрова, Д. И. Галкин, Е. В. Абрамова [и др.]. EDN: <https://elibrary.ru/uuzbfy>.

²⁰ Патент № 2518224 С1 Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Способ исследования нестационарного теплового режима твердого тела: № 2012156990/28: заявл. 25.12.2012; опубл. 10.06.2014 / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. А. Синицын [и др.]; заявитель ФГБОУ ВПО «Вологодский государственный университет» (ВоГУ). EDN: <https://elibrary.ru/unimid>.

²¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612487 Российская Федерация. Программа для определения установившейся температуры электрического аппарата по частично снятой кривой нагрева / Приходченко О. В., Просолович А. А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КНАГТУ». № 2013610083; заявл. 11.01.2013; опубл. 01.03.2013.

²² Патент № 2269768 С1 Российская Федерация, МПК G01N 25/18, G01M 17/00. Способ определения среднего коэффициента теплопередачи кузова транспортного средства.

для условий проведения испытаний в специальной испытательной станции, требования к которой более жесткие²³, чем в методе равновесных режимов по ГОСТ 33661–2015. Так, максимальные колебания средней температуры снаружи кузова в течение всей продолжительности проведения испытаний на станции не должны превышать $\pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$ (в методе — $\pm 2,0\text{ }^\circ\text{C}$), причем в последние 6 ч устойчивого равновесного состояния — не более $\pm 0,3\text{ }^\circ\text{C}$ (в методе — $\pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$), а, например, разница между показателями мощности электронагревателя в начале периода устойчивого равновесного состояния и через 6 ч после него не должна превышать 3%. Соответственно, были приняты во внимание предположения о низкой точности ожидаемых результатов расчета. Тем не менее, способ был взят за основу для решения поставленной задачи.

Результаты исследования. Первое, что предстояло определить, это минимальное время нагрева воздуха в кузове вагона — τ , ч, которое необходимо для аппроксимации с заданной точностью изменения во времени величины Δt уравнениями степенной функции вида (1).

Изначально для этих целей были приняты данные натурных испытаний автономного рефрижераторного вагона общей продолжительностью $\tau = 14\text{ ч}$ (7 ч нагрев и 7 ч остывание), приведенные в работе [10]. Исследования показали, что для расчета $K_{\text{СР}}$ 7-часового периода нагрева воздуха явно недостаточно, поскольку расчетные значения коэффициента не совпали с экспериментальными: 0,426 — по [10] и 0,769 Вт/(м²·К) — по способу²⁴. Последующие расчеты $K_{\text{СР}}$ с использованием экспериментальных данных, полученных при испытаниях грузовых рефрижераторных вагонов с различными вариациями мощностей электронагревателей и длительностью их проведения τ от 5,5 до 24 ч, показали, что для определения $K_{\text{СР}}$ по способу время нагрева воздуха в кузове вагона должно быть не менее 11 ч. Только в этом случае результаты расчета $K_{\text{СР}}$ показывают близкие величины и практически не отличаются от значений, полученных при использовании метода равновесных режимов.

Было выявлено, что критерием, подтверждающим целесообразность применения указанного способа, является расчетное значение перепада температур воздуха внутри и снаружи кузова вагона — Δt_{ki} , величина которого должна находиться в диапазоне используемых для расчета $K_{\text{СР}}$ экспериментальных данных Δt , полученных за время τ .

Перепад температур рассчитывается по формуле:

$$\Delta t_{ki} = \frac{-Q_i(1 - B)}{K_{\text{СР}i}FB}. \quad (3)$$

Так, на графике (рис. 2), построенном в координатах $(\Delta t; \frac{d\Delta t}{d\tau})$ по результатам проведения теплотехнических испытаний кузова пассажирского вагона модели 61-4447, находящаяся на границе неравновесного и равновесного режима точка Δt_k , имеющая значение $+14,6\text{ }^\circ\text{C}$, попадает в 11-часовой интервал расчетных данных $\Delta t = +3,9...+15,7\text{ }^\circ\text{C}$. Полученное в расчете значение $K_{\text{СР}} = 0,669\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ лишь незначительно (\approx на 2,4%) отличается от значения $K_{\text{СР}} = 0,653\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, определенного по результатам теплотехнических испытаний [14], выполненных по равновесному методу.

При сопоставлении расчетных и экспериментальных данных следует учитывать погрешности величин, измеряемых в процессе проведения теплотехнических испытаний, и только после этого оценивать точность расчетной модели определяющих параметров.

Выполним такую оценку по итогам проведенных специалистами Тверского института вагоностроения

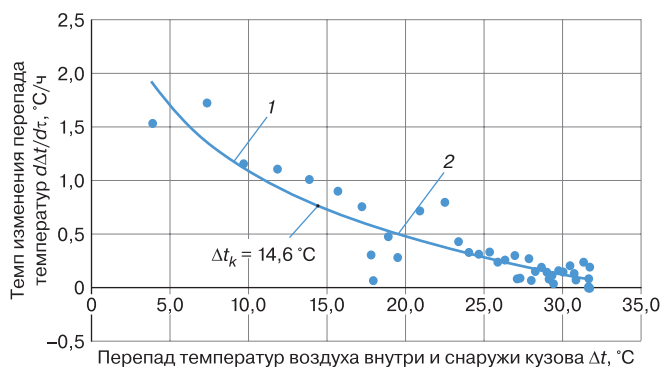


Рис. 2. Динамика перепада температур воздуха внутри и снаружи кузова пассажирского вагона модели 61-4447 в период проведения теплотехнических испытаний*:

- 1 — неравновесный режим (от $\Delta t = 3,9\text{ }^\circ\text{C}$ до точки $\Delta t_k = 14,6\text{ }^\circ\text{C}$);
- 2 — равновесный режим (от точки $\Delta t_k = 14,6\text{ }^\circ\text{C}$ до окончания испытаний)

* Источник: данные авторов

Fig. 2. Dynamics of air temperature difference inside and outside of model 61-4447 passenger carriage body during thermal engineering tests*:

- 1 — nonequilibrium mode (from $\Delta t = 3.9\text{ }^\circ\text{C}$ to the point $\Delta t_k = 14.6\text{ }^\circ\text{C}$);
- 2 — equilibrium mode (from the point $\Delta t_k = 14.6\text{ }^\circ\text{C}$ to the end of the tests)

* Source: authors' data

²³ Соглашение о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных транспортных средствах, предназначенных для этих перевозок (СПС). Организация Объединенных Наций, 2024. URL: https://unece.org/sites/default/files/2025-01/ATP%202024_R_pdf_web_protected.pdf (дата обращения: 22.03.2026).

²⁴ Патент № 2269768 С1 Российская Федерация, МПК G01N 25/18, G01M 17/00. Способ определения среднего коэффициента теплопередачи кузова транспортного средства.

(АО НО «ТИВ») испытаний четырех пассажирских вагонов [14]. Следует отметить, что испытания проведены в соответствии со стандартизированной методикой, были соблюдены все условия их проведения. Продолжительность полных циклов испытаний составила от 76 до 86 ч. Вид вагона, находящегося на испытательной позиции, приведен на рис. 3.

Для корректного сопоставления расчетных величин K_{CP} в таблице 1 (столбцы 4–7) приведены промежуточные результаты средних значений определяющих параметров, полученных за первые 11 ч проведения испытаний и использованных в последующем для расчета K_{CP} по неравновесному способу²⁵. В качестве критерия оценки выбран коэффициент детерминации R^2 (столбец 8), показывающий, насколько точно экспериментальные данные $\Delta t_{i(0-11)}$ соответствуют линии регрессии, описанной уравнением степенной функции (1).

В столбцах 10–15 даны экспериментальные значения определяющих параметров за последний час проведения испытаний (согласно требованиям методики), принятые для расчета K_{CP} . Результаты косвенного измерения значения K_{CP} с вероятностью 0,95, находящегося в пределах $K_{CP.изм} - \varepsilon_k < K_{CP} < K_{CP.изм} + \varepsilon_k$ (столбец 16), где $K_{CP.изм}$ — значение, полученное



Рис. 3. Пассажирский вагон на испытательной позиции, ОАО «Тверской вагоностроительный завод»
* Источник: данные авторов

Fig. 3. Passenger car at test site, JSC Railwaycar-Building Works Tver*
* Source: authors' data

Таблица 1

Результаты сопоставления расчетных значений K_{CP} кузовов пассажирских вагонов*

Table 1

Comparison results of K_{CP} calculated values of passenger carriage bodies*

№ п/п	Тип вагона и состояние	Интервал времени t , ч	Неравновесный метод						Равновесный метод						Расчетные значения K_{CP} в пределах $K_{CP.изм} - \varepsilon_k < K_{CP} < K_{CP.изм} + \varepsilon_k$ Вт/(м ² ·К)	Минимальные отклонения δ , %
			Средняя темп. воздуха в цехе $t_{ц}$, °С	Колебания темп. воздуха в цехе $\Delta t_{ц}$, °С	Мощность электронагревателя Q , кВт	Колебания мощн. электронагревателя ΔQ , %	Коэфф. детерминации R^2	Средний коэффициент теплоперед. огражд. конструкций вагона K_{CP} , Вт/(м ² ·К)	Средняя темп. воздуха в цехе $t_{ц}$, °С	Колебания темп. воздуха в цехе $\Delta t_{ц}$, °С	Средняя темп. воздуха в вагоне $t_{в}$, °С	Колебания темп. воздуха в вагоне $\Delta t_{в}$, °С	Мощность электронагревателя Q , кВт	Колебания мощн. электронагревателя ΔQ , %		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	61-4447 (новый)	86	14,0	0,9	5,82	3,4	0,986	0,669	12,2	0,1	44,6	0,1	5,99	0,5	$0,625 \leq 0,653 \leq 0,681$	2,4
2	61-425 (после КВР)	84	16,1	0,3	8,70	2,2	0,988	0,948	16,3	0,1	49,7	0,1	8,59	0,3	$0,936 \leq 0,976 \leq 1,016$	2,9
3	61-4495 (новый)	84	13,8	0,5	7,11	2,8	0,987	0,861	14,7	0,1	43,5	0,1	7,08	0,4	$0,828 \leq 0,866 \leq 0,904$	0,6
4	61-8444 (новый)	76	15,5	1,4	4,98	3,0	0,995	0,775	15,5	0,1	43,1	0,1	4,58	1,0	$0,856 \leq 0,896 \leq 0,936$	13,5

* Источник: данные авторов
* Source: authors' data

²⁵ Там же.

при обработке результатов измерений; ε_k — значение погрешности косвенного измерения K_{CP} , определенное по формуле:

$$\varepsilon_k = \sqrt{\left(\frac{\partial K_{CP}}{\partial Q}\right)^2 \varepsilon_Q^2 + \left(\frac{\partial K_{CP}}{\partial \Delta t}\right)^2 \varepsilon_{\Delta t}^2 + \left(\frac{\partial K_{CP}}{\partial F}\right)^2 \varepsilon_F^2}, \quad (4)$$

где $\left(\frac{\partial K_{CP}}{\partial Q}\right)^2$, $\left(\frac{\partial K_{CP}}{\partial \Delta t}\right)^2$, $\left(\frac{\partial K_{CP}}{\partial F}\right)^2$ — частные производные функции K_{CP} , вычисленные при значении переменных, соответствующих средним значениям Q , Δt , F ;

ε_Q , $\varepsilon_{\Delta t}$, ε_F — погрешности результатов измерений величин Q , Δt , F .

В столбце 17 приведены величины отклонений средних расчетных значений K_{CP} , представленных в столбце 9, от значений K_{CP} , определенных по результатам проведения эксперимента и указанных в столбце 16.

Из таблицы видно, что температура воздуха в помещении цеха во время проведения испытаний соответствовала требованиям метода и находилась в пределах 15 ± 5 °С, а ее изменения не превысили ± 2 °С, причем в последний час — не более $\pm 0,5$ °С. Относительно стабильности и поддержания величины мощности электронагревателей в период проведения испытаний можно отметить, что при незначительных изменениях в первые 11 ч ($\approx 2,8$ %) и в последний час ($\approx 0,6$ %), ее колебания для первых трех исследуемых вагонов в целом составили около 1,5 %, что также соответствовало требованиям. При испытаниях четвертого вагона зарегистрировано сверхнормативное снижение мощности на 8 % (с 4,98 до 4,58 кВт), что неизбежно отразилось на точности расчета K_{CP} ($\delta = 13,5$ %).

При исследовании значений определяющих параметров, полученных за первые 11 ч проведения испытаний, отмечено, что их отклонения от средних величин соответствовали установленным требованиям. При этом коэффициент детерминации R^2 (в диапазоне 0,986–0,995) показал, что уравнение степенной функции достаточно точно описывает изменения перепада температур воздуха внутри и снаружи кузова при начальном процессе нагрева воздуха в вагоне.

Таким образом, применение выбранного способа расчета K_{CP} для исследуемых кузовов пассажирских вагонов при условии соблюдения требований метода в первые 11 ч проведения теплотехнических испытаний

позволили рассчитать величины K_{CP} , которые попали в интервалы, полученные при косвенных измерениях значений K_{CP} с вероятностью 0,95. Расчетные значения погрешностей косвенных измерений $K_{CP} - \varepsilon_k$, как видно из данных таблицы (столбец 16), не превысили величины 0,040 Вт/(м²·К) и уложились в диапазон $\pm 4,09$ – $4,46$ %. Здесь стоит отметить, что значения неопределенности, приведенные по результатам межлабораторных сличительных испытаний по оценке K_{CP} кузовов пассажирских вагонов испытательными лабораториями ИЦ АО НО «ТИВ» и ИЦ ФГУП ВНИИЖГ Роспотребнадзора, не превышают значения 0,06 Вт/(м²·К)²⁶.

Полученные минимальные отклонения δ определили возможность для разработки соответствующей методики и расчетно-программного комплекса (РПК «ТЕПЛОМИГ») ^{27, 28}. Данное программное обеспечение содержит алгоритм по проведению расчета K_{CP} с использованием экспериментальных данных за первые 11,5 ч проведения теплотехнических испытаний по методике²⁹ с установленным в ней интервалом 30 мин. В РПК «ТЕПЛОМИГ» включены методические материалы для корректного проведения испытаний: руководство пользователя, схема расстановки датчиков температуры, порядок проведения и описание метода испытаний по равновесному режиму; при этом алгоритм расчета по определению K_{CP} выделен отдельной вкладкой. После получения информации об экспериментальных данных и проведения расчета K_{CP} все входные и выходные параметры визуализируются в диалоговом окне. Далее, при необходимости, они автоматически встраиваются в типовую форму протокола испытаний. В итоге, после внесения дополнительных сведений об объекте испытаний и заказчике протокол может быть сформирован для подписания и утверждения.

В качестве примера в табл. 2 и на рис. 4 представлены результаты экспериментальных данных, полученных за первые 11,5 ч проведения теплотехнических испытаний кузова нового вагона модели 61-4495, достаточные для расчета K_{CP} . После введения исходных данных в РПК и нажатия на вкладку «Расчет 30 мин» формируется диалоговое окно с расчетным значением $K_{CP} = 0,861$ Вт/м²·К и величиной абсолютной погрешности 0,043 Вт/м²·К.

²⁶ Техническое заключение № 121 о соответствии показателя «коэффициент теплопередачи кузова вагона» модели 61-4472.04 для пассажирских вагонов моделей 61-4465, 61-4473, 61-4523, 61-4524, 61-4525 (всех исполнений) от 29 августа 2023 г. ФГУП ВНИИЖТ. С. 9.

²⁷ Там же.

²⁸ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023661026 Российская Федерация. Расчетно-программный комплекс «ТЕПЛОМИГ» (РПК «ТЕПЛОМИГ») по определению среднего коэффициента теплопередачи кузовов пассажирских вагонов: № 2023619018; заявл. 05.05.2023; опубл. 25.05.2023 / А. А. Крылов, А. В. Кузнецов, С. Н. Науменко, П. О. Мусерский; заявитель АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта». EDN: <https://elibrary.ru/qgusky>.

²⁹ ГОСТ 33661–2015. Ограждающие конструкции помещений железнодорожного подвижного состава. Методы испытаний по определению теплотехнических показателей.

Таблица 2

Экспериментальные результаты, полученные за первые 11,5 ч теплотехнических испытаний кузова пассажирского вагона модели 61-4495*

Table 2

Experimental results obtained during the first 11.5 h of thermal engineering tests of model 61-4495 passenger carriage body*

Число замеров n	Время от начала замера при нагреве t , ч	Перепад температур воздуха $\Delta t_{cp} = t_{вн}^{cp} - t_{нар}^{cp}$, °C	Число замеров n	Время от начала замера при нагреве t , ч	Перепад температур воздуха $\Delta t_{cp} = t_{вн}^{cp} - t_{нар}^{cp}$, °C
1	0	6,0	13	6	14,0
2	0,5	6,7	14	6,5	14,4
3	1	7,5	15	7	14,9
4	1,5	8,3	16	7,5	15,4
5	2	9,1	17	8	15,8
6	2,5	9,7	18	8,5	16,2
7	3	10,4	19	9	16,5
8	3,5	11,1	20	9,5	16,9
9	4	11,8	21	10	17,2
10	4,5	12,3	22	10,5	17,5
11	5	12,9	23	11	17,8
12	5,5	13,5	24	11,5	18,1

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

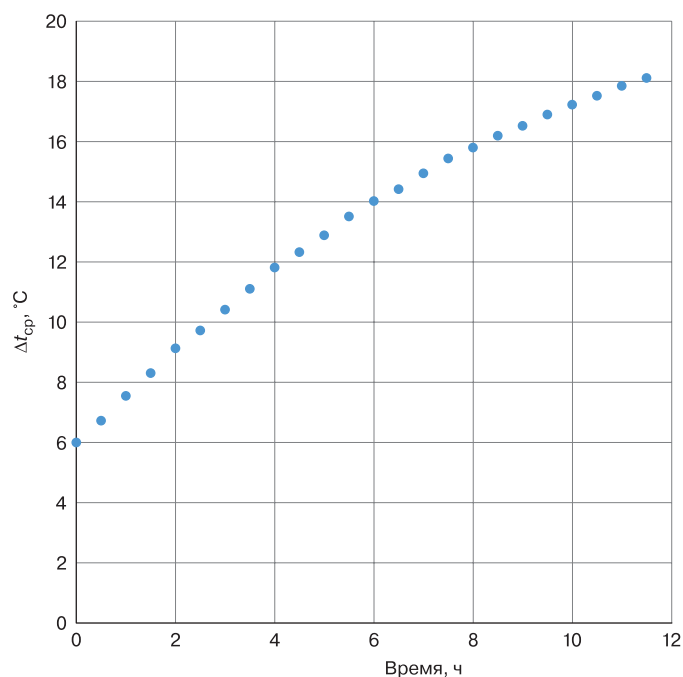


Рис. 4. Зависимость перепада температур воздуха внутри и снаружи кузова пассажирского вагона модели 61-4495 от времени проведения теплотехнических испытаний*

* Источник: данные авторов

Fig. 4. Dependence of air temperature difference inside and outside of model 61-4495 passenger carriage body on thermal engineering tests time*

* Source: authors' data

Обсуждение и заключение. Выполненный анализ показал, что при выпуске пассажирских вагонов в эксплуатацию величина среднего коэффициента теплопередачи ограждающих конструкций вагона на стоянке $K_{СР}$ может быть определена при проведении теплотехнических испытаний в производственных условиях за 11–13 ч без ущерба для точности, что в 7–8 раз быстрее по сравнению с используемым в настоящее время стандартизированным методом. Применение для этих целей методов неравновесных режимов позволяет организовать контроль нормативного теплотехнического показателя кузова не только при заводском выпуске вагонов, но и после их ввода в эксплуатацию на протяжении жизненного цикла, открывая возможности для планирования объемов энергопотребления вагонным парком и управления им путем перераспределения вагонных единиц по маршрутам и сезонам в соответствии с критерием минимальных затрат.

Благодарности: авторы выражают благодарность главному специалисту АО НО «ТИВ» Артему Олеговичу Мейстеру за помощь в написании статьи, а также рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors express gratitude to the chief specialist of JSC NO TIV Artyom O. Meister for assistance in article writing, and 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. Клюка В. П., Стариков А. П., Кузьменко Д. Ю., Попов А. А. Испытание пассажирских вагонов железных дорог на теплоустойчивость // Известия Транссиба. 2015. № 2 (22). С. 6–12. EDN: <https://elibrary.ru/udyich>.
2. Стариков А. П., Кузьменко Д. Ю. Определение теплотехнических свойств пассажирского вагона // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы научной конференции. Омск: ОмГУПС, 2016. С. 290–297. EDN: <https://elibrary.ru/wlohsr>.
3. Стариков А. П., Кузьменко Д. Ю. Determination thermal properties passenger cars. *Innovative projects and technologies in education, industry and transport. Materials of the scientific conference*. Omsk: Omsk State University of Transport; 2016. P. 290–297. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/wlohsr>.

3. Балалаев А. Н., Козеев Я. И., Пареньюк М. А. Опыт экспресс-анализа качества теплоизоляции стенок пассажирского вагона // Наука и образование транспорту. 2023. № 1. С. 17–22. EDN: <https://elibrary.ru/qciexq>.
4. Балалаев А. Н., Пареньюк М. А. The experience of express analysis of the quality of thermal insulation of passenger car walls. *Science and education for transport*. 2023;(1):17–22. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/qciexq>.
4. Балалаев А. Н., Пареньюк М. А. Прибор для оценки качества теплоизоляции пассажирских вагонов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 3. С. 189–197. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-189-197>. EDN: <https://elibrary.ru/ryhcqe>.
5. Балалаев А. Н., Пареньюк М. А. Passenger carriages heat insulation tool. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(3):189–197. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-189-197>. EDN: <https://elibrary.ru/ryhcqe>.
5. Селезнев А. В., Ворон О. А. Применение тепловизионного контроля ограждающих конструкций вагонов // Труды Ростовского государственного института путей сообщения. 2013. № 2. С. 113–116. EDN: <https://elibrary.ru/rvqihz>.
5. Селезнев А. В., Ворон О. А. Application of thermal vision control of protecting constructions of cars. *Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobsheniya*. 2013;(2):113–116. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/rvqihz>.
6. Жариков В. А., Китаев Б. Н., Разаренова Л. В. Методика определения расхода энергии на отопление пассажирских вагонов // Всерос. НИИ ж.-д. трансп. М.: Транспорт, 1994. 24 с.
6. Zharikov V. A., Kitaev B. N., Razarenova L. V. Methodology for determining energy consumption for heating passenger cars. *All-Russian Research Institute of Railway Transport*. Moscow: Transport; 1994. 24 p. (In Russ.).
7. Самошкин С. Л., Мейстер А. О., Юхневский М. А. Методические вопросы определения среднего коэффициента теплопередачи кузовов пассажирских вагонов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2019. Т. 78, № 6. С. 344–350. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-6-344-350>. EDN: <https://elibrary.ru/atitcr>.
7. Samoshkin S. L., Meyster A. O., Yukhnevskiy M. A. Methodical issues of determination of the average heat transfer coefficient of the passenger car body. *Russian Railway Science Journal*. 2019;78(6):344–350. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-6-344-350>. EDN: <https://elibrary.ru/atitcr>.
8. Бартош Е. Т. Энергетика изотермического подвижного состава. М.: Транспорт, 1976. 303 с.
8. Bartosh E. T. *Power engineering of isothermal rolling stock*. Moscow: Transport; 1976. 303 p. (In Russ.).
9. Kriha J. Instationäre Zustände bei messungen der Wärmedurchgangszelf auf Kühlfarzeugen und Bahältern, deren Auswirkung und Berechnung. *Kältetechnik*. 1965;(8):239–244.
10. Теймуразов Н. С., Науменко С. Н. Ускоренные методы оценки коэффициента теплопередачи кузовов изотермических транспортных средств // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2009. № 5. С. 18–21. EDN: <https://elibrary.ru/kwpryl>.
10. Teimurazov N. S., Naumenko S. N. Accelerated methods for estimating the heat transfer coefficient of insulated vehicle bodies. *Russian Railway Science Journal*. 2009;(5):18–21. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/kwpryl>.
11. Zang J. B., Cai M. W., Gao N. P. Numerical simulation of body heat transfer coefficient test of a railway vehicle. *Advanced Materials Research*. 2011;291–294:1713–1721. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.291-294.1713>.
12. Shi S., Gao H. X., Li M., Liu B. Calculation of coach body heat transfer coefficient for the high-speed railway train in China. *Advanced Materials Research*. 2013;805–806:562–569. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.805-806.562>.

13. Hofstädter R. N., Zero T., Dullinger C., Richter G., Kozek M. Heat capacity and heat transfer coefficient estimation for a dynamic thermal model of rail vehicles. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 2017;23(5):439–452. <https://doi.org/10.1080/13873954.2016.1263670>.

14. Мейстер А.О., Юхневский М.А. Определение среднего коэффициента теплопередачи кузовов пассажирских вагонов // Проблемы и перспективы развития вагоностроения: тезисы VI науч.-практич. конф., 18–19 декабря 2014 г. Брянск: БГТУ, 2014. С. 93–95.

Meyster A. O., Yukhnevskiy M. A. Methodical issues of determination of the average heat transfer coefficient of the passenger car body. *Problems and prospects of car building development: abstracts of the Sixth Scientific and Practical Conference, 18–19th December, 2014*. Bryansk: BSTU; 2014. P. 93–95. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Прокопий Олегович МУСЕРСКИЙ,

заместитель начальника центра, центр «Электрификация и теплоэнергетика» (ЦЭТ), Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Россия, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), SPIN-код: 9468-6229, <https://orcid.org/0000-0001-6038-3435>

Сергей Николаевич НАУМЕНКО,

д-р техн. наук, руководитель центра, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Россия, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), SPIN-код: 6856-2301, <https://orcid.org/0000-0002-6097-9375>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Prokopy O. MUSERSKIY,

Deputy Head of the Center, Electrification and Thermal Power Engineering Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), SPIN-code: 9468-6229, <https://orcid.org/0000-0001-6038-3435>

Sergey N. NAUMENKO,

Dr. Sci. (Eng.), Head of the Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), SPIN-code: 6856-2301, <https://orcid.org/0000-0002-6097-9375>

ВКЛАД АВТОРОВ

Прокопий Олегович МУСЕРСКИЙ. Обзор основных направлений исследований, сбор и структурирование методики проведения испытаний, расчет зависимостей и написание статьи (50 %).

Сергей Николаевич НАУМЕНКО. Обоснование направления исследования, формулировка цели и задач, формирование выводов и предложений, обработка результатов (50 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Prokopy O. MUSERSKIY. Scientific literature search and analysis, model design, calculations performance and analysis, article writing (50 %).

Sergey N. NAUMENKO. Substantiation of research direction, goals and objectives setting, conclusions and proposals formation, processing of results (50 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 16.09.2025, рецензия от первого рецензента получена 19.02.2026, рецензия от второго рецензента получена 03.03.2026, принята к публикации 25.03.2026.

The article was submitted 16.09.2025, first review received 19.02.2026, second review received 03.03.2026, accepted for publication 25.03.2026.



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 625: 621.311: 681.5

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

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-164-174>

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



Совершенствование архитектуры системы учета электроэнергии на железнодорожном транспорте

В. С. Басыров✉, А. Б. Косарев

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях глобальной цифровой трансформации железнодорожного транспорта и перехода от дискретной фиксации параметров к созданию цифровых двойников энергосистем повышается актуальность системной модернизации автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии ОАО «РЖД» для преодоления технологического разрыва и обеспечения предиктивного управления энергопотреблением, а также техническим состоянием оборудования. Цель работы — разработка и теоретическое обоснование целевой архитектуры унифицированной модели цифровой платформы, интегрирующей функции юридически значимого коммерческого учета, предиктивной аналитики (прогнозирование электропотребления и отказов оборудования), взаимодействия с корпоративными системами и внешними интеллектуальными энергосистемами.

Материалы и методы. В основе исследования лежит системный анализ архитектурно-функциональной структуры существующей информационно-измерительной системы. Используются методы структурного моделирования, компаративного анализа подсистем учета и парка приборов учета, проведены анализ нормативно-правовой базы и критический обзор научных публикаций.

Результаты. В ходе исследования выявлены ключевые недостатки существующей информационно-измерительной системы: технологическая фрагментарность, разнотипность парка оборудования, недостаточный уровень автоматизации отчетности. Отмечены слабая интеграция с общекорпоративным программным контуром и низкие темпы адаптации к концепции интеллектуальных энергосистем. Действующая инфраструктура не обеспечивает мониторинга распределения энергии от источника до потребителя и не обладает функционалом предиктивной аналитики. Полученные результаты послужили основой для формирования целевой модели унифицированной цифровой платформы. Предложена четырехуровневая архитектура системы.

Обсуждение и заключение. Обоснована необходимость перехода к унифицированной цифровой платформе, интегрирующей функции предиктивной аналитики и бесшовного взаимодействия с различными системами. Предложенное решение создает основу для разработки цифровых двойников энергообъектов, снижения операционных издержек и коммерческих потерь.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АИИС КУЭ, энергоэффективность, учет, энергосистема, железнодорожный транспорт

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Басыров В. С., Косарев А. Б. Совершенствование архитектуры системы учета электроэнергии на железнодорожном транспорте // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2026. Т. 85, № 2. С. 164–174. EDN: <https://elibrary.ru/rwjmqp>.

✉ basyrov.valentin@vniizht.ru (В. С. Басыров)

© Басыров В. С., Косарев А. Б., 2026



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 625: 621.311: 681.5

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

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-164-174>

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



Improvement of architecture for electricity metering system on railway transport

Valentin S. Basyrov✉, Alexander B. Kosarev

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the context of the global digital transformation of railway transport and the transition from discrete parameter recording to the creation of digital twins of energy systems, it has become increasingly critical to implement systematic modernisation of Automated Information and Measurement System for Commercial Electricity Metering of JSC “Russian Railways”, in order to close technological gaps and ensure predictive control of energy consumption and the technical condition of equipment. The purpose of the work is the development and theoretical justification of the target architecture for a unified model of a digital platform integrating functions of legally significant commercial metering, predictive analytics (forecasting of electricity consumption and equipment failures), interaction with corporate systems, and external intelligent power grids.

Materials and methods. The research is based on a systematic analysis of the architectural-functional structure of the existing Information and Measurement System. Methods of structural modeling, comparative analysis of accounting subsystems and metering equipment fleet were used. Regulatory and legal framework was analysed, and a critical review of scientific publications was conducted.

Results. The study identified key limitations of the existing Information and Measurement System: technological fragmentation, diversity of equipment fleet, insufficient level of reporting automation. Weak integration with the corporate software environment and low rates of adaptation to the concept of intelligent power grids were noted. The current infrastructure does not provide monitoring of energy distribution from source to consumer and lacks predictive analytics functionality. The obtained results served as the basis for forming the target model of a unified digital platform. A four-level architecture for the system is proposed.

Discussion and conclusion. The necessity of transitioning to a unified digital platform integrating predictive analytics functions and seamless interaction with various systems is substantiated. The proposed solution creates a foundation for developing digital twins of energy objects, reducing operational costs and commercial losses.

KEYWORDS: AIMS CEM, energy efficiency, metering, power system, railway transport

FOR CITATION: Basyrov V. S., Kosarev A. B. Improvement of architecture for electricity metering system on railway transport. *Russian Railway Science Journal*. 2026;85(2):164–174. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-164-174>.

✉ basyrov.valentin@vniizht.ru (V. S. Basyrov)

© Basyrov V. S., Kosarev A. B., 2026

Введение. Железнодорожный транспорт потребляет около 1 % от объема мирового производства всей энергии (свыше 2 % в транспортном секторе [1]). В Российской Федерации значимость отрасли подтверждается ее доминирующей ролью в транспортной системе: в 2025 г. на железнодорожный транспорт приходилось 45,9 % всего грузооборота (включая трубопроводный транспорт)¹, до 27 % пассажирских перевозок в дальнем сообщении² и более 7 % перевозок пассажиров транспортом общего пользования³. В структуре железнодорожного хозяйства на потребление электроэнергии приходится доминирующая часть затрат (свыше 54 % в 2024 г.⁴) от общего объема потребления топливно-энергетических ресурсов, при этом годовой объем потребления достигает 50,9 млрд кВт·ч. Учитывая, что 44,2 млрд кВт·ч этого объема (86,8 %) в 2024 г. было израсходовано на тяговые нужды⁵, модернизация систем учета на базе интеллектуальных цифровых платформ становится неизбежным условием реализации Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года⁶ и ведомственного проекта «Цифровая энергетика»⁷.

Современные тенденции развития мировой энергетики свидетельствуют о том, что переход от централизованных моделей к гибридным, распределенным и интеллектуальным энергосистемам выступает ключевым фактором транспарентности и экономичности энергоснабжения. Применительно к специфике железнодорожного транспорта, характеризующейся доминированием импульсных тяговых нагрузок, внедрение технологии интеллектуальных энергосистем обеспечивает реализацию функциональных возможностей, а именно:

- адаптивного управления спросом (с верификацией по графику движения поездов и прогнозной модели загрузки тяговой сети);
- интеграции распределенной генерации и объектов микрогенерации на базе возобновляемых источников энергии (далее — ВИЭ) в систему электроснабжения стационарной инфраструктуры (вокзалы, депо и т. д.);

- прогностической аналитики пиковых нагрузок с горизонтом прогнозирования 24–72 ч;
- автоматизированной идентификации и верификации структуры потерь с дифференциацией на техническую и коммерческую составляющие;
- предиктивного мониторинга технического состояния сети и раннего обнаружения предаварийных режимов на основе анализа трендов электропотребления и показателей качества электроэнергии.

Точный мониторинг параметров сети позволяет принимать обоснованные управленческие решения для обеспечения эксплуатационной надежности оборудования, снижения затрат и потребления электроэнергии [2].

Нормативы технологических потерь электроэнергии при передаче по электрическим сетям ОАО «РЖД», утвержденные региональными энергетическими комиссиями субъектов Российской Федерации, находятся в диапазоне от 0 до 14,8 %⁸, при этом на основе экспертных оценок уровень фактических технологических потерь на полигоне постоянного тока составляет 10,4 % [3]. На железнодорожном транспорте данный показатель варьируется и прямое сравнение с общероссийскими показателями затруднительно из-за специфики эксплуатационных режимов. Анализ энергоэффективности показывает существенную вариативность в электросетевом комплексе страны: уровень относительных потерь в сетях варьируется в широком диапазоне 2,75–29,3 %, что близко к целевому значению ПАО «Россети» (7,34 %), но на 2–7 % выше среднемировых стандартов и показателей в ряде стран Европейского союза (1,95–22,63 %) [4]. При годовом объеме потерь в России около 100 млрд кВт·ч более 80 % структуры потерь приходится на коммерческую составляющую [4]. В связи с этим необходима четкая декомпозиция потерь электроэнергии на технические и коммерческие составляющие. Технические потери — это физические потери (в линиях электропередачи, ошиновке, оборудовании и т. д.), определяемые законами физики. Коммерческие потери — это разница между учтенным и оплаченным потреблением (включающая

¹ Грузооборот по видам транспорта // ЕМИСС. Государственная статистика. URL: <https://fedstat.ru/indicator/30990> (дата обращения: 01.04.2026).

² Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г.: распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/2/11577> (дата обращения: 01.04.2026).

³ Перевозки пассажиров по видам транспорта общего пользования // ЕМИСС. Государственная статистика. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/31315.do> (дата обращения: 01.04.2026).

⁴ Приложение к разделу «Энергоэффективность» // ОАО «РЖД». Отчет об устойчивом развитии 2024. URL: <https://sr2024.rzd.ru/ru/appendix/energy-efficiency> (дата обращения: 01.04.2026).

⁵ Там же.

⁶ Об Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года: распоряжение Правительства РФ от 12 апреля 2025 г. № 908-р. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202504140013> (дата обращения: 01.04.2026).

⁷ Ведомственный проект «Цифровая энергетика» // Министерство энергетики Российской Федерации. URL: <https://minenergo.gov.ru/activity/project-activities/projects/departamental-project-digital-energy> (дата обращения: 01.04.2026).

⁸ Нормативы технологических потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям ОАО «РЖД» на 2025 г. URL: <https://company.rzd.ru/api/media/resources/2506563?action=download> (дата обращения: 01.04.2026).

безучетное и бездоговорное потребление, хищения, погрешности измерительных трансформаторов и приборов учета).

Корреляционная зависимость между степенью оснащенности интеллектуальными счетчиками и динамикой снижения потерь электроэнергии представлена на рис. 1, который наглядно демонстрирует тренд на снижение потерь по мере увеличения доли современных приборов учета.

При интерпретации данных необходимо учитывать нелинейный характер рассматриваемой зависимости. Коммерческие потери зависят не только от метрологической точности учета, но и от мер противодействия несанкционированному отбору мощности. Внедрение интеллектуальных систем учета реализуется в комплексе с мерами по сокращению коммерческих потерь. Основным эффектом достигается за счет выявления безучетного потребления, однако это не затрагивает уровень технических потерь в сетях [4]. Снижение технических потерь достигается за счет выравнивания суточных графиков нагрузки по данным предиктивной аналитики. Высокоточное прогнозирование позволяет планировать мероприятия по выравниванию нагрузки. Согласно закону Джоуля – Ленца это минимизирует математическое ожидание квадрата тока и, как следствие, снижает нагрузочные потери в проводниках и силовых трансформаторах.

Несмотря на возрастающий научно-практический интерес к интеллектуальным энергосистемам и частностям в виде интеллектуальных систем учета, актуальная исследовательская база характеризуется определенной фрагментарностью. В литературе отсутствует комплексный системный подход к анализу архитектуры автоматизированной информационно-измери-

тельной системы коммерческого учета электроэнергии ОАО «РЖД» (далее — АИИС КУЭ) в контексте цифровой трансформации железнодорожной отрасли. В ходе анализа выявлен ряд существенных ограничений. Работы [5–6] ограничены локальным применением на Куйбышевской железной дороге (например, нейросетевые технологии для анализа небаланса на подстанции «Жигулевское море»), но не содержат механизмов масштабирования на всю инфраструктуру ОАО «РЖД» или интеграции с корпоративными системами. А. Л. Каштанов и О. О. Комякова [7] фокусируются на перетоках мощности в сетях постоянного тока, при этом за рамками анализа остаются механизмы формирования коммерческих потерь. Фундаментальные основы единой системы учета, заложенные В. Т. Черемисиным и др. [8], на текущем этапе требуют дополнения в части применения алгоритмов искусственного интеллекта для предиктивной аналитики. Концептуальные предложения Ю. Н. Короля и Ю. А. Чернова [9] по мониторингу и учету электроэнергии на фидерах контактной сети и электроподвижного состава не получили практической реализации ввиду отсутствия унифицированной технологической платформы и нормативной базы. Обобщающие исследования В. Э. Воронницкого [4], а также Т. В. Ховаловой и С. С. Жолнерчик [10] не учитывают отраслевую специфику железных дорог. Констатация технологического разрыва в работе [11] не выделяет железнодорожный транспорт в качестве автономного объекта исследования с уникальными режимами энергопотребления.

Таким образом, в отечественной научной литературе наблюдается отсутствие комплексного анализа архитектуры АИИС КУЭ как единой цифровой платформы.

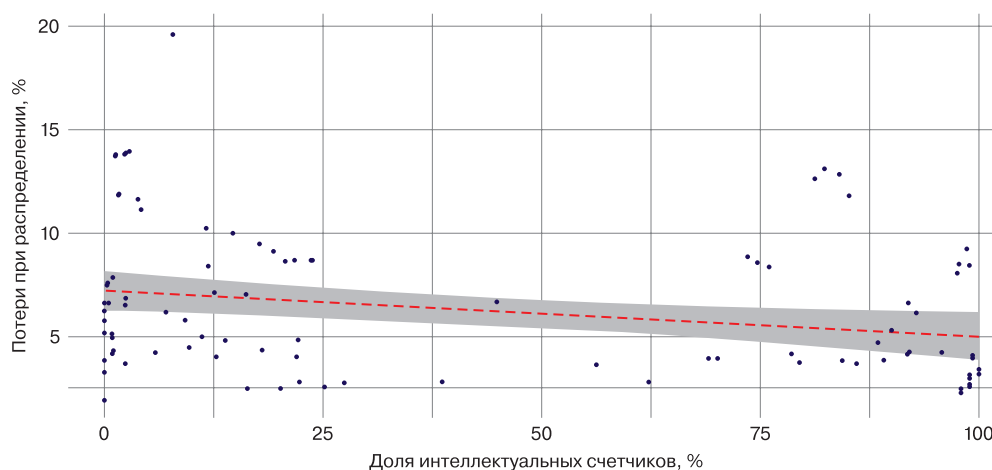


Рис. 1. Зависимость относительных потерь при распределении электроэнергии от доли установленных интеллектуальных счетчиков*
* Источник: [4]

Fig. 1. Dependence of relative power distribution losses on the share of installed smart meters*
* Source: [4]

Концепция такой платформы должна обеспечить конвергенцию процессов коммерческого учета, мониторинга показателей качества электроэнергии, предиктивной аналитики и механизмов управления спросом в рамках интеллектуальных энергосистем. Учитывая масштаб энергетической инфраструктуры ОАО «РЖД», сопоставимый только с ПАО «Россети» [12], функция учета электроэнергии трансформируется из вспомогательного технического процесса в механизм управления издержками и обеспечения энергетической эффективности.

В соответствии с отраслевыми программными документами до 2030 г. в ОАО «РЖД» предусматривается достижение полной оснащённости системами АИИС КУЭ всего совокупного парка тяговых подстанций в количестве 1423 единиц [13]. Однако представляется очевидным, что экстенсивный путь развития (количественное наращивание парка приборов учета электроэнергии) без качественной концептуальной модернизации архитектуры не обеспечит достижения требуемого уровня операционной эффективности и оставит нерешенным вопрос системной интеграции данных.

Материалы и методы. Исследование выполнено в рамках комплексного системного подхода к анализу архитектурно-функциональной структуры существующей АИИС КУЭ. В ходе работы проведен анализ нормативно-правового регулирования системы. Основными инструментами выступили следующие методы:

1. Системный анализ применен для выявления функциональных взаимосвязей и архитектурных ограничений между уровнями АИИС КУЭ: оптовый рынок электроэнергии (далее — ОРЭ), розничный рынок электроэнергии (далее — РРЭ), железнодорожные узлы (далее — ЖУ).

2. Сравнительный анализ подсистем учета РЖД (ОРЭ, РРЭ, ЖУ) реализован по унифицированному набору параметров: функциональное назначение,

метрологические характеристики, топология каналов связи и уровень автоматизации процессов. Внимание уделено верификации степени интеграции с корпоративными системами планирования ресурсов предприятия (Enterprise Resource Planning — ERP), автоматизированными системами управления технологическим процессом (далее — АСУ ТП), диспетчерским управлением и сбором данных (Supervisory Control and Data Acquisition — SCADA).

3. С помощью методов архитектурного моделирования разработана четырехуровневая целевая модель функционирования АИИС КУЭ (измерение → агрегация → аналитическая обработка → верификация отчетности). Данный подход обеспечивает формализацию информационных потоков и выявляет в существующей архитектуре отсутствие контуров обратной связи, что препятствует переходу от пассивной фиксации потребления к реализации функций активного энергоменеджмента и адаптивного управления нагрузкой в режиме реального времени.

4. Анализ нормативно-технической документации:

- Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике»⁹ (далее — ФЗ-35);
- Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений»¹⁰ (далее — ФЗ-102);
- Постановление Правительства РФ от 04.05.2012 № 442 «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии»¹¹ (далее — ПП-442);
- Постановление Правительства РФ от 27.12.2004 № 861 «Об утверждении Правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг <...>»¹² (далее — ПП-861);
- международные стандарты: IEC 62056-1-0:2014¹³, IEC 62056-1-1:2016¹⁴, IEC 60870-5-101:2003¹⁵,

⁹ Федеральный закон от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» (с изм. на 23 марта 2026 г.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/901856089> (дата обращения: 01.04.2026).

¹⁰ Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (с изм. на 8 августа 2024 г.; ред., действ. с 1 января 2026 г.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902107146> (дата обращения: 01.04.2026).

¹¹ Постановление Правительства РФ от 04 мая 2012 г. № 442 (ред. от 17 февраля 2026) «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии». URL: <https://docs.cntd.ru/document/902349816> (дата обращения: 01.04.2026).

¹² Постановление Правительства РФ от 27 декабря 2004 г. № 861 «Об утверждении Правил недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг <...>». URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102090372> (дата обращения: 01.04.2026).

¹³ IEC 62056-1-0:2014. Electricity metering data exchange. — The DLMS/COSEM suite — Part 1-0: Smart metering standardisation framework. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/20027/a79bb0ce52cd4c88876af0a065b9193/IEC-62056-1-0-2014.pdf> (дата обращения: 01.04.2026).

¹⁴ IEC 62056-1-1:2016. Electricity metering data exchange — The DLMS/COSEM suite — Part 1-1: Template for DLMS/COSEM communication profile standards. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/22595/f2d3cb27db5e41288c1ef6e7a1e6e60/IEC-TS-62056-1-1-2016.pdf> (дата обращения: 01.04.2026).

¹⁵ IEC 60870-5-101:2003. Telecontrol equipment and systems — Part 5-101: Transmission protocols — Companion standard for basic telecontrol tasks. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/11984/7e8c2b8e47b44a5294e306ccb4c4499/IEC-60870-5-101-2003.pdf> (дата обращения: 01.04.2026).

IEC 60870-5-104:2006¹⁶, IEC 61970-1:2005¹⁷, IEC 61968-1:2020¹⁸, ISO 50001:2018¹⁹;

• ГОСТ Р МЭК 61850 (серия стандартов)²⁰, ГОСТ Р 59966–2021²¹, ГОСТ Р 58940–2020²², ГОСТ Р 71331–2024²³, СТО 34.01-5.1-009-2024²⁴.

5. Анализ технической документации оборудования (технических паспортов и руководств по эксплуатации) с точки зрения поддержки предиктивной аналитики:

• микропроцессорные приборы учета компаний ООО «Эльстер Метроника», АО «Концерн Энергомера», ООО «НПК Инкотекс», АО «РиМ», ООО «НПП Марс-Энерго», Echelon Corporation, АО ННПО им. М. В. Фрунзе, ООО «ТехноЭнерго»;

• устройства передачи данных (далее — УСПД) компаний АО «Системы и Технологии», Echelon Corporation, НПО «РиМ», ООО «Прософт-Системы»;

• серверное и сетевое оборудование.

Оценка проводилась по критериям совместимости протоколов и потенциала интеграции в цифровые платформы.

Результаты. Проведенный анализ подтвердил высокую степень централизации АИИС КУЭ, достигнутую в рамках единого программно-аппаратного комплекса (далее — ПАК) на базе программного обеспечения (далее — ПО) «Горизонт». В структуре ПАК выделены три функциональных сегмента: АИИС КУЭ ОРЭ (границы балансовой принадлежности), АИИС КУЭ РРЭ (сторонние нетяговые потребители) и АИИС КУЭ ЖУ (внутренний учет). Архитектура основана на иерархической трехуровневой модели (табл. 1), при этом на объектах с низкой плотностью точек учета допускаются двухуровневые решения для снижения капитальных затрат.

К достоинствам существующей архитектуры следует отнести высокий уровень централизации сбора данных и унификацию программных решений на базе ПО «Горизонт». Тем не менее, система характеризуется значительной аппаратной фрагментацией (использование разнотипного парка оборудования) и дефицитом интеллектуальных функций управления. В текущем состоянии архитектура остается преимущественно пассивной, ориентированной на задачи коммерческого учета, что ограничивает возможности перехода к предиктивной аналитике и превентивного предупреждения аварий. Характеристики подсистем детализированы в табл. 2.

Текущее состояние системы учета характеризуется критическим технологическим разрывом: из 291 тыс. точек учета 90 % (262 тыс. единиц) оснащены устаревшими приборами низких классов точности (1,0–2,0), не поддерживающими спецификацию протокола обмена данными электронных счетчиков (далее — СПОДЭС). Это ограничивает функционал системы только простым сбором показаний, не позволяя использовать приборы учета как полноценные датчики мониторинга сети.

Вследствие этого отсутствие контроля и мониторинга показателей качества электроэнергии (далее — ПКЭ), в частности, деструктивных гармонических искажений и несимметрии напряжений, не только ведет к сокращению срока службы оборудования, но и увеличивает погрешность сведения баланса. В таких условиях значительная часть энергопотоков оказывается вне контура интеллектуального управления. В рамках данной работы АИИС КУЭ рассматривается прежде всего как инструмент интеллектуального учета и управления энергопотоками. Анализ мониторинга

¹⁶ IEC 60870-5-104:2006. Telecontrol equipment and systems — Part 5-104: Transmission Protocols — Network Access for IEC 60870-5-101 Using Standard Transport Profiles. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/13185/0954c8823c20441b97ee1cec747c9b15/IEC-60870-5-104-2006.pdf> (дата обращения: 01.04.2026).

¹⁷ IEC 61970-1:2005. Energy management system application program interface (EMS-API) — Part 1: Guidelines and general requirements. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/11047/b9d172d8fb074cfbb57c536e6a5926a0/IEC-61970-1-2005.pdf> (дата обращения: 01.04.2026).

¹⁸ IEC 61968-1:2020. Application integration at electric utilities — System interfaces for distribution management — Part 1: Interface architecture and general recommendations. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/23638/b3d6c39cd2bb4701aedf29431861e4b5/IEC-61968-1-2020.pdf> (дата обращения: 01.04.2026).

¹⁹ Международный стандарт ISO 50001:2018. Системы энергетического менеджмента требования и руководство по их применению / пер. и науч.-техн. ред. В. А. Качалова. URL: <https://certgroup.org/wp-content/uploads/2021/10/iso-50001-2018-perevod-ot-29-08-2018-1.pdf> (дата обращения: 01.04.2026).

²⁰ Серия стандартов ГОСТ Р МЭК 61850. Сети и системы связи на подстанциях.

²¹ ГОСТ Р 59966–2021. Протокол обмена информацией между компонентами распределенных интеллектуальных систем учета ресурсов. Протокол интеллектуальных распределенных систем (ПИРС). Основные положения: утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 декабря 2021 г. № 1838-ст. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 113 с.

²² ГОСТ Р 58940–2020. Требования к протоколам обмена информацией между компонентами интеллектуальной системы учета и приборами учета: утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 июля 2020 г. № 415-ст. М.: Стандартинформ, 2021. 101 с.

²³ ГОСТ Р 71331–2024. Интеллектуальные системы учета электрической энергии (мощности). Общие технические требования: утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 апреля 2024 г. № 432-ст. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 23 с.

²⁴ СТО 34.01-5.1-009-2024. Приборы учета электроэнергии. Общие технические требования: утв. и введен в действие приказом ПАО «Россети» от 21 февраля 2024 г. № 77. 164 с. URL: <https://www.rosseti.ru/upload/iblock/583/6kgrduk5xaegyv7pr16ztga3q2hmtllk/%D0%A1%D0%A2%D0%9E%2034.01-5.1-009-2024%20%D0%9F%D0%A3.pdf> (дата обращения: 01.04.2026).

Таблица 1

Иерархическая модель взаимодействия уровней учета электроэнергии*

Table 1

Hierarchical model of electricity metering level interaction*

Уровень	Компонент	Функции	Связь/интерфейсы	Протоколы/стандарты
Уровень 1 (Измерение)	Счетчики, трансформаторы тока, трансформаторы напряжения — информационно-измерительный комплекс (ИИК), измерительные цепи, шлюзы-концентраторы	Прецизионное измерение параметров (U, I, P, Q), профилирование нагрузки	Подключение к УСПД	RS-485, RS-232, M-Bus, ИК-порт, Modbus, DLMS/COSEM, CSD, GPRS
Уровень 2 (Сбор)	Информационно-вычислительный комплекс электроустановки на базе УСПД	Автоматизированный опрос ИИК, агрегация данных, верификация, локальное хранение, передача данных	Связь со счетчиками и ИВК (прием от УСПД, передача на ИВК) от УСПД, передача на ИВК)	GSM/GPRS, Ethernet, радиоканал; Modbus, CSD, сетевые протоколы (TCP/IP)
Уровень 3 (Центр)	Информационно-вычислительный комплекс (ИВК) с ПО «Горизонт»	Централизованный сбор, обработка, хранение, отчетность, резервирование	Прием данных от ИВК всех филиалов. Интеграция с АО «Администратор торговой системы оптового рынка электроэнергии» (АО «АТС»), поддержка стандартов безопасности	Сетевые протоколы (TCP/IP), Ethernet, XML

* Источник: [6–9]

* Source: [6–9]

Таблица 2

Сравнение параметров подсистем АИИС КУЭ*

Table 2

Comparison of AIMS CEM subsystem parameters*

Параметр	АИИС КУЭ ОРЭ	АИИС КУЭ РРЭ	АИИС КУЭ ЖУ
Назначение	Коммерческий учет на оптовом рынке электроэнергии	Учет для розничного рынка (энергосбыт)	Внутренний учет на объектах ж.-д. транспорта и энергоменеджмент
Класс точности приборов учета	0,2S–0,5S	1,0–2,0	0,5–1,0
Уровень автоматизации	Высокий	Средний	Высокий
Каналы связи	Ethernet, CSD	PLC, GPRS	CSD
Интеграция	Система для коммерческого расчета на оптовом рынке электроэнергии	Биллинговые системы	Диспетчеризация
Уровень безопасности	Высокий	Средний	Высокий
Количество точек учета	~24 000	~238 000	~29 000

* Источник: [9]

* Source: [9]

ПКЭ, требующий специфических метрик и алгоритмов, вынесен за рамки исследования и будет рассмотрен отдельно. Систематизация выявленных проблем приведена в табл. 3.

Табл. 1–3 подтверждают, что, несмотря на различия в функциональном назначении и технической реализации, все подсистемы разделяют общие ограничения, связанные с отсутствием функций предиктивной аналитики и слабой интеграцией с корпора-

тивными системами. Функционирование АИИС КУЭ осуществляется в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации, определяющим принципы работы энергетических рынков и требования к точности измерений. Правовую основу системы составляют ФЗ-35 и ФЗ-102, устанавливающие метрологические стандарты для систем учета. Порядок взаимодействия субъектов при обмене данными и механизмы доступа к инфраструктуре определяются ПП-442

Систематизация проблем функционирования АИИС КУЭ*

Systematisation of AIMS CEM operational issues*

Проблема	Конкретизация	Последствия
Разнотипность оборудования	Эксплуатация 15 типов счетчиков, 8 типов УСПД от разных производителей	Невозможность стандартизации, рост операционных затрат на обслуживание, риск отказов при обновлении ПО
Отсутствие полной аналитики энергопотоков	Нет единого контура мониторинга энергопотоков от подстанции до конечного потребителя	Невозможность разделения технических и коммерческих потерь
Отсутствие мониторинга качества электроэнергии	Нет измерения гармоник, несимметрии, фликера, колебаний напряжения	Риск сокращения срока службы оборудования
Слабая интеграция с ERP/АСУ ТП/SCADA	Нет унифицированных интерфейсов (API) для интеграции с ERP/АСУ ТП/SCADA, нет прямого обмена данными	Данные учета не используются для оптимизации графиков движения, управления тяговыми нагрузками
Отсутствие функций интеллектуальных энергосистем	Отсутствие механизмов управления спросом	Невозможность снизить пиковые нагрузки, сократить стоимость энергии
Отсутствие предиктивной аналитики	Нет моделей машинного обучения (Machine Learning, ML-моделей) для предиктивной аналитики (прогнозирование нагрузки, отказов оборудования, качества электроэнергии) на основе исторических данных	Невозможно осуществлять прогнозирование отказов УСПД, измерительных и силовых трансформаторов, счетчиков
Нормативно-техническое несоответствие	Ограниченная поддержка протоколов ГОСТ Р МЭК 61850	Барьеры при создании цифровых двойников и интеграции в экосистему цифровых подстанций

* Источник: таблица составлена авторами по материалам ГОСТ Р МЭК 61850, ГОСТ Р 71331–2024, [4–6, 8–9, 11]

* Source: table is compiled by the authors according to the GOST R IEC 61850, GOST R 71331–2024, [4–6, 8–9, 11]

и ПП-861. Соблюдение данных нормативных актов обеспечивает юридическую достоверность собираемых данных и правомерность их использования в коммерческих расчетах.

Вместе с тем текущая нормативно-техническая база, ориентированная преимущественно на коммерческий учет и базовую передачу данных, характеризуется отсутствием требований к предиктивной аналитике и верификации данных через цифровые двойники. Данный правовой вакуум формирует технологическое отставание отрасли от стандартов ISO и IEC на 5–7 лет, создавая барьер для легитимного внедрения инновационных решений в системах тягового электроснабжения. Переход к современным моделям управления энергоэффективностью требует не только технической модернизации, но и опережающего обновления нормативно-правового поля с учетом международного опыта интеллектуальных энергосистем.

Таким образом, несмотря на достигнутый прогресс в централизации, текущая архитектура АИИС КУЭ остается фрагментированной, что ограничивает видимость энергопотоков, не поддерживает энергоменеджмент и лишена интеллектуальных функций. Это препятствует переходу от пассивного коммерческого учета к активному управлению энергопотоками. На рис. 2

представлена архитектура предлагаемой платформы, состоящей из четырех уровней:

Уровень 1: устройства — интеллектуальные счетчики, приборы контроля качества электроэнергии, поддерживающие протоколы СПОДЭС;

Уровень 2: сбор и передача данных — УСПД, каналы связи (Ethernet, GSM/GPRS, СПД), обеспечивающие надежную доставку данных;

Уровень 3: платформа данных — единое хранилище («озеро данных»), включающее временные ряды (Time-Series Database, InfluxDB), операционные данные (PostgreSQL), файловые хранилища (HDFS, S3);

Уровень 4: прикладные сервисы — аналитика, визуализация, интеграция с ERP/SCADA, цифровые двойники, формирование отчетности по энергопотреблению.

Проектируемая платформа базируется на принципах модульности и горизонтальной масштабируемости, что позволяет модернизировать отдельные компоненты и наращивать парк приборов учета без прерывания технологических процессов. Архитектура обеспечивает высокий уровень информационной безопасности за счет сквозного шифрования, применения электронных цифровых подписей и строгого разграничения прав доступа.

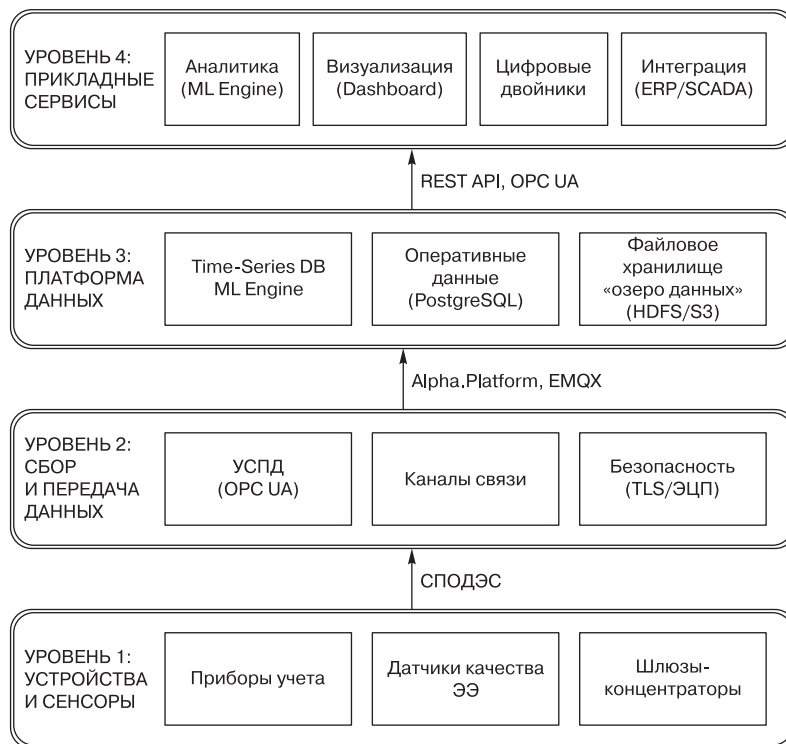


Рис. 2. Предлагаемая целевая архитектура унифицированной иерархической четырехуровневой модели цифровой платформы АИИС КУЭ*

* Источник: данные авторов

Fig. 2. Proposed target architecture of the unified hierarchical four-level model for the AIMS CEM digital platform*

* Source: authors' data

Ключевым отличием от традиционных систем регистрации данных является интеграция встроенных ML-моделей, переводящая учет в предиктивный режим. Система прогнозирует не только объемы энергопотребления, но и потенциальные отказы оборудования, динамику изменения ПКЭ и режимы работы сети. Выявление аномалий обеспечивает раннее предупреждение рисков через цепочку: данные → анализ аномалий → принятие решений → результат.

Ограничения существующей архитектуры обосновывают необходимость модернизации АИИС КУЭ до уровня интеллектуальной цифровой платформы. Переход к такой модели позволяет заменить реактивное поведение на проактивное, обеспечивая эффективное управление энергопотоками в режиме реального времени и повышая общую устойчивость системы.

Обсуждение и заключение. Для преодоления выявленных барьеров необходим переход к унифицированной цифровой платформе, интегрирующей функции учета, глубокой аналитики и адаптивного управления. Основные принципы такой архитектуры представлены в табл. 4. Внедрение предлагаемых решений позволит трансформировать систему учета из вспомогательного технического инструмента в элемент проактивного энергоменеджмента компании.

Таблица 4

Концептуальные основы построения интеллектуальной цифровой платформы АИИС КУЭ*

Table 4

Conceptual foundations for building the intelligent digital platform of the AIMS CEM*

Категория	Содержание
Выявленные проблемы	<ul style="list-style-type: none"> • Разнотипность оборудования • Отсутствие алгоритмов предиктивной аналитики и интеллектуального управления • Изолированность данных от корпоративных систем • Необходимость корректировки устаревших нормативов
Принципы новой архитектуры	<ul style="list-style-type: none"> • Унификация оборудования (через протокол СПОДЭС) • Единое информационное пространство («озеро данных») • Расширенная функциональность: <ul style="list-style-type: none"> – мониторинг качества энергии; – выявление несанкционированного потребления; – прогнозирование нагрузок и отказов оборудования; – совершенствование графиков потребления и передачи электроэнергии • Интеграция с ВИЭ (солнечные станции на вокзалах и др.)

Окончание табл. 4

Категория	Содержание
Ожидаемые результаты	<ul style="list-style-type: none"> • Снижение коммерческих и технических потерь • Автоматизация расчетов и отчетности • Сокращение операционных затрат • Повышение прозрачности и энергоэффективности • Повышение надежности инфраструктуры • Основа для создания цифровых двойников и интеллектуальных энергосистем • Снижение углеродного следа за счет оптимизации генерации

* Источник: [4, 6–8, 11, 13]

* Source: [4, 6–8, 11, 13]

Важно подчеркнуть, что повышение точности измерений не ведет к автоматическому улучшению эксплуатационных показателей без наличия аналитических модулей интерпретации и регламентов реагирования на отклонения. Только интеграция учета с системами управления (АСУ ТП, SCADA) позволяет трансформировать «сырые» данные в инструмент автоматического управления процессами.

Предлагаемая концепция функционирования энергосистемы способна формировать виртуальные источники генерации и гибко управлять спросом. Это позволяет оптимизировать инвестиционную программу за счет эффективного использования существующих мощностей, вместо строительства новых объектов для покрытия пиков нагрузки. Кроме того, предиктивное управление и точное прогнозирование спроса в реальном времени способствуют существенному снижению углеродного следа. Внедрение данной архитектуры превращает АИИС КУЭ из пассивной системы регистрации в активный инструмент управления, что полностью соответствует целям ведомственного проекта «Цифровая энергетика».

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

Acknowledgements: 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. Чернышова Л. И. Факторный анализ расхода электроэнергии на тягу поездов // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2021. № 11-2. С. 326–330. <https://doi.org/10.17513/vaael.1954>. EDN: <https://elibrary.ru/wptqj>.
- Chernishova L. I. Factor analysis of electric power consumption for training trains. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2021;(11-2):326–330. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/vaael.1954>. EDN: <https://elibrary.ru/wptqj>.
2. Черемисин В. Т., Ушаков С. Ю., Истомин С. Г. Контроль нерационального использования электрической энергии на тягу поездов с применением бортовых информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии // Известия Транссиба. 2015. № 1 (21). С. 69–74. EDN: <https://elibrary.ru/tuxvfl>.
- Cheremisin V. T., Ushakov S. Yu., Istomin S. G. Controlling the irrational electricity consumption for train traction by the use of information-measuring systems of electricity metering on the rolling stock. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2015;(1(21)):69–74. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tuxvfl>.
3. Истомин С. Г., Пестренко А. Е. Оценка составляющих потерь электроэнергии электроподвижным составом и устройствами электроснабжения // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2020. Т. 17, № 3. С. 387–396. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2020-3-387-396>. EDN: <https://elibrary.ru/qeewut>.
- Istomin S. G., Pestrenko A. E. Assessment of the electric power loss components by the electric stock and electric power supply facilities. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2020;17(3):387–396. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2020-3-387-396>. EDN: <https://elibrary.ru/qeewut>.
4. Воротницкий В. Э. Снижение потерь электроэнергии в электрических сетях — часть комплексной задачи обеспечения их эффективного функционирования и развития // Электроэнергия. Передача и распределение. 2025. № 6 (93). С. 12–20. EDN: <https://elibrary.ru/dzppib>.
- Voronitsky V. E. Reduction of energy losses in electric networks as part of the complex task to provide their effective operation and development. *ELECTRIC POWER. Transmission and Distribution*. 2025;(6(93)):12–20. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/dzppib>.
5. Франтасов Д. Н., Кудряшова Ю. В., Воронина Е. В. Применение искусственного интеллекта в системе учета потерь электроэнергии // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 3 (51). С. 116–125. <https://doi.org/10.21685/2227-8486-2024-3-10>. EDN: <https://elibrary.ru/pbfevf>.
- Frantsov D. N., Kudryashova Yu. V., Voronina E. V. The use of artificial intelligence in the energy loss metering system. *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2024;(3(51)):116–125. (In Russ.). <https://doi.org/10.21685/2227-8486-2024-3-10>. EDN: <https://elibrary.ru/pbfevf>.
6. Молочков А. А., Тюгашев А. А., Франтасов Д. Н., Кудряшова Ю. В. Модернизация информационно-измерительной системы с использованием нейросетевых технологий для анализа небаланса электроэнергии на Куйбышевской железной дороге // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2019. № 1 (61). С. 57–67. EDN: <https://elibrary.ru/mkuaow>.
- Molochkov A. A., Tyugashev A. A., Frantsov D. N., Kudryashova Yu. V. Modernization of information-measurement system with use of neural network technologies for analysis of electricity balance on Kuibyshev Railway. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2019;(1(61)):57–67. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/mkuaow>.
7. Каштанов А. Л., Комякова О. О. Оценка перетоков мощности в тяговой сети постоянного тока по данным автоматизированной системы АСМУЭ ФКС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11, № 3. С. 130–133. EDN: <https://elibrary.ru/tyibhp>.

Kashtanov A. L., Komiakova O. O. Evaluation of power flow in traction network DC according to the automated system of FCC ASMAA. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2015;11(3):130–133. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tyibhp>.

8. Каштанов А. Л., Ушаков С. Ю., Черемисин В. Т. Разработка единой автоматизированной системы учета электроэнергии тягового электроснабжения ОАО «РЖД» // Бюллетень результатов научных исследований. 2015. № 1 (14). С. 70–75. EDN: <https://elibrary.ru/tqilcd>.

Kashtanov A. L., Ushakov S. Yu., Cheremisin V. T. Development of unified automated system for electric energy metering for traction electric power supply JSC “Russian Railroads”. *Bulletin of scientific research results*. 2015;(1(14)):70–75. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/tqilcd>.

9. Король Ю. Н., Чернов Ю. А. Внедрение единой автоматизированной системы мониторинга и учета электроэнергии на фидерах контактной сети и ЭПС — первый шаг к созданию «интеллектуальной» сети тягового электроснабжения // Известия Транссиба. 2012. № 4 (12). С. 102–110. EDN: <https://elibrary.ru/plshkn>.

Korol Yu. N., Chernov Yu. A. Implementation of the unified automated system and metering on the feeder contact network and EPS — the first step towards “intelligent” networks traction power supply. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2012;(4(12)):102–110. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/plshkn>.

10. Ховалова Т. В., Жолнерчик С. С. Эффекты внедрения интеллектуальных электроэнергетических сетей // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018. № 2 (105). С. 92–101. EDN: <https://elibrary.ru/utcgam>.

Hovalova T. V., Zholnerchik S. S. The effects of the introduction of smart grids. *Strategic Decisions and Risk Management*. 2018;(2(105)):92–101. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/utcgam>.

11. Хоботова Л. В., Непринцева Е. В., Шубин С. А. Стратегия цифровой трансформации: оценка цифровой зрелости электроэнергетической отрасли России // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2022. Т. 13, № 3. С. 234–244. <https://doi.org/10.17747/2618-947X-2022-3-234-244>. EDN: <https://elibrary.ru/erbhcy>.

Khotobova L. V., Neprintseva E. V., Shubin S. A. Digital transformation strategy: assessment of digital maturity of the Russian electric power industry. *Strategic Decisions and Risk Management*. 2022;13(3):234–244. (In Russ.). <https://doi.org/10.17747/2618-947X-2022-3-234-244>. EDN: <https://elibrary.ru/erbhcy>.

12. Баринов И. А., Нуретдинова Н. А., Смолин П. И., Горшков М. С., Крылов А. А. Исследование перспективности применения накопителей энергии на железнодорожном транспорте // Альтернативная энергетика. Специальный выпуск. 2025. № 2 (17). С. 52–59.

Barinov I. A., Nuretdinova N. A., Smolin P. I., Gorshkov M. S., Krylov A. A. Study of the prospects of energy storage devices application in railway transport. *Alternative energy. Special issue*. 2025;(2(17)):52–59. (In Russ.).

13. Актуализация энергетической стратегии ОАО «Российские железные дороги» на перспективу до 2030 года // Инновации транспорта. 2020. Т. 39, № 1. С. 6–10.

Updating Energy Strategy of JSC “Russian Railways” for the period up to 2030. *Transport Innovations*. 2020;39(1):6–10. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Валентин Сергеевич БАСЫРОВ,

заместитель директора — начальник Центра научно-технических компетенций в области электрификации и электроснабжения железных дорог (ЦНТКЭ),

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Россия, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), SPIN-код: 9414-9108, <https://orcid.org/0009-0001-9488-6070>

Александр Борисович КОСАРЕВ,

д-р техн. наук, профессор, научный руководитель института — ученый секретарь, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, Россия, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valentin S. BASYROV,

Deputy Director — Head of the Centre of Scientific and Technical Competence in Railway Electrification and Electricity Supply, Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), SPIN-code: 9414-9108, <https://orcid.org/0009-0001-9488-6070>

Alexander B. KOSAREV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Scientific Adviser — Scientific Secretary, Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Валентин Сергеевич БАСЫРОВ. Характеристика и описание функционирования существующей системы. Предложение унифицированной цифровой платформы для устранения архитектурных недостатков (80 %).

Александр Борисович КОСАРЕВ. Формулировка цели и методологии исследования, анализ результатов, выводы (20 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Valentin S. BASYROV. Characteristics and description of the existing system operation. Proposal of a unified digital platform to address architectural deficiencies (80 %).

Alexander B. KOSAREV. Research methodology and goal formulation, results analysis, conclusions (20 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 23.10.2025, рецензия от первого рецензента получена 05.03.2026, рецензия от второго рецензента получена 16.03.2026, рецензия от третьего рецензента получена 18.03.2026, рецензия от четвертого рецензента получена 20.03.2026, принята к публикации 13.04.2026.

The article was submitted 23.10.2025, first review received 05.03.2026, second review received 16.03.2026, third review received 18.03.2026, fourth review received 20.03.2026, accepted for publication 13.04.2026.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 629.463.12: 536.7

EDN: <https://elibrary.ru/qtqkjlw>DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-175-186>

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



Термодинамическая оценка потенциала использования сжиженного природного газа в автономном рефрижераторном вагоне

Д. Я. Монастырский✉, В. В. Галов, И. Г. Киселев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Для энергоснабжения холодильных установок автономных рефрижераторных вагонов обычно используют дизель-генераторные силовые установки. С целью повышения энергетической эффективности предлагается замена дизеля на газопоршневой двигатель, с переходом от дизельного топлива к сжиженному природному газу и внедрением контура рекуперации холода от регазификации сжиженного природного газа для дополнительного холодоснабжения грузового помещения совместно с основной холодильной установкой. Эта замена потребует комплексной оценки потенциала утилизации физической эксергии, доступной в процессе регазификации. Целью работы является определение термодинамических границ и обоснование выбора рабочих параметров рекуперации холода при регазификации сжиженного газа в теплообменнике, расположенном в грузовом помещении рефрижераторного вагона и включенном в топливную линию энергетической установки.

Материалы и методы. В исследовании применено численное термодинамическое моделирование открытого цикла регазификации для сжиженного природного газа, предназначенного для использования в качестве моторного топлива. Использован энергетический и эксергетический анализ, метод тепловых балансов. Рассчитаны показатели удельной холодопроизводительности и эксергетического КПД второго рода относительно цикла Карно.

Результаты. Рассмотрена схема рекуперации холода сжиженного природного газа в открытом цикле с криогенным насосом. Представлены результаты численного моделирования теплофизических процессов регазификации. Проведена оценка зависимостей удельной холодопроизводительности и эксергетического КПД от рабочего давления, определены параметры, исключающие кипение газа вне контура рекуперации. Установлено, что повышение давления в линии регазификации обеспечивает рост термодинамической эффективности системы при незначительном снижении энтальпийного потенциала.

Обсуждение и заключение. Сформулированы критерии эксергетической эффективности для автономных систем, позволившие перейти от энтальпийной оценки потенциала рекуперации сжиженного природного газа к эксергетической. Выявлен диапазон рабочих давлений и температур, в котором достигается термодинамический оптимум рекуперации холода от сжиженного природного газа. Данный режим является необходимым условием для гидравлической устойчивости системы подачи топлива, позволяет упростить конструкцию рефрижераторного вагона и унифицировать схему подачи топлива при переходе на сжиженный природный газ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автономный рефрижераторный вагон, сжиженный природный газ, рекуперация холода, фазовое превращение, термодинамический анализ

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Монастырский Д. Я., Галов В. В., Киселев И. Г. Термодинамическая оценка потенциала использования сжиженного природного газа в автономном рефрижераторном вагоне // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2026. Т. 85, № 2. С. 175–186. EDN: <https://elibrary.ru/qtqkjlw>.

Original article

UDK 629.463.12: 536.7

EDN: <https://elibrary.ru/qtqjlv>DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-175-186>

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



Thermodynamic assessment of potential for using liquefied natural gas in autonomous refrigerated car

Dmitrii Ya. Monastyrskii✉, Vladimir V. Galov, Igor G. Kiselev

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

Introduction. Diesel generators sets are commonly used to power the refrigeration units of autonomous refrigerated cars. In order to increase energy efficiency of autonomous refrigerated cars it is proposed to switch from diesel fuel to liquefied natural gas (LNG), with transition from diesel fuel to LNG and introduction of cold recovery units from LNG regasification for additional cooling of cargo area in conjunction with the main refrigeration unit. This transition necessitates a comprehensive assessment of the potential for utilising the physical exergy available during the regasification process. The aim of the study is to determine the thermodynamic limits and justify the selection of operating parameters for LNG cold energy recovery in the auxiliary cooling circuit of the cargo compartment.

Materials and methods. The study employed numerical thermodynamic processes simulation of an open regasification cycle for LNG fuel. Energy and exergy analyses, along with the heat balance method, were utilised. Key indicators, including specific cooling capacity and second-law exergetic efficiency relative to the Carnot cycle, were calculated.

Results. The authors examined LNG cold recovery scheme based on an open cycle with a cryogenic pump. The results of the numerical simulation of the thermophysical regasification processes are presented. The dependencies of specific cooling capacity and exergetic efficiency on operating pressure were evaluated, and parameters ensuring the prevention of LNG boiling outside the recovery circuit were determined. It was established that pressure increase in the regasification line significantly enhances the thermodynamic efficiency of the system with negligible reduction in enthalpy potential.

Discussion and conclusion. Exergetic efficiency criteria for autonomous systems were formulated, enabling a transition from an enthalpy-based to an exergy-based assessment of LNG recovery potential. A rational range of operating pressures was identified, achieving a thermodynamic optimum for cold recovery. This operating mode is essential for ensuring the hydraulic stability of the fuel supply system, simplifying the refrigerated car design and unifying the fuel supply scheme during the transition to LNG usage.

KEYWORDS: autonomous refrigerated car, liquefied natural gas, cold recovery, phase transition, thermodynamic analysis

FOR CITATION: Monastyrskii D. Ya., Galov V. V., Kiselev I. G. Thermodynamic assessment of potential for using liquefied natural gas in autonomous refrigerated car. *Russian Railway Science Journal*. 2026;85(2):175–186. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-175-186>.

Введение. К 2026 году производство автономных рефрижераторных вагонов (далее — АРВ) налажено на предприятиях ООО «РусРеф», ООО «УК РМ Рейл», АО «Уралвагонзавод» и АО «Алтайвагон». Востребованность услуг перевозок грузов при помощи АРВ растет, в связи чем ведется подготовка к серийному производству на других российских заводах. Производимые АРВ моделей 16-5213, 16-1247 и 16-2155 используются для энергоснабжения холодильных установок дизель-генераторные установки (далее — ДГУ), расположенные в машинных отделениях АРВ. В качестве топлива для ДГУ могут быть использованы различные марки дизельного топлива, в том числе предназначенные для тепловозных дизелей. В условиях роста цен на дизельное топливо и расширения производства сжиженного природного газа (далее — СПГ) в Российской Федерации предлагается перевод АРВ с дизельного топлива на СПГ, при котором он используется одновременно как источник холода.

В современной литературе вопросы применения СПГ в качестве источника холода освещены достаточно широко. Организация перевозок в рефрижераторном подвижном составе рассмотрена в работах В. В. Ефимова¹ и М. С. Боровиковой². Перспективы применения газомоторного топлива и экологические аспекты затронуты в исследованиях С. А. Колина [1] и Т. Банашкевича [2]. Однако существующие подходы к оценке холодильного потенциала СПГ базируются преимущественно на первом законе термодинамики и рассматривают энтальпию испарения как полезный энергетический ресурс. Такой подход прослеживается, к примеру, в работах О. А. Ворона [3]. При этом изменение энтропии в процессах теплообмена при большом перепаде температур приводит к значительным необратимым потерям, которые энтальпийный метод не учитывает. Фундаментальные основы эксергетического метода, позволяющего оценить эти потери, изложены в трудах В. М. Бродянского [4]. Применительно к задачам рекуперации холода СПГ данный метод развивался в работах зарубежных исследователей, таких как Дж. Хор [5] и П. Дорош [6], однако специфика железнодорожного подвижного состава в них не учтена. В обзорной работе [7] систематизированы современные направления использования холода от регазификации СПГ, включая охлаждение различных сред, а также кондиционирование помещений. В работе [8] выполнен термодинамический анализ схем рекуперации холода СПГ. Особенности теплообмена при регазификации в трубах рассмотрены в [9], а расчетные и эксперимен-

тальные данные по промышленным теплообменникам для утилизации холода СПГ приведены в [10].

Анализ работ [7–10] показывает, что холод, высвобождаемый при регазификации СПГ, целесообразно рассматривать как полезный энергетический ресурс для холодильных, энергетических и теплообменных систем. Рекуперация холода применяется для выработки электроэнергии, охлаждения и других процессов, где применяются криогенные вещества. Применительно к АРВ, с учетом малого расхода топлива, перевод на СПГ позволяет получить источник дополнительного холода. К преимуществам СПГ также относятся высокая плотность хранения газового топлива в сжиженном состоянии и меньший уровень выбросов продуктов сгорания по сравнению с дизельным топливом [2, 6]. Экономические преимущества связаны со снижением топливной составляющей работы автономной энергетической установки. За счет более высокой удельной теплоты сгорания СПГ по сравнению с дизельным топливом, а также за счет использования холода регазификации для частичной разгрузки основной холодильной установки, сокращается расчетная потребность в топливе на маршруте и повышается автономность вагона на имеющемся бортовом запасе топлива [3].

Целью настоящей работы является определение термодинамических границ и обоснование выбора рабочих параметров рекуперации холода при регазификации СПГ в теплообменнике, расположенном в грузовом помещении рефрижераторного вагона и включенном в топливную линию энергетической установки вагона.

Характеристики рабочего тела и системы рекуперации. В соответствии с ГОСТ 34894–2022³, СПГ — это криогенная жидкость, состоящая преимущественно из метана, и, как правило, имеющая при атмосферном давлении температуру хранения минус 162 ± 8 °С. В качестве моторного топлива для двигателей внутреннего сгорания (далее — ДВС) рекомендовано применение СПГ марки Б с молярной долей метана не менее 80 %.

В связи с особенностями состава СПГ в качестве рабочего тела в расчетной модели условно принят метан. Для описания окружающей среды принято атмосферное давление. Температура в машинном отделении принята 293 К (+20 °С), температурный режим в грузовом помещении 253 К (–20 °С) для замороженных и 278 К (+5 °С) для охлажденных продуктов. Давление СПГ в топливной линии принято от 0,1 до 0,6 МПа в пределах рабочих давлений криогенных топливных систем. В качестве начального расчетного состояния температура СПГ на входе в участок

¹ Ефимов В. В., Кобозева Н. Г., Конограй О. А., Слободчиков Н. А. Железнодорожный хладотранспорт и доставка скоропортящихся грузов: учеб. М.: УМЦ ЖДТ, 2022. 340 с.

² Боровикова М. С. Организация перевозочного процесса на железнодорожном транспорте: учеб. М.: Автограф, 2014. 412 с.

³ ГОСТ 34894–2022. Газ природный сжиженный. Технические условия: принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации, протокол от 30 сентября 2022 г. № 154-П. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 11 с.

регазификации принята равной 111,6 К (–162 °С) в соответствии с температурой кипения метана при атмосферном давлении. Указанная температура кипения характеризует тепловое состояние СПГ во время хранения в криобаке до начала интенсивных процессов теплообмена и регазификации.

Рассмотренный открытый термодинамический цикл регазификации СПГ (рис. 1) реализуется в системе подачи топлива к ДВС основного холодильного агрегата АРВ 1. Топливо подается из криогенного бака 8. Цикл включает адиабатное сжатие жидкой фазы СПГ в криогенном насосе 9, изобарный подвод теплоты в змеевиковом теплообменнике 11, установленном в грузовом помещении АРВ, а затем подачу газа, нагретого до температуры воздуха в машинном отделении 1, в газопоршневой двигатель 4 через газовый

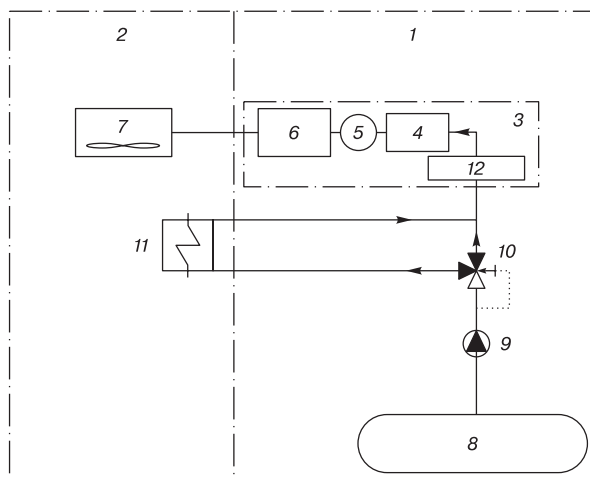


Рис. 1. Схема регазификации СПГ в топливном контуре холодильного агрегата*:

- 1 — машинное отделение АРВ; 2 — грузовое помещение АРВ;
- 3 — холодильный агрегат; 4 — газопоршневой ДВС; 5 — генератор электроэнергии; 6 — компрессорно-конденсаторный блок;
- 7 — воздухоохладитель; 8 — криогенный бак с СПГ; 9 — криогенный насос; 10 — регулируемый клапан; 11 — змеевиковый теплообменник; 12 — газовый коллектор

* Источник: данные авторов

Fig. 1. Layout of LNG regasification in fuel circuit*:

- 1 — engine room of autonomous refrigerated car; 2 — cargo area of autonomous refrigerated car; 3 — refrigeration unit; 4 — gas piston engine; 5 — electric generator; 6 — compressor-condenser unit;
- 7 — air cooler; 8 — cryogenic tank with LNG; 9 — cryogenic pump; 10 — control valve; 11 — serpentine heat exchanger; 12 — gas manifold

* Source: authors' data

коллектор 12. Двигатель обеспечивает работу генератора электроэнергии 5, который питает компрессорно-конденсаторный блок 6 основной холодильной установки 3, связанный с воздухоохладителем грузового помещения 7. В этой схеме теплообменник линии регазификации СПГ 11 используется как дополнительный источник холода совместно с основной холодильной установкой.

Тепловая нагрузка на испаритель определяется потребностью поддержания температурного режима в грузовом помещении АРВ 2 в соответствии с требованиями к перевозке охлажденных и замороженных грузов. Производительность испарителя напрямую связана с расходом топлива и нагрузкой на двигатель холодильного агрегата.

Для определения параметров топливной линии массовый расход $G_{\text{СПГ}}$, кг/с, вычисляется согласно выражению (1)⁴:

$$G_{\text{СПГ}} = \frac{N_{\text{ГТД}}}{Q_{\text{н,СПГ}}^{\text{P}} \eta_{\text{ГТД}}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{ГТД}}$ — мощность теплового двигателя навесной дизель-генераторной установки с генератором 15 кВт, принятая равной $24 \cdot 10^3$ Вт (24 кВт)⁵;

$Q_{\text{н,СПГ}}^{\text{P}}$ — низшая теплота сгорания газа марки Б по ГОСТ Р 56021–2014⁶, для двигателей допускается в диапазоне от 45,4 до 52,6 МДж/кг, для расчета принято значение $47 \cdot 10^6$ Дж/кг (47 МДж/кг);

$\eta_{\text{ГТД}}$ — КПД двигателя, для газовых двигателей принимаемый от 28 до 40%⁷, в расчете принят $\eta_{\text{ГТД}} = 0,35$ в качестве консервативной оценки с учетом малой мощности установки.

Расчетный максимальный массовый расход СПГ для ДВС мощностью 24 кВт, необходимого для питания генератора переменного тока 15 кВт, составляет 0,00146 кг/с, или около 5,2 кг/ч.

Термодинамическая модель цикла регазификации.

Регазификация в настоящей работе понимается как испарение жидкой фазы СПГ при давлении кипения с последующим перегревом пара до параметров сжигания в ДВС. Конечной точкой процесса регазификации принимается температура в машинном отделении, давление в топливной линии постоянное. Модель теплообмена принимается как идеальная. Доступный холодильный потенциал при рекуперации холода от регазификации СПГ приведен на рис. 2.

⁴ ГОСТ 14846–2020. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний: принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации, протокол от 30 октября 2020 г. № 134-П. М.: Стандартиформ, 2020. 89 с.

⁵ Официальный каталог компании Carrier Global Corporation, модель PowerLINE RG15 Series 24 Generator Set. URL: <https://www.shareddocs.com/hvac/docs/2000/Public/06/62-11875.pdf> (дата обращения: 20.04.2026).

⁶ ГОСТ Р 56021–2014. Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия: утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 мая 2014 г. № 432-ст. М.: Стандартиформ, 2019. 11 с.

⁷ Klimstra J. Performance of lean-burn natural-gas-fueled engines — On specific fuel consumption, power capacity and emissions. Technical Papers. SAE International; 1990. P. 460–472.

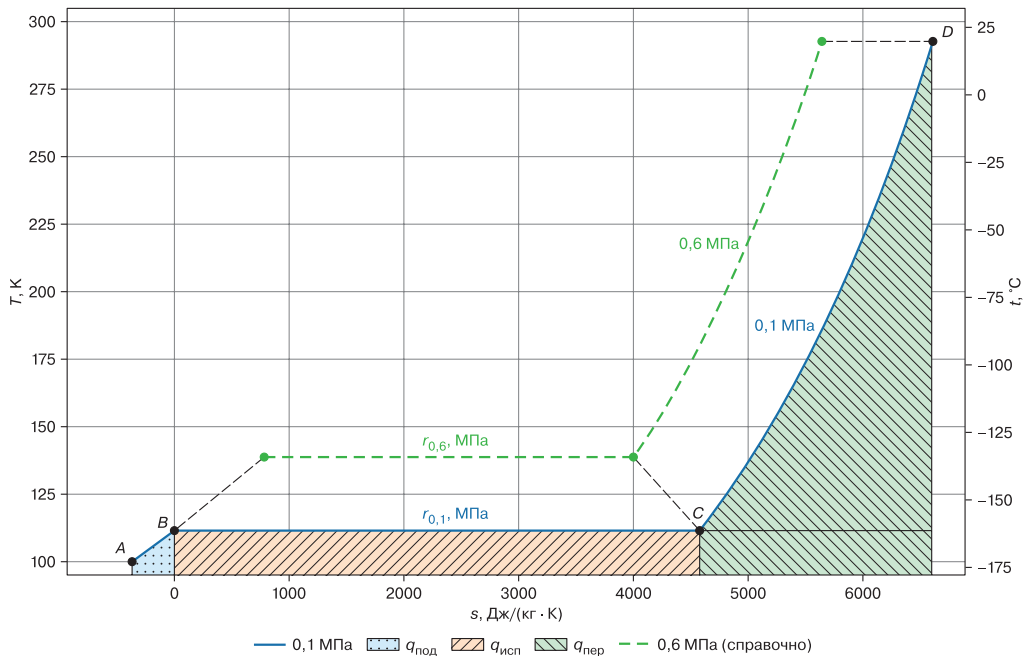


Рис. 2. Графическая оценка холодопроизводительности СПГ в диапазоне давлений от 0,1 до 0,6 МПа*:

A — жидкость на входе в испаритель; *B* — насыщенная жидкость при термодинамических параметрах кипения СПГ; *C* — насыщенный пар при температуре кипения; *D* — газ на выходе из теплообменника. Линия *BC* соответствует теплоте парообразования СПГ; $q_{\text{под}}$, $q_{\text{исп}}$, $q_{\text{пер}}$ — удельная энергия охлаждения до кипения, при кипении и после кипения соответственно, Дж/кг; $r_{0,1 \text{ МПа}}$ и $r_{0,6 \text{ МПа}}$ — удельная теплота парообразования СПГ при давлениях 0,1 и 0,6 МПа соответственно, Дж/кг

* Источник: данные авторов

Fig. 2. Graphical evaluation of LNG cooling capacity in pressure range from 0.1 to 0.6 MPa*:

A — liquid at the inlet to the evaporator; *B* — saturated liquid at the thermodynamic parameters of LNG boiling; *C* — saturated vapor at the boiling temperature; *D* — gas at the outlet of the heat exchanger. Line *BC* corresponds to the latent heat of vaporisation of LNG; $q_{\text{под}}$, $q_{\text{исп}}$, $q_{\text{пер}}$ — specific cooling energy before boiling, during boiling, and after boiling, respectively, J/kg; $r_{0,1 \text{ МПа}}$ and $r_{0,6 \text{ МПа}}$ — specific latent heat of LNG vaporisation at pressures of 0.1 and 0.6 MPa, respectively, J/kg

* Source: authors' data

Для оценки термодинамического качества холода используется понятие физической эксергии потока. Без учета скоростной и потенциальной компонент, удельная физическая эксергия определяется как разность состояний потока вещества и окружающей среды (T_0, p_0). Принимая, что влияние механической работы давления пренебрежительно мало, полная эксергия регазификации $e_{\text{СПГ}}$, Дж/кг, определяется по формуле (2) [4, 6]:

$$e_{\text{СПГ}} = \left[c_{p,ж}(T_{\text{кип}} - T_{\text{вх,ж}}) - T_0 c_{p,ж} \ln \left(\frac{T_{\text{кип}}}{T_{\text{вх,ж}}} \right) \right] + [r_{\text{СПГ}} - T_0(s_{г,кип} - s_{ж,кип})] + \left[c_{p,г}(T_0 - T_{\text{кип}}) - T_0 c_{p,г} \ln \left(\frac{T_0}{T_{\text{кип}}} \right) \right], \quad (2)$$

где $T_{\text{кип}}$ — температура кипения СПГ, К;

$T_{\text{вх,ж}}$ — температура жидкой фазы, К;
 $c_{p,ж}$ — изобарная массовая теплоемкость метана, Дж/(кг·К);
 $r_{\text{СПГ}}$ — удельная теплота парообразования СПГ⁸, 510 000 Дж/кг;
 $s_{г,кип}$, $s_{ж,кип}$ — удельная энтропия газа и жидкости на кривой насыщения при температуре кипения СПГ, Дж/(кг·К);
 T_0 — температура окружающей среды, К;
 $c_{p,г}$ — изобарная массовая теплоемкость газа после кипения, Дж/(кг·К).

Изменение теплосодержания СПГ в теплообменнике при регазификации определяется по формуле (3)⁹:

$$Q_{\text{рег}} = G_{\text{СПГ}} q_{\text{рег}} = G_{\text{СПГ}} [c_{p,ж}(T_{\text{кип}} - T_{\text{вх,ж}}) + r_{\text{СПГ}} + c_{p,г}(T_{\text{вых,г}} - T_{\text{кип}})], \quad (3)$$

где $Q_{\text{рег}}$ — холодопроизводительность процесса регазификации, Вт;

⁸ Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей: 2-е изд. М.: Наука, 1972. 720 с.

⁹ Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика: учеб. для теплоэнерг. спец. вузов. 4-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1983. 416 с.

$q_{\text{рег}}$ — удельная холодопроизводительность процесса регазификации, Дж/кг;

$T_{\text{вых,г}}$ — температура газа на выходе из теплообменника, К.

Эксергетическая мощность потока СПГ $E_{\text{рег}}$, Вт, в модели принимается по формуле (4) [4]:

$$E_{\text{рег}} = G_{\text{СПГ}} e_{\text{СПГ}}. \quad (4)$$

Так как рассматриваемая система является холодильной машиной, качество холода E_Q (полезная эксергия), Вт, переданного потребителю, определяется как работа обратного цикла Карно [4]:

$$E_Q = \int \left(\frac{T_0}{T_{\text{тп}}(x)} - 1 \right) dQ = \left(\frac{T_0}{T_{\text{тп}}} - 1 \right) Q_{\text{рег}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{тп}}$ — температура на границе теплообмена со стороны потребителя, грузового помещения, К. Выражение в скобках представляет собой эксергетическую температурную функцию, или фактор Карно. Эффективность процесса рекуперации холода оценивается как [4]:

$$\eta_{\text{II}} = \frac{E_Q}{E_{\text{рег}}} = \frac{\left(\frac{T_0}{T_{\text{тп}}} - 1 \right) Q_{\text{рег}}}{G_{\text{СПГ}} e_{\text{СПГ}}} = \frac{q_{\text{рег}}(T_0 - T_{\text{тп}})}{e_{\text{СПГ}} T_{\text{тп}}}, \quad (6)$$

где η_{II} — эксергетический КПД второго рода.

Из уравнения (6) следует, что термодинамическая эффективность является функцией давления регазификации и температурного уровня потребителя — температуры среды помещений кузова АРВ. Численный анализ данной зависимости позволяет определить оптимальные рабочие параметры цикла.

Условия гидравлической устойчивости. Нижняя граница давления обусловлена работой топливной системы при атмосферном давлении окружающей среды и необходимостью обеспечения кавитационного запаса насоса; верхняя граница принята исходя из условий обеспечения безопасной эксплуатации. Запас принят для сохранения однофазного состояния рабочего тела при прохождении через элементы топливной линии от бака до испарителя. Недопустимо кипение и возникновение паровой фазы в регулируемом клапане, так как это приводит к износу и повреждению клапана, скачкообразному изменению гидравлического сопротивления и снижению эффективности теплопередачи [11]. Условие отсутствия парообразования при дросселировании в регулируемом клапане записывается как выражение с условием отсутствия вскипания жидкости при дросселировании

и требованием запаса давления относительно давления насыщения:

$$P_{\text{квых}} \geq P_{\text{сат}}(T_{\text{СПГ}}) + \Delta P_{\text{зап}}, \quad (7)$$

где $P_{\text{квых}}$ — минимальное абсолютное давление на выходе из клапана, Па;

$P_{\text{сат}}$ — абсолютное давление насыщенных паров при температуре СПГ, Па;

$T_{\text{СПГ}}$ — температура СПГ в топливной линии, К;

$\Delta P_{\text{зап}}$ — запас по давлению, Па.

С учетом теплопритоков, критерий нормальной работы участка с клапаном предполагает, что суммарный теплоприток на участке не должен превышать энтальпийный запас жидкости до температуры насыщения, что формулируется выражением (8):

$$q_{\text{вн}} L_{\text{уч}} \leq G_{\text{СПГ}} c_{p,ж}(T_{\text{сат}}(P_{\text{вх}}) - T_{\text{вх}}), \quad (8)$$

где $q_{\text{вн}}$ — внешние линейные теплопритоки относительно участка топливной линии;

$L_{\text{уч}}$ — длина рассматриваемого участка, м;

$T_{\text{сат}}$ — температура насыщения, К;

$P_{\text{вх}}$ — абсолютное давление на входе в клапан, принятое равным давлению в топливной линии, Па;

$T_{\text{вх}}$ — температура СПГ на входе в рассматриваемый участок, принимается равной температуре хранения СПГ, К.

Анализ фазовых диаграмм метана показывает, что при низких рабочих давлениях температура СПГ в линии находится в непосредственной близости к кривой насыщения, что создает риск возникновения кавитации от внешних теплопритоков из машинного отделения [7].

При температуре хранения 111,6 К давление насыщенных паров метана составляет около 0,096 МПа. Следовательно, при давлении в топливной линии около 0,1 МПа запас над насыщением составляет порядка 0,004 МПа, а допустимый подогрев жидкости до начала кипения составляет около 0,6 К. При давлении 0,6 МПа температура кипения метана составляет около 145,2 К, запас возрастает до 34,2 К. При массовом расходе 0,00146 кг/с и теплоемкости жидкой фазы порядка 3,5 кДж/(кг·К), предельная мощность внешних теплопритоков, не вызывающих закипания на участке до испарителя, возрастает с 3 Вт при 0,1 МПа до 175 Вт при 0,6 МПа, то есть примерно в 58 раз. Таким образом, повышенное давление обеспечивает возможность использования для организации подводящего участка, к примеру, холоднодеформированную бесшовную трубу из нержавеющей стали по ГОСТ 9941–2022¹⁰ без дополнительной изоляции. Из формулы (8) предельная

¹⁰ ГОСТ 9941–2022. Трубы бесшовные холоднодеформированные из коррозионно-стойких высоколегированных сталей. Технические условия: принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации, протокол от 26 декабря 2022 г. № 157-П. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 19 с.

эквивалентная длина участка трубы без теплоизоляции типоразмера 25 × 2,0 мм составит около 1,0 м.

Также необходимо отметить, что повышение рабочего давления до 0,6 МПа при сохранении температуры хранения СПГ обеспечивает значительное переохлаждение жидкости.

Термодинамический анализ. Результаты расчета полной холодопроизводительности в зависимости от давления регазификации представлены на рис. 3.

Установлено, что с ростом давления от 0,1 до 0,6 МПа полная холодопроизводительность системы с СПГ монотонно снижается на 3,8 % с 1331 до 1280 Вт. Доля фазового перехода падает с 55,0 % до 48,8 %. Вклад перегрева пара также снижается до 40 %. Зависимость эксергетического КПД второго рода от давления носит обратный характер и возрастает с увеличением давления, что отражено на рис. 4. При давлении СПГ ниже 0,3 МПа эффективность системы для перевозки охлажденных и замороженных грузов не превышает 6 %.

Повышение давления до 0,6 МПа приводит к росту температуры фазового перехода, что приближает про-

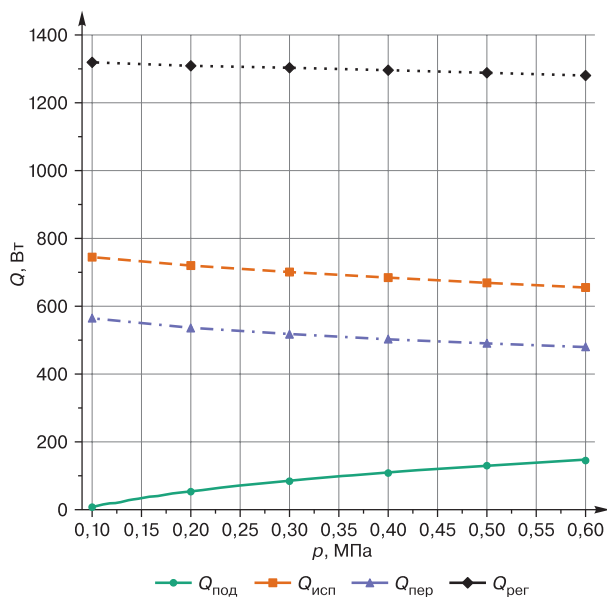


Рис. 3. Зависимость составляющих мощности холодопроизводительности регазификации СПГ от давления (МПа)*:
 $Q_{\text{под}}$ — теплота подогрева жидкости, Вт; $Q_{\text{исп}}$ — скрытая теплота парообразования, Вт; $Q_{\text{пер}}$ — теплота перегрева пара, Вт;
 $Q_{\text{рег}}$ — полная холодопроизводительность, Вт
 * Источник: данные авторов

Fig. 3. Dependence of LNG regasification cooling capacity components on pressure (MPa)*:
 $Q_{\text{под}}$ — liquid heating heat, V; $Q_{\text{исп}}$ — latent heat of vaporisation, V;
 $Q_{\text{пер}}$ — vapor superheating heat, V; $Q_{\text{рег}}$ — total cooling capacity, V
 * Source: authors' data

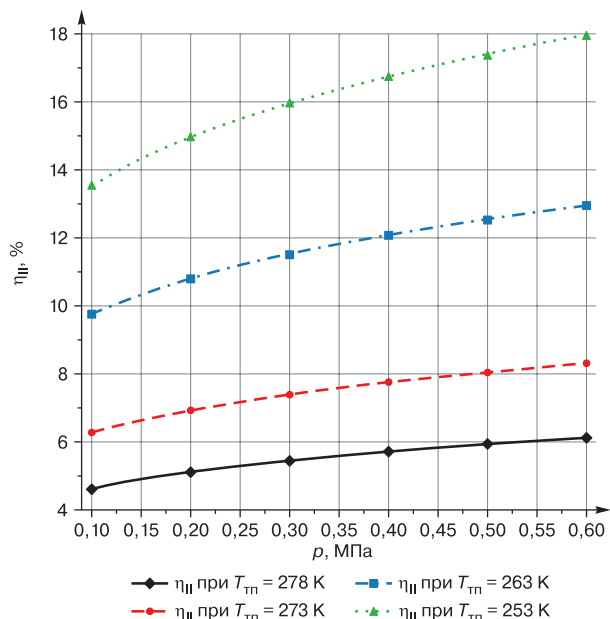


Рис. 4. Эксергетическая эффективность системы рекуперации холода относительно давления в системе*:
 $T_{\text{тп}}$ — температура теплоносителя (воздуха грузового помещения);
 η_{II} — эксергетический КПД второго рода
 * Источник: данные авторов

Fig. 4. Exergetic efficiency of cold recovery system relative to system pressure*:
 $T_{\text{тп}}$ — heat transfer medium temperature (cargo area air); η_{II} — second-law exergetic efficiency
 * Source: authors' data

цесс регазификации к температурному уровню потребителя. Эксергетический КПД возрастает до ~20 % при температуре в грузовом помещении 253 К (–20 °С).

Параметры теплообменного аппарата для регазификации. Для предварительной инженерной оценки требуемая длина теплообменника из гладких труб $L_{\text{гл}}$, м, для регазификации жидкого СПГ по описанной в статье схеме определяется выражением (9)¹¹:

$$L_{\text{гл}} = \frac{Q_{\text{рег}}}{k_{\text{гл}} \pi d_{\text{н}} \Delta T_{\text{ср}}}, \quad (9)$$

где $k_{\text{гл}}$ — коэффициент теплопередачи теплообменника из гладких труб, Вт/(м²·К);

$d_{\text{н}}$ — наружный диаметр трубы, м;

$\Delta T_{\text{ср}}$ — средний температурный напор между грузовым помещением и энергоносителем, К.

Коэффициент теплопередачи теплообменника из гладких труб принимается¹²:

$$k_{\text{гл}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{в}}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (10)$$

¹¹ Исаченко В. П., Сукомел А. С., Осипова В. А. Теплопередача: учеб. для студентов вузов. 4-е изд. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

¹² Там же.

где α_1 — коэффициент теплоотдачи гладкой трубы со стороны СПГ, Вт/(м²·К);

α_2 — коэффициент теплоотдачи гладкой трубы со стороны окружающей среды, Вт/(м²·К);

d_y — внутренний диаметр трубы, м.

Длина теплообменника из оребренных труб L_{op} , м, определяется выражением¹³:

$$L_{op} = \frac{Q_{пер}}{k_{op} \pi d_n \Delta T_{cp}}, \quad (11)$$

где k_{op} — коэффициент теплопередачи теплообменника с оребрением, Вт/(м²·К), принимаемый как¹⁴:

$$k_{op} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \frac{d_n}{d_y} + \frac{1}{\alpha_2^{op}} \frac{F_{гл}}{F_{op}}}, \quad (12)$$

где α_2^{op} — коэффициент теплоотдачи оребренной трубы со стороны окружающей среды, Вт/(м²·К);

$F_{гл}$ — площадь гладкой трубы, м²;

F_{op} — площадь оребрения, м².

Необходимо отметить, что в формуле (10) расчет ведется для гладкой трубы, у которой площадь теплообмена совпадает с наружной поверхностью трубы. В формуле (12) вводится отношение площадей гладких и оребренных участков труб, поскольку оребрение увеличивает площадь теплообмена внешней стороны трубы по сравнению с гладкой трубой. Соотношение

площадей гладкой и оребренной поверхностей трубы принимается исходя из геометрического соотношения трубы и оребрения:

$$\frac{F_{гл}}{F_p} = \frac{1}{1 - \frac{\delta_p}{s_p} + \frac{h_p(d_p + d_n)}{d_n s_p}} \leq 1, \quad (13)$$

где δ_p — толщина ребра, м;

s_p — шаг оребрения трубы;

h_p — высота ребра, м;

d_p — диаметр оребрения, м.

Ограничение соотношения площадей следует из определения отношения площади гладкой поверхности к полной оребренной поверхности и не является эмпирическим коэффициентом.

Для труб по ГОСТ 9941–2022 выполнена предварительная оценка требуемых длин труб гладкотрубного и оребренного теплообменников (табл. 1). Расчет проведен для расхода СПГ 5,2 кг/ч при $Q_{пер} = 1280$ Вт и среднем температурном напоре $\Delta T_{cp} = 114,5$ К, $\alpha_2^{op} = \alpha_2 = 10$ Вт/(м²·К). Для оребренных труб приняты $\delta_p = 1$ мм, $s_p = 10$ мм, $h_p = 15$ мм.

При регазификации СПГ в грузовом помещении, подогрев газа до температуры сжигания в ДВС производится в газовом коллекторе за счет теплопритоков в машинном отделении АРВ. Расчет длины и диаметра коллектора производится с учетом параметров, необходимых для обеспечения стабильного давления

Таблица 1

Укрупненная оценка длин теплообменников*

Table 1

Approximate estimation of heat exchanger lengths*

Труба ГОСТ 9941–2022	Внутренний диаметр трубы d_y , м	Наружный диаметр трубы d_n , м	Диаметр оребрения d_p , м	Соотношение $F_{гл}/F_p$	Коэффициент теплопередачи теплообменника из гладких труб $k_{гл}$, Вт/(м ² ·К)	Длина теплообменника из гладких труб $L_{гл}$, м	Коэффициент теплопередачи теплообменника с оребрением k_{op} , Вт/(м ² ·К)	Длина теплообменника из оребренных труб L_{op} , м
20 × 2,0 мм	0,016	0,02	0,05	0,163	10,24	8,76	57,9	1,55
28 × 2,5 мм	0,023	0,028	0,058	0,18	10,24	6,26	52,34	1,22
32 × 2,5 мм	0,027	0,032	0,062	0,188	10,24	5,47	50,63	1,11
38 × 3,0 мм	0,032	0,038	0,068	0,197	10,24	4,61	48,62	0,97
45 × 3,0 мм	0,039	0,045	0,075	0,204	10,25	3,89	47,04	0,85
50 × 3,5 мм	0,043	0,05	0,08	0,208	10,25	3,5	46,11	0,78
65 × 3,5 мм	0,058	0,065	0,095	0,218	10,25	2,69	44,3	0,62
76 × 3,5 мм	0,069	0,076	0,106	0,224	10,25	2,30	43,41	0,54
108 × 4,0 мм	0,100	0,108	0,138	0,237	10,26	1,62	41,83	0,40

* Источник: данные авторов; ГОСТ 9941–2022

* Source: authors' data; GOST 9941–2022

¹³ Там же.

¹⁴ Там же.

перед ДВС, и исходя из мощности двигателя. Температура поступающего в коллектор испаренного СПГ будет соответствовать температуре внутри грузового помещения АРВ. На участке донагрева газа коэффициент теплоотдачи снизится относительно коэффициента теплоотдачи на участке фазового перехода. Увеличение диаметра коллектора приводит к дополнительному уменьшению коэффициента теплоотдачи на внутренней стенке теплообменника. Тогда длина коллектора $L_{\text{гл(ор)}}^{\text{К}}$ (гладкого или оребренного), м, определяется из выражений (3), (9) и (11):

$$L_{\text{гл(ор)}}^{\text{К}} = G_{\text{СПГ}} \frac{c_{p,\text{Г}}(T_{\text{вых,Г}} - T_{\text{вх,Г}})}{k_{\text{гл(ор)}} \pi d_{\text{н}} \Delta T_{\text{ср,лг}}}, \quad (14)$$

где $k_{\text{гл(ор)}}$ — коэффициент теплопередачи теплообменника из гладких труб или с оребрением, Вт/(м²·К);

$T_{\text{вх,Г}}$ — температура газа на входе в коллектор, К;

$\Delta T_{\text{ср,лг}}$ — средний логарифмический температурный напор для донагрева газа в машинном отделении, определяемый по формуле как¹⁵

$$\Delta T_{\text{ср,лг}} = \frac{(T_{\text{возд}} - T_{\text{вх,Г}}) - (T_{\text{возд}} - T_{\text{вых,Г}})}{\ln \left(\frac{T_{\text{возд}} - T_{\text{вх,Г}}}{T_{\text{возд}} - T_{\text{вых,Г}}} \right)}, \quad (15)$$

где $T_{\text{возд}}$ — температура воздуха в машинном отделении, К.

Для сокращения записи вводится вспомогательный коэффициент C , м, выражающий протяженность участка донагрева и определяемый как

$$C = \frac{G_{\text{СПГ}} c_{p,\text{Г}}}{k_{\text{гл(ор)}} \pi d_{\text{н}}}. \quad (16)$$

При подстановке коэффициента C в (14) получим

$$L_{\text{гл(ор)}}^{\text{К}} = C \ln \left(\frac{T_{\text{возд}} - T_{\text{вх,Г}}}{T_{\text{возд}} - T_{\text{вых,Г}}} \right). \quad (17)$$

Для труб меньшего диаметра коэффициент C будет ниже из-за увеличения скорости газа и, как следствие, повышения интенсивности теплообмена через стенку трубы. Чем выше C , тем больше длина участка донагрева.

Время донагрева газа в коллекторе $\tau_{\text{под}}$, с, зависит от плотности фазы:

$$\tau_{\text{под}} = \frac{L_{\text{гл(ор)}}^{\text{К}} \rho_{\text{Г}} \pi d_{\text{н}}^2}{4G_{\text{СПГ}}}. \quad (18)$$

Для расчета приняты трубы с номинальными диаметрами 45 × 3,0 мм и 76 × 3,5 мм, чьи протяженности участков донагрева будут равны 4,48 м и 7,11 м соответственно. Предел температуры нагрева газа +20 °С, но воздух в отделении может нагреваться до +60 °С во время стоянок на АРВ или при движениях с низкими скоростями. Расчетные данные для указанных параметров приведены в табл. 2.

Для обеспечения устойчивости подачи газа в качестве коллектора достаточно гладкотрубного регистра с внешним диаметром 40 мм при длине не более 9,5 м, размещение которого в машинном отделении АРВ возможно без вмешательства в конструкцию кузова вагона и с сохранением возможности регазификации вне грузового помещения. Для снижения габаритов теплообменника потребуются оребрение или обдув его внешней поверхности. В случае оребрения

Таблица 2

Сравнительные характеристики коллекторов различных типоразмеров при изменении температурных режимов АРВ*

Table 2

Comparative characteristics of gas manifolds of various sizes under varying autonomous refrigerated car temperature regimes*

Температура воздуха в машинном отделении $T_{\text{возд}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Температура газа на входе в коллектор $T_{\text{вх}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Температура газа на выходе из коллектора $T_{\text{вых}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Труба 45 × 3,0 мм ($C \approx 4,48$)		Труба 76 × 3,5 мм ($C \approx 7,11$)	
			$L, \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$	$L, \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$
20	-20	до +15	9,31	33	14,79	163
		до +18	13,41	47	21,31	235
	+5	до +15	4,92	17	7,81	86
		до +18	9,02	32	14,33	158
60	-20	до +15	2,57	9	4,09	45
		до +18	2,88	10	4,58	50
	+5	до +15	0,90	3	1,43	16
		до +18	1,21	4	1,92	21

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

¹⁵ Там же.

с параметрами $\delta_p = 1$ мм, $s_p = 10$ мм, $h_p = 15$ мм, длина теплообменника уменьшится до 1,8 м, при этом коллектор сохранит свои качества в качестве буфера для выравнивания давления газа перед подачей топлива в двигатель. Обеспечение постоянного обдува со скоростью не менее 2 м/с позволит сократить расчетное значение до 3 м гладкой трубы. Также расчетный теплообменник будет значительно меньше, если принять температуру подачи газа +5 °С, что соответствует стандартным параметрам для сжигания газа. Однако, в таком случае незначительно уменьшится полная холодопроизводительность схемы регазификации.

Результаты исследования. Выполнен расчет параметров для топливной системы холодильного агрегата с ДВС мощностью 24 кВт с принятым диапазоном топливной линии от 0,1 до 0,6 МПа для различных температурных режимов перевозки грузов (табл. 3).

При повышении давления с 0,1 до 0,6 МПа температура кипения СПГ возрастает с 111,6 до 145,2 К, что и является основной причиной роста эффективности. При этом эксергетическая эффективность возрастает за счет снижения температурного напора.

Согласно расчетным данным, при повышении давления в топливной линии с 0,1 до 0,6 МПа полная холодопроизводительность системы при заданном массовом расходе снижается с 1331 до 1280 Вт, что соответствует относительному снижению на 3,8 %.

Таблица 3

Расчетные показатели эффективности цикла регазификации*

Table 3

Calculated efficiency indicators of regasification cycle*

Параметр	$p = 0,1$ МПа	$p = 0,6$ МПа	Изменение, %
Температура кипения $T_{кип}$, К	111,6	145,2	+30,1
Удельная холодопроизводительность $q_{рег}$, Дж/кг	$911,6 \cdot 10^3$	$876,7 \cdot 10^3$	-3,8
Полная холодопроизводительность $Q_{рег}$, Вт	1331	1280	-3,8
Доля фазового перехода в рекуперации, %	55,0	48,8	-11,3
$\eta_{Ц}$, %, при $T_{тп} = 278$ К (охлажденные продукты)	4,6	6,1	+32,6
$\eta_{Ц}$, %, при $T_{тп} = 253$ К (замороженные продукты)	13,5	17,9	+32,6
Среднее арифметическое значение по всему диапазону $\eta_{Ц}$, %	9,0	12,0	+33,3

* Источник: данные авторов

* Source: authors' data

Проведенный анализ подтвердил, что режим работы при давлении 0,6 МПа обеспечивает компромисс между сохранением энтальпийного потенциала и минимизацией эксергетических потерь, а замена дизельного топлива на СПГ целесообразна не только с экономической и экологической позиций, но также энергетически при условии рекуперации холода [12].

Также определено, что предлагаемая схема регазификации СПГ за счет теплопоступлений из грузового помещения и машинного отделения АРВ через стенку гладкотрубного или оребренного теплообменника реализуема в пределах габаритов АРВ.

Заключение и обсуждение. По результатам проведенного исследования выполнена термодинамическая оценка потенциала рекуперации холода регазификации СПГ в АРВ, определены границы эффективности и обоснован выбор рабочих параметров системы. Предложен подход к оценке потенциала рекуперации холода регазификации СПГ для нужд АРВ на основе энергетического и эксергетического анализа с учетом предотвращения условий вскипания СПГ до испарителя. В качестве модели принят АРВ с холодильным агрегатом со встроенным ДВС мощностью до 24 кВт, расходующий до 5,2 кг/ч СПГ.

Установлено, что повышение избыточного давления подачи СПГ до 0,6 МПа ведет к росту температуры кипения с 111,6 до 145,2 К и обеспечивает увеличение среднего эксергетического КПД системы вплоть до двукратного. При этом полная холодопроизводительность снижается на 3,8 %, с 1331 до 1280 Вт, а максимальная эксергетическая эффективность достигает 17,9 %.

Предварительный оценочный расчет теплообменного аппарата из гладких и оребренных труб показал, что при расходе СПГ 5,2 кг/ч требуемая длина теплообменника находится в диапазоне, допускающем его монтаж в составе грузового помещения АРВ. При этом процесс регазификации может быть организован как в грузовом помещении, так и в машинном отделении АРВ. Согласно предложенной схеме, регазификацию до температуры подачи в ДВС допустимо рассматривать как отдельный этап, который не обязательно совмещать с испарением в одном аппарате, в случае использования холода от регазификации СПГ для охлаждения воздуха в грузовом помещении АРВ.

Практическая реализация схемы с криогенным насосом позволяет рекуперировать до 1280 Вт холода от регазификации СПГ для охлаждения воздуха в грузовом отсеке АРВ. При этом обеспечивается гидравлическая устойчивость системы и гарантируется отсутствие двухфазного потока в регулирующей арматуре, что позволяет упростить схему регазификации с рекуперацией, повысить эксплуатационную надежность и унифицировать систему подачи топлива относительно применяемых в рефрижераторных перевозках ДВС.

В реальных условиях эксплуатации температура СПГ в криогенном баке и на входе в расчетный участок, как правило, растет вследствие бездренажного хранения и роста давления в емкости. Ввиду этого, абсолютные значения удельной и полной холодопроизводительности, полученные в работе, следует рассматривать как верхнюю оценку, характерную для СПГ после заправки, тогда как установленная зависимость эксергетической эффективности и гидравлической устойчивости от давления сохраняет качественный характер.

Полученные данные количественно характеризуют термодинамический потенциал рекуперации холода регазификации СПГ в АРВ и позволяют оценить замену дизельного топлива на СПГ с теплотехнических позиций, а не только с точки зрения экономии при эксплуатации в качестве топлива [5, 12]. Кроме того, результаты позволяют определить требования к оборудованию топливной линии с СПГ, включая конструктивные требования к теплообменнику с применением труб по ГОСТ 9941–2022, и гарантировать безопасность эксплуатации топлива как с рекуперацией, так и без нее.

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. Колин С. А., Кондратенко С. Е., Бортников Н. А. К вопросу оценки экономических издержек от загрязнения воздуха городским транспортом (на примере Санкт-Петербурга) // Газовая промышленность. 2021. № 6 (817). С. 98–104. EDN: <https://elibrary.ru/psnndf>.
2. Kolin S. A., Kondratenko S. E., Bortnikov N. A. Evaluation of the economic costs of air pollution by urban transport (a case study of Saint Petersburg). *Gas Industry*. 2021;(6(817)):98–104. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/psnndf>.
3. Banaszkiwicz T., Chorowski M., Gizicki W., Jedrusyna A., Kiellar J., et al. Liquefied natural gas in mobile applications — opportunities and challenges. *Energies*. 2020;13(21):5673. <https://doi.org/10.3390/en13215673>.
4. Ворон О. А. Использование сжиженного природного газа в комбинированной энергосиловой установке автономного рефрижераторного вагона // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2019. Т. 78, № 3. С. 188–192. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-188-192>. EDN: <https://elibrary.ru/rocdwh>.
5. Voron O. A. The use of liquefied natural gas in the combined power unit of autonomous refrigerated car. *Russian Railway Science Journal*. 2019;78(3):188–192. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-3-188-192>. EDN: <https://elibrary.ru/rocdwh>.

6. Бродянский В. М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
7. Brodyanskiy V. M., Fratsher V., Mikhalek K. *Exergetic method and its applications*. Moscow: Energoatomizdat; 1988. 288 p. (In Russ.).
8. Khor J. O., Walnum H. T., Ertesvåg I. S., Romagnoli A. Recovery of cold energy from LNG regasification. *Energy Conversion and Management*. 2018;174:539–555. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.028>.
9. Dorosz P., Wojcieszak P., Malecha Z. Exergetic analysis, optimization and comparison of LNG cold exergy recovery systems for transportation. *Entropy*. 2018;20(1):59. <https://doi.org/10.3390/e20010059>.
10. Noor Akashah M. H., Mohammad Rozali N. E., Mahadzir S., Liew P. Y. Utilization of cold energy from LNG regasification process: A review of current trends. *Processes*. 2023;11(2):517. <https://doi.org/10.3390/pr11020517>. EDN: <https://elibrary.ru/jsuvbv>.
11. Zonfrilli M., Facchino M., Serinelli R., Chesti M., De Falco M., Capocelli M. Thermodynamic analysis of cold energy recovery from LNG regasification. *Journal of Cleaner Production*. 2023;420(4):138443. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138443>. EDN: <https://elibrary.ru/jjbxhu>.
12. Wang Yu., Ren J. J., Bi M. Sh. Analysis on the heat transfer performance of supercritical liquified natural gas in horizontal tubes during regasification process. *Energy*. 2023;262:125444. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125444>. EDN: <https://elibrary.ru/diisus>.
13. Chen B., Zou T., Li H., He W. Simulative and experimental research on the heat exchanger for cold energy recovery of liquefied natural gas. *Applied Thermal Engineering*. 2024;237:121798. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121798>. EDN: <https://elibrary.ru/djffly>.
14. Wei A., Yu L., Qiu L., Zhang X. Cavitation in cryogenic fluids: A critical research review. *Physics of Fluids*. 2022;34(10):101303. <https://doi.org/10.1063/5.0102876>. EDN: <https://elibrary.ru/ejevgt>.
15. Киселев И. Г., Комиссаров С. Б., Моностырский Д. Я. О целесообразности использования сжиженного природного газа на рефрижераторных контейнерах с навесными дизель-генераторами // Бюллетень результатов научных исследований. 2021. № 4. С. 104–113. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2021-4-104-113>. EDN: <https://elibrary.ru/gqvuyv>.
16. Kiselyov I. G., Komissarov S. B., Monastyrsky D. Ya. On the expediency of using liquefied natural gas in refrigerated containers with mounted diesel generators. *Bulletin of scientific research results*. 2021;(4):104–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2021-4-104-113>. EDN: <https://elibrary.ru/gqvuyv>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитрий Ярославович МОНАСТЫРСКИЙ, аспирант, кафедра «Теоретические основы электротехники и энергетики», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9), SPIN-код: 1010-3575, <https://orcid.org/0009-0009-3528-8490>

Владимир Викторович ГАЛОВ, канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры «Теоретические основы электротехники и энергетики», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9), SPIN-код: 2819-1311, <https://orcid.org/0009-0004-7959-2930>

Игорь Георгиевич КИСЕЛЕВ, д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры «Теоретические основы электротехники и энергетики», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9), SPIN-код: 7398-3334, <https://orcid.org/0000-0002-0862-9669>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitrii Ya. MONASTYRSKII,

Postgraduate, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Energy, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (190031, Saint Petersburg, 9, Moskovsky Ave.), SPIN-code: 1010-3575, <https://orcid.org/0009-0009-3528-8490>

Vladimir V. GALOV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Energy, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (190031, Saint Petersburg, 9, Moskovsky Ave.), SPIN-code: 2819-1311, <https://orcid.org/0009-0004-7959-2930>

Igor G. KISELEV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Energy, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (190031, Saint Petersburg, 9, Moskovsky Ave.), SPIN-code: 7398-3334, <https://orcid.org/0000-0002-0862-9669>

ВКЛАД АВТОРОВ

Дмитрий Ярославович МОНАСТЫРСКИЙ. Подготовка графических материалов и текста статьи, разработка модели термодинамических процессов цикла регазификации (50 %).

Владимир Викторович ГАЛОВ. Обоснование инженерных решений, научное редактирование, проверка численных расчетов (30 %).

Игорь Георгиевич КИСЕЛЕВ. Формирование концепции исследования, постановка целей и задач (20 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Dmitrii Ya. MONASTYRSKII. Preparation of graphic materials and article text, development of the model of thermodynamic processes of the regasification cycle, substantiation of engineering solutions (50 %).

Vladimir V. GALOV. Substantiation of engineering solutions, scientific editing, verification of numerical calculations (30 %).

Igor G. KISELEV. Research concept formation, goals and objectives setting (20 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 14.01.2026, рецензия от первого рецензента получена 13.02.2026, рецензия от второго рецензента получена 13.03.2026, рецензия от третьего рецензента получена 30.03.2026, принята к публикации 30.04.2026.

The article was submitted 14.01.2026, first review received 13.02.2026, second review received 13.03.2026, third review received 30.03.2026, accepted for publication 30.04.2026.