

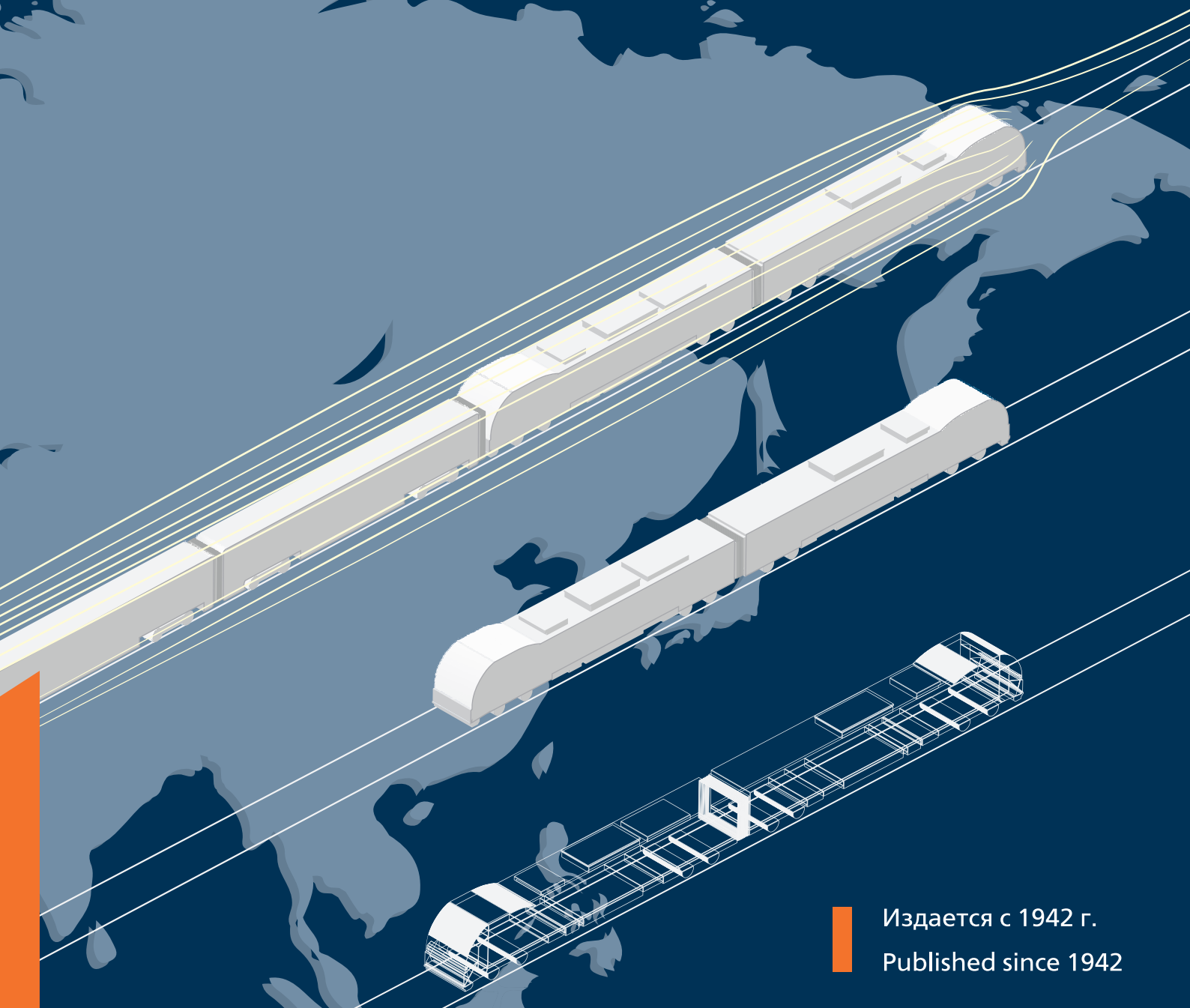


ISSN 2223 – 9731 (Print)
ISSN 2713 – 2560 (Online)



ВЕСТНИК НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL

Том 84, №2. 2025



Издается с 1942 г.

Published since 1942

ISSN 2223-9731 (Print)

ISSN 2713-2560 (Online)

ВЕСТНИК НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА (ВЕСТНИК ВНИИЖТ)

RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL (VESTNIK VNIIZhT)

TOM 84, № 2. 2025

Учредитель:
АО «Научно-исследовательский
институт железнодорожного транспорта»

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

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

Издатель:
Индивидуальный предприниматель
Копыльцов Павел Иванович,
394006, г. Воронеж, ул. Маршала Неделина, д. 27, кв. 56
Тел.: + 7 (995) 494-84-77

Founder:
Railway Research Institute

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

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

Publisher:
Individual Entrepreneur Pavel I. Kopyltsov,
27, apt. 56, Marshal Nedelin St., Voronezh, 394052,
Russian Federation.
Tel: + 7 (995) 494-84-77

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

© АО «ВНИИЖТ», 2025

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:

Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)



Международной справочно-библиографической системе EBSCO



Китайской платформе наукометрических данных Baidu



Китайской платформе наукометрических данных
China National Knowledge Infrastructure



Международной реферативной базе Ulrichsweb Global Serials Directory



Международной базе открытых публикаций Google Академия



Международной электронно-библиотечной системе The European Library



Электронном каталоге научно-технической литературы ВИНТИ РАН



Международной базе Dimensions



Директории журналов открытого доступа (DOAJ)



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 Science Citation Index	
EBSCO Information Services	
Baidu	
China National Knowledge Infrastructure (CNKI)	
Ulrichsweb Global Serials Directory	
Google Scholar	
The European Library	
Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI RAS)	
Dimensions	
Directory of Open Access Journals (DOAJ)	
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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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>

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

Куммер Себастьян, д-р экономики, проф., Венский экономический университет, Институт транспорта и логистики, Вена, Австрия, <https://orcid.org/0000-0002-4840-5256>

Кучумов Владислав Алексеевич, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 700131, <https://orcid.org/0000-0003-4025-4155>

Ли Сюээй, д-р наук, проф., Пекинский транспортный университет, Пекин, КНР

Мирошниченко Ольга Федоровна, д-р экон. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 384947, <https://orcid.org/0000-0002-3049-5476>

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

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

Савин Александр Владимирович, д-р техн. наук, доцент, первый заместитель директора научного центра АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 426312, <https://orcid.org/0000-0002-5561-5454>

Сирина Нина Фридриховна, д-р техн. наук, доцент, УрГУПС, Екатеринбург, Российская Федерация, Author ID: 436265, <https://orcid.org/0000-0001-9691-5181>

Фёдоров Сергей Васильевич, д-р техн. наук, проф., КГТУ, Калининград, Российская Федерация, Author ID: 617155, <https://orcid.org/0000-0003-3104-9862>

Фокс-Рабинович Герман Симонович, д-р техн. наук, Университет Макмастера, Гамильтон, Канада, <https://orcid.org/0000-0002-0258-587X>

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>

Эсвельд Конрад, д-р техн. наук, проф. железнодорожной инженерии, Делфтский технологический университет, Делфт, Нидерланды

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, РГУПС, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

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

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

Махутов Николай Андреевич, д-р техн. наук, проф., член-корреспондент 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,

Редина Анна Эдуардовна, редактор-корректор

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

Подписано к печати 24.06.2025. Формат бумаги 60×90 1/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,78. Тираж 200 экз. Заказ 4490625. 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>

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>

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

Sebastian Kummer, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Vienna University of Economics and Business, Vienna, Austria, <https://orcid.org/0000-0002-4840-5256>

Vladislav V. Kuchumov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 700131, <https://orcid.org/0000-0003-4025-4155>

Li Xuewei, Dr. Sci., Professor, Vice-President of the Engineering Union of China Transport System, Beijing Jiaotong University, China

Olga F. Miroshnichenko, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 384947, <https://orcid.org/0000-0002-3049-5476>

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

Sergey M. Ovcharenko, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Rector of the Omsk State Transport University, Omsk, Russian Federation, Author ID: 211825, <https://orcid.org/0000-0002-2985-3934>

Alexander V. Savin, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, First Deputy Director of the Scientific Centre, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 426312, <https://orcid.org/0000-0002-5561-5454>

Nina F. Sirina, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russian Federation, Author ID: 436265, <https://orcid.org/0000-0001-9691-5181>

Sergey V. Fedorov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation, Author ID: 617155, <https://orcid.org/0000-0003-3104-9862>

German S. Fox-Rabinovich, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of McMaster Engineering University, Hamilton, Ontario, Canada, <https://orcid.org/0000-0002-0258-587X>

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

Alexandr O. Shimanovskiy, 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>

Coenraad Esveld, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Delft Technical University, General Director of the “Esveld Consulting Services”, Delft, Netherlands

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. and Math.), Professor, Academician of the RAS, 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 IATU APC, Rostov State Transport 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,
Anna E. Redina, Editor-proofreader

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

Signed to print on 24.06.2025. Format is 60×90 1/8. Offset printing. 9.78 printed sheets. 200 copies. Order No. 4490625. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Влияние направления воздушного потока на аэродинамические силы, действующие на транспортное средство

А. О. Шимановский, О. В. Демьянчук 81–91

Остаточные эксплуатационные напряжения на поверхности катания рельса Р65

В. И. Сакало, А. В. Сакало 92–103

Обеспечение усталостной прочности соединительных балок четырехосных тележек многоосных грузовых вагонов

Л. В. Цыганская, Д. Г. Бейн 104–112

Валидация конечно-элементной модели клеммы узла промежуточного рельсового скрепления

В. О. Березин, А. В. Замуховский, А. А. Ефимов, А. В. Гречаник 113–125

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Расчет показателей дублируемости маршрутной сети на полигоне транспортного обслуживания пассажиров

М. А. Килочицкая 127–139

ВНИИЖТ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

Роль научно-корреспондентских пунктов в железнодорожной науке в 1942–1945 гг.

И. В. Анохов 141–150

CONTENTS

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Airflow direction influence on aerodynamic forces acting on a vehicle

Alexandr O. Shimanovsky, Volha U. Dzemyanchuk 81–91

Residual service stresses on tread of P65 rail

Vladimir I. Sakalo, Alexey V. Sakalo 92–103

Ensuring fatigue strength of connecting beams of four-axle bogies of multi-axle wagons

Lyudmila V. Tsyganskaya, Dmitriy G. Beyn 104–112

Validation of finite-element model of clamp of rail fastening system

Vadim O. Berezin, Alexander V. Zamukhovskiy, Andrey A. Efimov, Alexander V. Grechanik 113–125

TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

Calculation of duplication indicators of the route network at the passenger transportation range

Marina A. Kilochitskaya 127–139

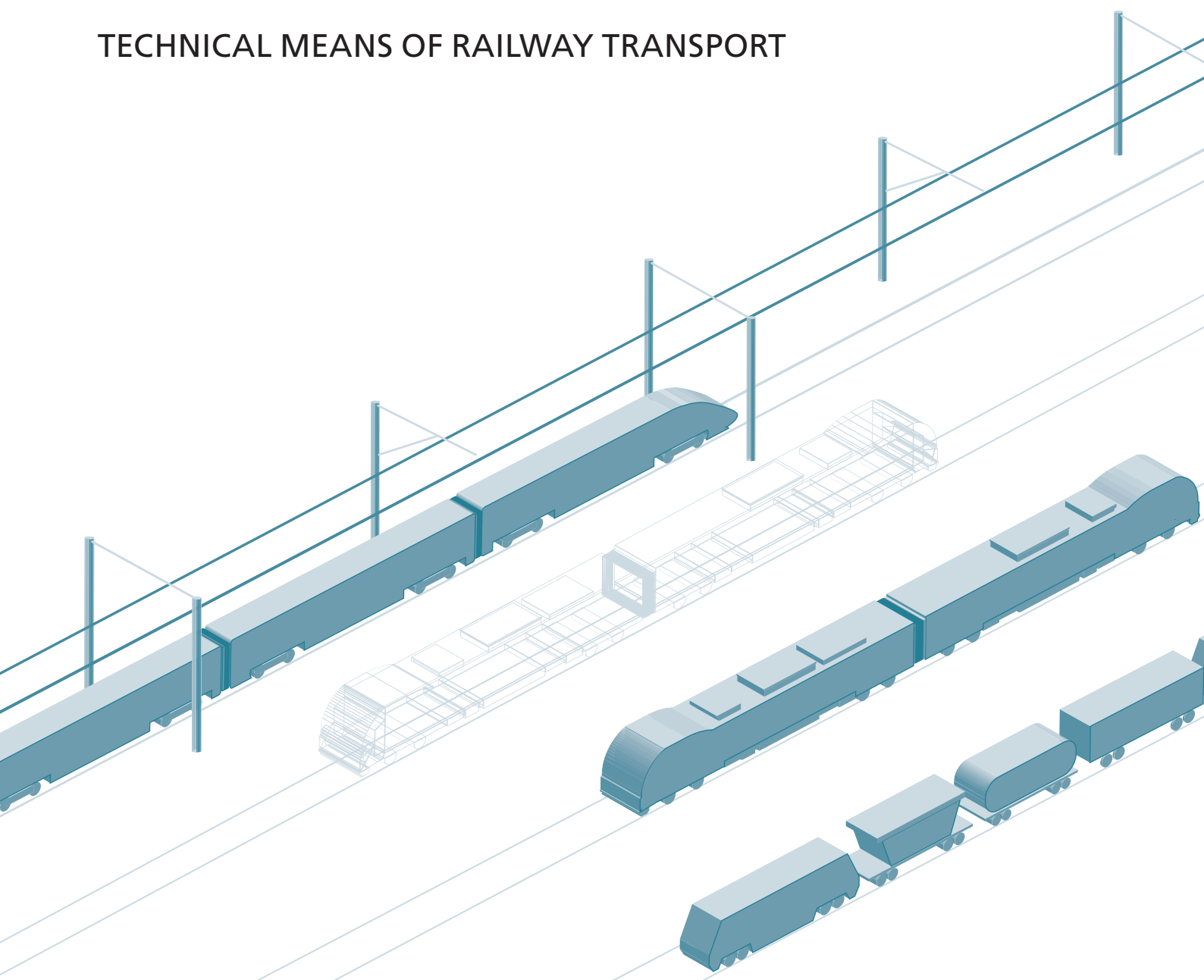
VNIIZhT: YESTERDAY, TODAY, TOMORROW

Role of scientific correspondent points in railway science in 1942–1945

Igor V. Anokhov 141–150

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 533.6.011:004.94

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

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



Влияние направления воздушного потока на аэродинамические силы, действующие на транспортное средство

А. О. Шимановский, О. В. Демьянчук✉

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ),
Гомель, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается обтекание железнодорожного вагона воздушным потоком при разных направлениях его скорости. Основной целью исследования является установление значений продольных и поперечных сил, действующих на вагон, для всего возможного диапазона изменения угла атаки воздушного потока.

Материалы и методы. Моделирование аэродинамики воздушного потока выполнено в программном комплексе ANSYS CFX, предназначенном для решения задач методом конечных объемов. В процессе расчета осуществлялось численное решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, для замыкания которых использована $k-\varepsilon$ модель турбулентности.

Результаты. Для разных значений угла атаки воздушного потока получены зависимости распределения скоростей потока и давлений на лобовую и боковые поверхности транспортного средства, а также значения продольной и поперечной сил, действующих на вагон со стороны ветра. Показано, что значение угла атаки воздушного потока оказывает существенное влияние на положения линий тока и значения коэффициента аэродинамического сопротивления вагона. В ходе расчетов установлено, что действующая на рассматриваемое транспортное средство продольная сила максимальна при значениях угла атаки воздушного потока от 10 до 30°. Наибольшие поперечные силы реализуются при углах атаки от 45 до 90°.

Обсуждение и заключение. Разработанная методика компьютерного моделирования обтекания вагона потоком воздуха может быть применена для анализа аэродинамических сил, действующих на иные транспортные средства. Полученные в ходе расчетов результаты могут быть использованы при цифровизации производственных процессов эксплуатации железнодорожного подвижного состава.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный вагон, обтекание потоком воздуха, компьютерное моделирование, аэродинамика, аэродинамический коэффициент

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шимановский А. О., Демьянчук О. В. Влияние направления воздушного потока на аэродинамические силы, действующие на транспортное средство // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 2. С. 81–91.

✉ olga.demyanchuk.98@mail.ru (О. В. Демьянчук)

© Шимановский А. О., Демьянчук О. В., 2025

Original article

UDK 533.6.011:004.94

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

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



Airflow direction influence on aerodynamic forces acting on a vehicle

Alexandr O. Shimanovsky, Volha U. Dzemyanchuk✉

Belarusian State University of Transport,
Gomel, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. The paper considers the airflow around a railway car at different directions of its speed. The main purpose of the study is to determine the values of the longitudinal and transverse forces acting on the car for the entire possible range of changes in the angle of attack of the airflow.

Materials and methods. The simulation of airflow aerodynamics is performed in the ANSYS CFX software package, designed to perform tasks using the finite volume method. During the calculation, the Reynolds-averaged Navier–Stokes equations were numerically solved, and for their closure was used the $k-\varepsilon$ turbulence model.

Results. The authors obtained dependences of the distribution of flow velocities and pressures on the frontal and lateral surfaces of the vehicle, as well as the values of the longitudinal and transverse forces acting on the car from the wind for different values of the angle of attack of the airflow. It is shown that the value of the angle of attack of the airflow has a significant effect on the positions of the current lines and the values of aerodynamic resistance coefficient of the car. During the calculations, it was found that the longitudinal force acting on the vehicle under consideration is maximum at the values of the angle of attack of the airflow from 10 to 30°. The greatest transverse forces are realised at angles of attack from 45 to 90°.

Discussion and conclusion. The developed method of computer simulation of streamline by airflow may be used to analyse the aerodynamic forces acting on other vehicles. The obtained results during calculations could be used in the digitalisation of production processes for the operation of railway rolling stock.

KEYWORDS: railway car, streamline by airflow, computer simulation, aerodynamics, aerodynamic coefficient

FOR CITATION: Shimanovsky A.O., Dzemyanchuk V.U. Airflow direction influence on aerodynamic forces acting on a vehicle. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(2):81–91. (In Russ.).

✉ olga.demyanchuk.98@mail.ru (V. U. Dzemyanchuk)

© Shimanovsky A. O., Dzemyanchuk V. U., 2025

Введение. Цифровизация процессов при эксплуатации транспортных средств требует наличия уточненной информации о технических характеристиках подвижного состава и действующих на него при различных ситуациях силах. Полномасштабные испытания отличаются сложностью и высокой стоимостью выполнения, а испытания в аэродинамической трубе не в полной мере отражают сложную геометрию объектов и реалистичные условия течения, наблюдаемые в полномасштабных моделях, поэтому компьютерное моделирование является более предпочтительным методом для исследования аэродинамики поездов. Рост производительности компьютеров раскрыл широкие перспективы для исследования проблем аэродинамики транспортных средств методами вычислительной гидродинамики. В настоящее время благодаря использованию высокоточных методов CFD-моделирование является одним из основных методов получения аэродинамических характеристик различных объектов.

Существует ряд работ, в которых анализируется обтекание транспортных средств воздушным потоком, направленным вдоль оси пути. Так, расчеты с использованием метода моделирования больших вихрей (Large Eddy Simulation — LES) представлены в работе [1]. Авторами получены картины распределения скоростей воздушного потока, значения сил воздушного сопротивления, на основании которых определены коэффициенты аэродинамического сопротивления. Выполнено сравнение результатов с данными полномасштабных экспериментов, продемонстрировавшее достаточно высокую степень сходимости.

В работе [2] исследуются характеристики широко используемых методов моделирования турбулентных течений для прогнозирования поля потока вокруг высокоскоростного поезда ICE3: RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes — усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса), SAS (Scale-Adaptive Simulation — масштабно-адаптивное моделирование), DES (Detached-Eddy Simulation — моделирование отдельных вихрей) и LES (Large Eddy Simulation — моделирование больших вихрей). Авторами отмечается, что определенный по результатам моделирования аэродинамический коэффициент зависит от метода моделирования турбулентности и качества сетки в меньшей степени, чем характер потока. Таким образом, если требуется получить только значения данного коэффициента, то необходимость использования более ресурсозатратных моделей и сеток отсутствует.

В работе [3] исследуется влияние спойлеров, установленных на крыше поезда на различной высоте, на аэродинамические характеристики и структуру воздушного потока высокоскоростного поезда. Изменение расположения спойлера по высоте вызывает значительное изменение подъемной силы, в то время как

на лобовое сопротивление оно практически не влияет. Точность численного метода была подтверждена экспериментами в аэродинамической трубе.

В статье [4] описывается связь между аэродинамическим сопротивлением и структурой потока при движении высокоскоростного поезда. В качестве объекта исследования используется модель поезда ICE2. Валидация проводится путем сравнения с существующими исследовательскими данными, а также на основе исследований сеточной независимости. Численное моделирование взаимодействия высокоскоростного поезда с воздушной средой, сооружениями и конструкциями инфраструктуры в среде программного комплекса ANSYS CFX выполнено в работе [5]. Получены картины распределения скоростей воздушного потока и аэродинамических сил, действующих на подвижной состав. Достоверность полученных результатов была подтверждена экспериментально.

Несмотря на то, что скорость движения грузового поезда значительно ниже, чем у высокоскоростных пассажирских поездов, 80 % общего сопротивления при скорости 115 км/ч также обусловлено аэродинамическим сопротивлением. В работе [6] к моделированию аэродинамики грузовых поездов была применена модель турбулентности STRUCT—ε для замыкания уравнений URANS. Этот подход направлен на повышение надежности и применимости гибридных моделей турбулентности, опираясь на эффективность широко проверенной k —ε модели, при этом используя локально необходимое разрешение сложных нестационарных структур течения. Работа продемонстрировала возможности подхода с использованием более грубых сеток, что позволяет сократить общее время вычислений в несколько раз и дает возможность оптимизации конструкции, в том числе с целью обеспечения устойчивости при боковом ветре.

Аналогичные задачи решены также и в иных публикациях, причем исследования посвящены главным образом определению влияния бокового ветра на обтекание транспортных средств и мостов при наличии ветрозащитных стен, установлению поперечных сил, действующих на вагоны при разных формах носовой части поезда, а также анализу влияния конфигурации тележек и наличия наземной инфраструктуры на аэродинамические силы, возникающие вследствие воздействия бокового ветра [7]. Выполненные в работе [8] исследования показали, что с увеличением угла атаки воздушного потока значения коэффициентов подъемной и боковой сил увеличиваются. Например, при угле атаки 60° коэффициент боковой силы оказывается в 2,5 раза большим, чем при 30°.

В работе [9] представлены результаты численного моделирования аэродинамических характеристик высокоскоростного поезда, проходящего через различные

области тоннелей при действии бокового ветра. Исследование показало, что условия за пределами туннеля оказывают значительное влияние на аэродинамические характеристики. Наименьшие аэродинамические силы наблюдаются при движении по мосту, расположенному вблизи входа в туннель. Взаимовлияние движущегося поезда, туннеля и бокового ветра приводит к изменению поля потока как внутри, так и снаружи туннеля.

Лишь относительно небольшое число публикаций посвящено исследованиям аэродинамических характеристик грузовых поездов. Так, в работе [10] проанализировано влияние на них геометрии крыши и нижней части кузова. В ходе испытаний в аэродинамической трубе масштабированной модели поезда установлено, что наиболее существенное влияние на аэродинамический коэффициент формы поверхности кузовов вагонов имеет место при углах атаки воздушного потока от 40 до 60°.

Моделирование обтекания воздушным потоком грузового поезда при воздействии бокового ветра с двумя различными углами отклонения ветрового потока 10° и 30° выполнено в статье [11]. Показано, что наибольшие изменения скорости потока в межвагонных промежутках по сравнению со случаем отсутствия бокового ветра наблюдаются при угле 30°. Также авторами проанализирована структура воздушного потока, которая может вызвать потерю устойчивости вагонов грузового поезда при воздействии бокового ветра.

Ряд работ посвящен исследованию аэродинамики вагонов, загруженных контейнерами, и контейнерных поездов. Оценка возможностей различных подходов к моделированию турбулентности для прогнозирования аэродинамического потока вокруг загруженной контейнером одиночной платформы, а также при следовании ее в составе поезда представлена в работе [12]. Отмечено, что результаты моделирования хорошо согласуются с данными, полученными при эксперименте в аэродинамической трубе как в качественном, так и в количественном отношении.

В работе [13] рассматривается, как расположение и длина контейнера, размещенного на вагоне-платформе в составе поезда, влияют на аэродинамику и значение лобового сопротивления. Приведены результаты испытаний масштабной модели в аэродинамической трубе. Установлено, что величина расстояния между соседними вагонами оказывает влияние на отрыв потока и характер пограничного слоя, а также на значение аэродинамического сопротивления поезда. Испытания, проведенные в работе [14], показали, что лобовое сопротивление возможно уменьшить на 30 % за счет уменьшения расстояния между соседними вагонами-платформами поезда.

Авторами [15] проведено моделирование обтекания воздушным потоком загруженного контейнерами

грузового поезда в случаях их различного размещения на платформах, в том числе в два яруса. Проанализировано влияние на лобовое сопротивление наличия порожних платформ между контейнерами и выполнено сравнение результатов расчетов с данными, полученными в ходе испытаний в аэродинамической трубе. На основании полученных результатов авторами предложены варианты размещения контейнеров на платформах в составе поезда, позволяющие снизить сопротивление движению поезда.

Авторами [16] разработана методика анализа аэродинамики вагонов на цифровых моделях поездов и получены значения давлений и силы аэродинамического сопротивления поезда, локомотива, полувагонов в груженом и порожнем состояниях. Проверка достоверности полученных результатов выполнена на основании сравнения с данными экспериментов, в результате которого установлено, что расхождение не превышает 15 %.

Процесс аэродинамического взаимодействия подвижного состава и искусственных сооружений тоннельного типа рассмотрен в работе [17]. По результатам численного моделирования в программе Solid Works установлено, что использование средств нивелирования колебания воздушного давления позволяет в несколько раз уменьшить скорость воздушного потока, воздействующего на подвижной состав и тоннельные сооружения, а также стабилизировать давление воздушных масс, приблизив его к нормальному атмосферному.

Выполненный анализ исследований показывает, что к настоящему времени получено решение ряда задач, связанных с обтеканием транспортных средств воздушным потоком. Однако влияние его направления на возникающие продольные и поперечные силы исследовано недостаточно. Поэтому в данной работе поставлена цель по установлению возможного влияния диапазона изменения угла атаки воздушного потока на величину продольных и поперечных сил, действующих на вагон.

Материалы и методы, модель вагона, обтекаемого воздушным потоком. Для выполнения численного моделирования аэродинамики воздушного потока использовался программный комплекс ANSYS CFX. Созданная в приложении Design Modeler геометрическая модель представляет собой параллелепипед, соответствующий размерам крытого вагона модели 11-264 (длина — 13 м, ширина — 3 м, высота — 4,5 м, причем учитывалось наличие зазора между дном вагона и уровнем пути), который расположен в расчетной области, представляющей собой объем воздуха также в форме параллелепипеда (длина — 65 м, ширина — 29 м, высота — 16,7 м). Размеры расчетной области были установлены с учетом целесообразного

использования вычислительных ресурсов и обеспечения получения независимых результатов расчета в ранее выполненных работах [18, 19]. На рис. 1 приведены схемы, иллюстрирующие расположение элементов модели для случаев действия ветрового потока вдоль пути и под углом α к нему.

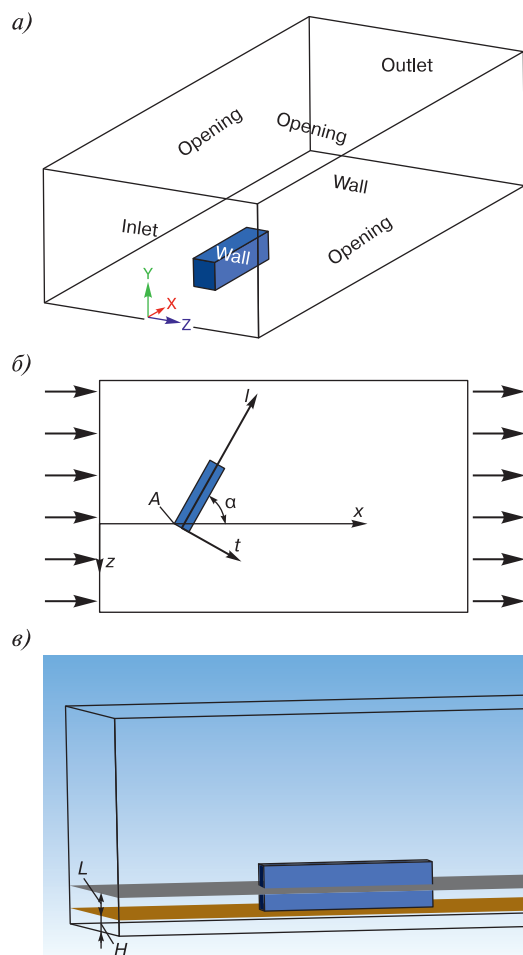


Рис. 1. Компьютерная модель расчетной области*:

- a* — геометрическая модель с граничными условиями;
b — расположение вагона при различных углах атаки воздушного потока; *c* — размещение горизонтальных поверхностей;
H — расстояние от поверхности земли до плоскости основания кузова вагона; *L* — расстояние от плоскости основания кузова вагона до расчетной плоскости; Opening, Inlet, Outlet, Wall — граничные условия на представленных поверхностях модели; *l* и *t* — оси, совпадающие с продольной и поперечной осями вагона; *A* — ребро вагона

* Источник: данные авторов

Fig. 1. Computer model of computational area*:

- a* — geometry model with boundary conditions; *b* — car position under different angles of attack of airflow; *c* — placement of horizontal surfaces; *H* — distance from the surface to the plane of the car body base; *L* — distance from the plane of the car body base to the design plane; Opening, Inlet, Outlet, Wall — boundary conditions on demonstrated model surfaces; *l* and *t* — axes overlapping with longitudinal and transverse car axes; *A* — edge of the car

* Source: authors' data

Для генерирования расчетной сетки использованы методы «Hex Dominant Method» и «Multizone» применительно к элементам-гексаэдрам. С целью упрощения процесса построения сетки применялся инструмент «Virtual Topology», предназначенный для управления топологией геометрических объектов. Характерный размер элемента принят равным 0,375 м, локальный в области кузова — 0,187 м. Общее число элементов расчетной области, сгенерированных для разных расположений вагона, составило от 0,7 до 1,17 млн ячеек. Дальнейшее измельчение сетки вызывает увеличение продолжительности расчета, не оказывая при этом существенного влияния на точность результатов моделирования [18].

При моделировании обтекания воздушным потоком вагона выполнено численное решение уравнения неразрывности и осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса (RANS). Чтобы обеспечить замыкание системы уравнений, использована модель турбулентности $k-\varepsilon$, которая включает дифференциальные уравнения относительно кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации кинетической энергии ε [20, 21]. Несмотря на то, что RANS предоставляет усредненные по времени результаты, данный метод целесообразно использовать для анализа аэродинамики поездов, поскольку он обеспечивает значительно меньшие затраты вычислительных мощностей по сравнению с другими применяемыми в вычислительной гидродинамике методами и выполнение моделирования за относительно короткое время [7].

По аналогии с [22] моделирование осуществлялось при следующих граничных условиях: постоянная скорость воздушного потока ($v = 10$ м/с) задавалась на входе (Inlet), избыточное давление ($p = 0$) — на выходе (Outlet). Условие открытой границы (Opening) при заданном значении давления $p = 0$ использовалось для боковых и верхней поверхностей расчетной области и предполагало, что воздух может втекать и вытекать из расчетной области. Непроницаемые границы для потока были заданы с использованием условия жесткой стенки (Wall) на поверхности вагона и нижней поверхности расчетной области. Исходными расчетными параметрами приняты: тип среды — воздух с параметрами идеального газа, температура — 288 К, давление — 100 кПа, которым соответствует плотность воздуха — 1,225 кг/м³, вязкость — $1,831 \cdot 10^{-5}$ кг/(м · с) [22].

Результаты расчетов и их обсуждение. Рассмотрено обтекание вагона воздушным потоком, угол атаки которого лежит в диапазоне от 0 до 90° (углу атаки воздушного потока соответствует угол поворота вагона в компьютерной модели). В ходе моделирования получены значения давлений воздуха на лобовую и боковую поверхности железнодорожного вагона. На различных высотах их значения отличаются несущественно.

Далее они приведены для поверхности, расположенной на высоте 1,75 м от основания кузова вагона.

Из рис. 2 видно, что с увеличением угла атаки воздушного потока распределение давлений на лобовой поверхности транспортного средства перестает быть симметричным относительно продольной плоскости симметрии вагона (рис. 2). При отклонении направления ветра от оси пути минимальное давление на боковую поверхность увеличивается с 4 до 27 Па, пока угол атаки ветрового потока не достигнет 40° (рис. 3). При увеличении угла атаки до 60° изменение давления оказалось незначительным. Последующий рост рассматриваемого угла до значения 90° привел к симметричному графику, подобному приведенному на рис. 2, а, что соответствует физической сущности рассматриваемых процессов.

Поскольку пространственная схема линий тока в расчетной области при различных углах атаки воздушного потока (рис. 4) имеет сложную конфигурацию и не позволяет в достаточной степени оценить характер потока, для упрощения анализа на рис. 5 приведены схемы линий тока в плоскости горизонтального сечения (ZX) на высоте 1,75 м от основания кузова вагона.

Результаты численного моделирования показали, что отклонение направления воздушного потока от оси железнодорожного пути не вызывает существенного изменения максимальных скоростей течения воздуха относительно вагона. Максимальная скорость течения при значении угла атаки воздушного потока 30° составляет 13,9 м/с, при значении угла атаки 50° — 14 м/с.

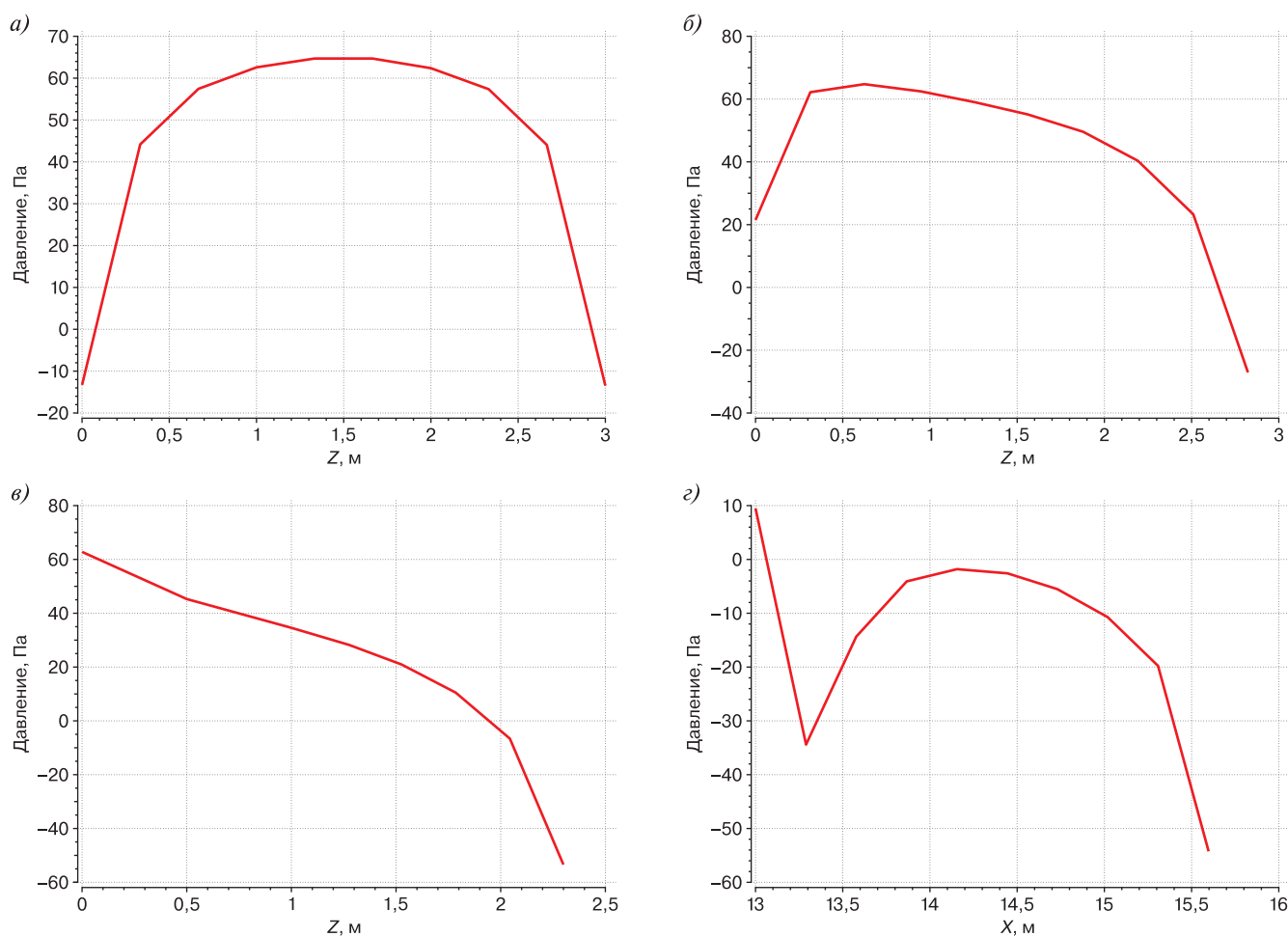


Рис. 2. Распределение давления на лобовую поверхность на высоте 1,75 м от основания кузова вагона при углах атаки*: а — 0° ; б — 20° ; в — 40° ; з — 60° ; z — координата по горизонтали от левого края вагона (т. А, рис. 1, б)

* Источник: данные авторов

Fig. 2. Pressure distribution on the front plane at 1.75 m from the car body base under angle of attacks*: а — 0° ; б — 20° ; в — 40° ; з — 60° ; z — horizontal coordinate from the left edge of the car (p. A, fig. 1, б)

* Source: authors' data

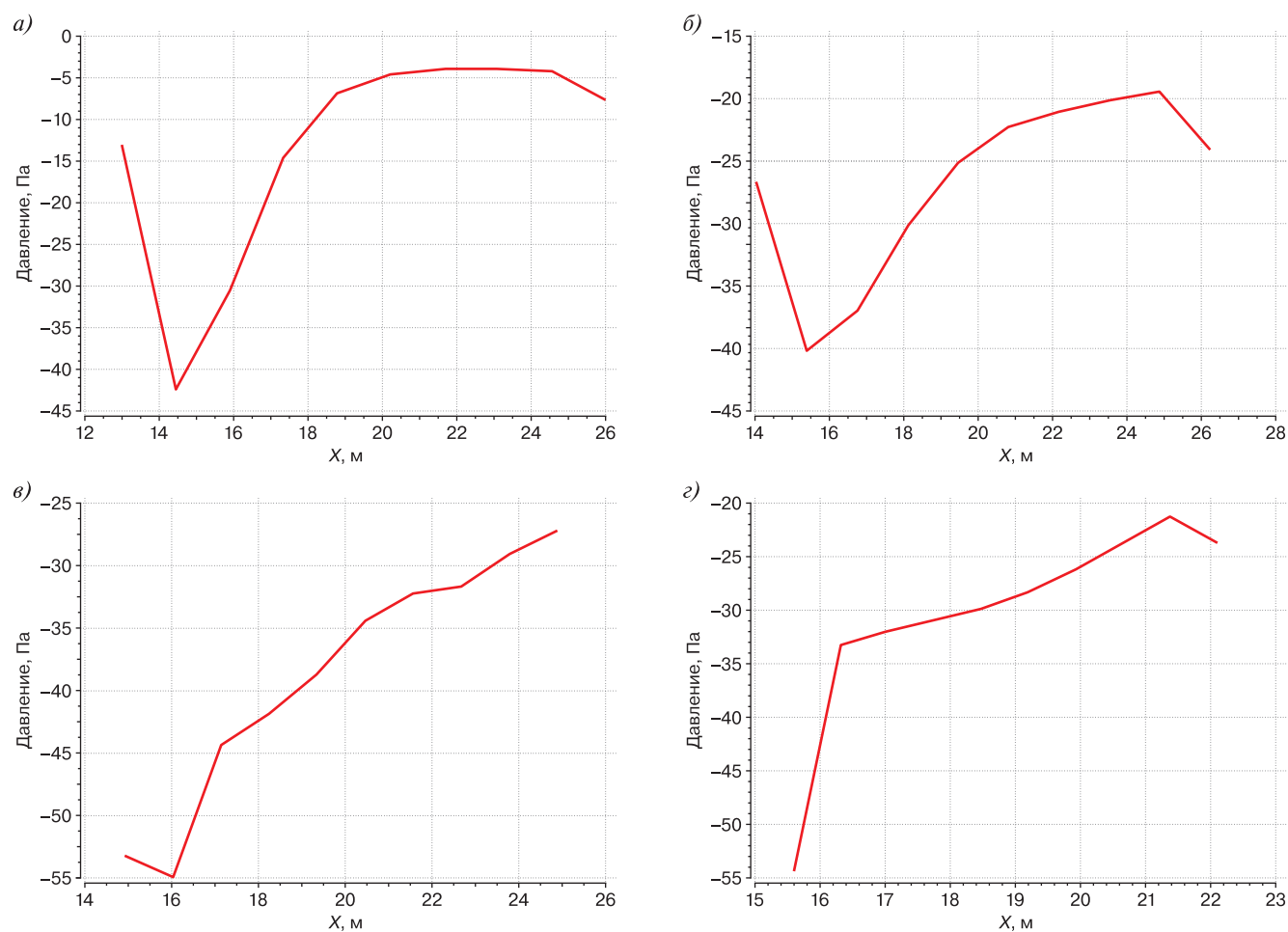


Рис. 3. Давления на боковые поверхности на высоте 1,75 м от основания кузова вагона при углах атаки*:

$a - 0^\circ$; б — 20° ; в — 40° ; з — 60°

* Источник: данные авторов

Fig. 3. Pressure on the side places at 1.75 m from the car body base under angle of attacks*:

$a - 0^\circ$; б — 20° ; в — 40° ; з — 60°

* Source: authors' data

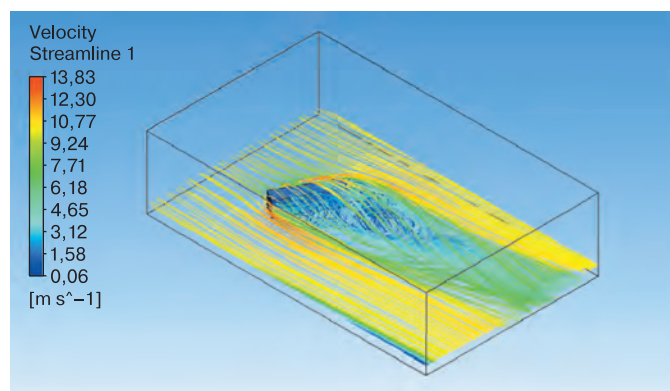


Рис. 4. Линии тока в расчетной области в случае обтекания вагона потоком воздуха при угле атаки 60° *

* Источник: данные авторов

Fig. 4. Current lines in the design area in the case of car streamline by air flow at angle of attack of 60° *

* Source: authors' data

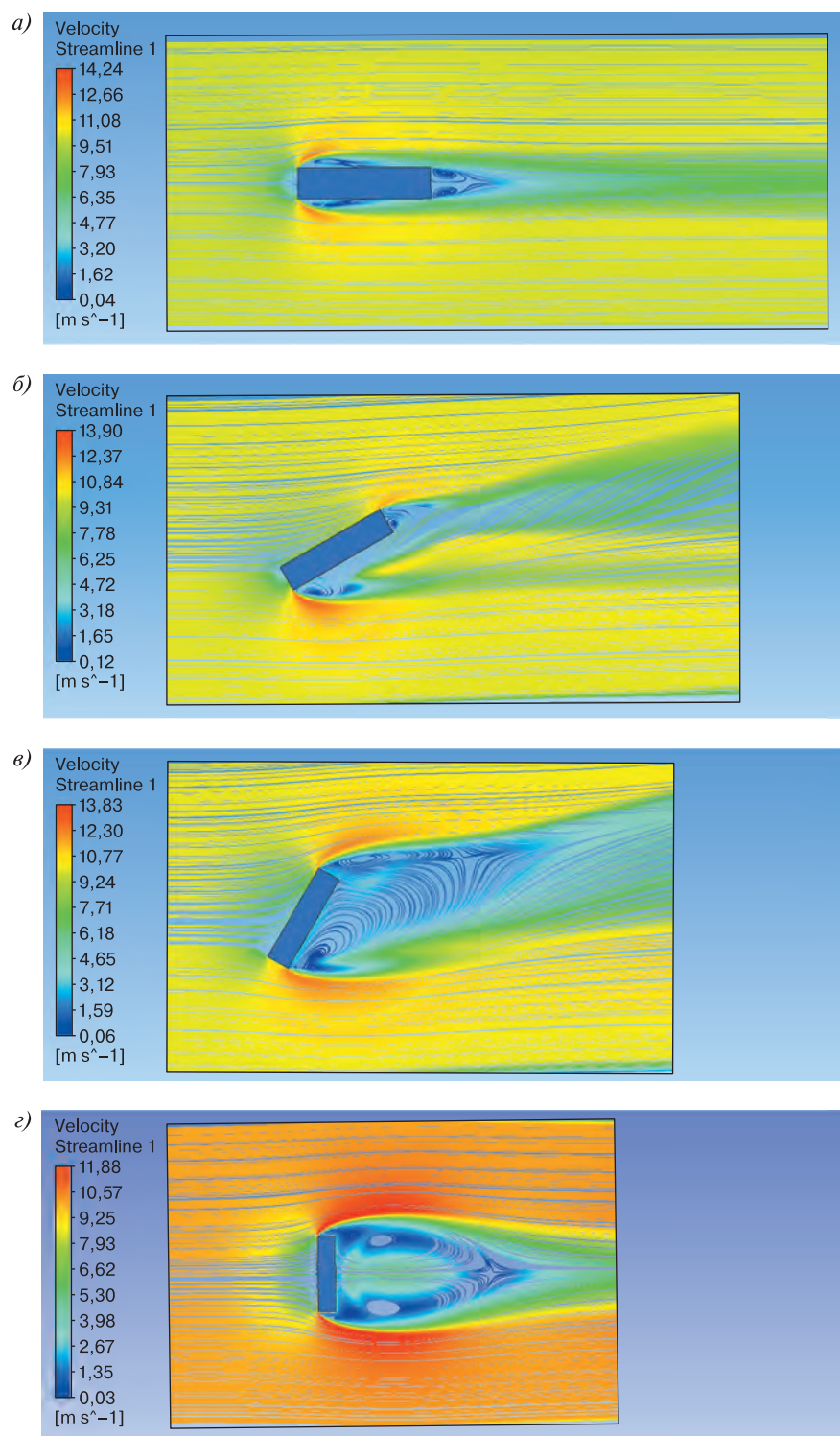


Рис. 5. Распределение скоростей потока в горизонтальном сечении расчетной области на высоте 1,75 м от основания кузова вагона при углах атаки*:
 $a - 0^\circ$; б — 30° ; в — 60° ; г — 90°
 * Источник: данные авторов

Fig. 5. Distribution of flow velocities in the horizontal section of the design area at a height of 1.75 m from the car body base at angles of attack*:
 $a - 0^\circ$; б — 30° ; в — 60° ; г — 90°
 * Source: authors' data

В то же время наблюдается изменение картин распределения скоростей воздушного потока (рис. 5). При значениях угла атаки больше 30° область, в которой наблюдаются возмущения воздушного потока, существенно расширяется. Если при 0 и 90° наибольшие градиенты скорости (им соответствуют места с резким изменением скорости воздушного потока) наблюдаются вблизи вертикальных ребер, ближайших к области входа, то при иных значениях угла атаки такие градиенты наблюдаются и в хвостовой части вагона.

Значения проекций равнодействующей силы давления воздуха на поперечную (F_l , Н) и продольную (F_x , Н) оси вагона (эти оси показаны на рис. 1) определены по формулам:

$$F_l = F_x \sin \alpha + F_z \cos \alpha; \quad (1)$$

$$F_x = F_x \cos \alpha - F_z \sin \alpha, \quad (2)$$

где F_x , F_z — проекции той же равнодействующей на оси x и z , Н; α — угол между вектором скорости ветра и осью пути, град.

Коэффициент аэродинамического сопротивления C_x определяется по формуле [3]:

$$C_x = \frac{2F_l}{\rho v^2 A}, \quad (3)$$

где ρ — плотность воздуха, кг/м^3 ; v — скорость входящего воздушного потока, м/с ; A — площадь поперечного сечения обтекаемого тела, м^2 .

Полученная расчетом зависимость аэродинамического коэффициента от угла между вектором скорости ветра и осью пути приведена на рис. 6.

Изменение угла атаки воздушного потока от 0° до 20° вызывает увеличение коэффициента аэродинамического сопротивления более чем на 20%. Такой эффект обусловлен действием распределенных

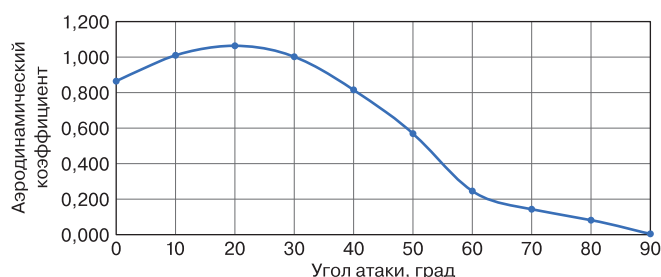


Рис. 6. Зависимость аэродинамического коэффициента от угла атаки*

* Источник: данные авторов

Fig. 6. Dependence of aerodynamic coefficient on the angle of attack*

* Source: authors' data

касательных сил на боковые поверхности вагона. При дальнейшем увеличении данного угла значения аэродинамического коэффициента уменьшаются.

Полученное по результатам численного моделирования изменение коэффициента аэродинамического сопротивления хорошо согласуется со значениями, определенными путем экспериментов¹.

На рис. 7 представлен график изменения боковой силы в зависимости от значения угла атаки.

Из представленного графика видно, что при значениях угла атаки в диапазоне от 0 до 50° значение боковой силы значительно увеличивается. При дальнейшем изменении угла атаки данное значение остается практически постоянным.

Обсуждение и заключение. Результаты выполненных расчетов показывают, что угол атаки воздушного потока оказывает существенное влияние на продольные и поперечные силы, действующие на вагон. Установлено, что наиболее неблагоприятные условия, при которых действующая на него продольная сила максимальна, возникают при углах атаки от 10 до 30° . Именно в этом случае значительно увеличивается вероятность самопроизвольного ухода со станционных путей недостаточно закрепленных вагонов при увеличении скорости ветра. Представленная методика компьютерного моделирования обтекания вагона потоком воздуха и полученные в ходе расчетов результаты могут быть использованы при автоматизации эксплуатации железнодорожного подвижного состава, например, для расчета количества средств закрепления подвижного состава на станционных путях в режиме реального времени на основании конкретных данных о составе, а также позволяют провести анализ необходимости дополнительных средств закрепления с учетом реальных погодных условий, что в дальнейшем может стать основой для совершенствования норм

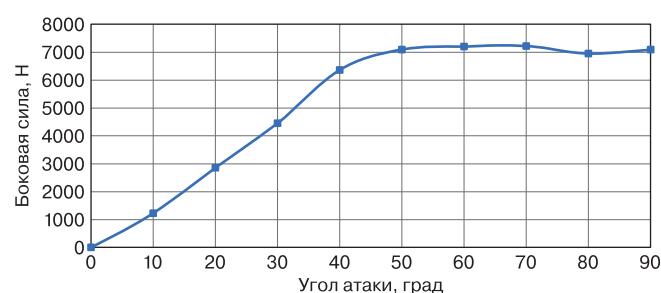


Рис. 7. График зависимости боковой силы от угла атаки воздушного потока при скорости ветра 15 м/с *

* Источник: данные авторов

Fig. 7. Graph of the lateral force dependence on the angle of attack of the airflow at a wind speed of 15 м/с *

* Source: authors' data

¹ Луговцов М. Н., Негрей В. Я. Проектирование сортировочных горок: учеб. пособие. Гомель: БелГУТ, 2005. 170 с.

расчета тормозных башмаков. Полученные результаты могут быть использованы для нахождения аэродинамических сил, действующих на автомобили и иные транспортные средства.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» (задание 1.08).

Funding: The work was carried out with the financial support of the State Scientific Research Programme "Mechanics, Metallurgy, Diagnostics in Mechanical Engineering" of the Republic of Belarus (task 1.08).

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Krajnović S., Davidson L. Flow around a simplified car, Part 1: Large Eddy Simulation. *Journal of Fluids Engineering*. 2005;127(5):907–918. <https://doi.org/10.1115/1.1989371>.
- Wang S., Bell J. R., Burton D., Herbst A. H., Sheridan J., Thompson M. C. The performance of different turbulence models (URANS, SAS and DES) for predicting high-speed train slipstream. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2017;165:46–57. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.03.001>.
- Xiong X., Geng J., Wang K., Wang X. Effect of wing height layout on the aerodynamic performance of high-speed train. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2024;34(10):3731–3763. <https://doi.org/10.1108/HFF-02-2024-0136>.
- Li X. B., Liang X. F., Wang Z., Xiong X. H., Chen G., Yu Y. Z., Chen C. M. On the correlation between aerodynamic drag and wake flow for a generic high-speed train. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021;215:1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104698>.
- Лабутин Н. А. Разработка численной модели аэродинамического взаимодействия высокоскоростного поезда, воздушной среды и объектов инфраструктуры // Мир транспорта. 2022. Т. 20, № 4 (101). С. 6–16. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-4-1>.
- Labutin N. A. Development of a numerical model of the aerodynamic interaction of a high-speed train, air environment and infrastructure facilities. *World of Transport and Transportation*. 2022;20(4):6–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-4-1>.
- García J., Muñoz-Paniagua J., Xu L., Baglietto E. A second-generation URANS model (STRUCT-e) applied to simplified freight trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2020;205:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104327>.
- Hemida H. Contribution of computational wind engineering in train aerodynamics — past and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023;234:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105352>.
- Zhuang Y., Lu X. Numerical investigation on the aerodynamics of a simplified high-speed train under crosswinds. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2015;5(5):181–186. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2015.06.001>.
- Miao X., He K., Minelli G., Zhang J., Gao G., Wei H., He M., Krajnović S. Aerodynamic performance of a high-speed train passing through three standard tunnel junctions under crosswinds. *Applied Sciences*. 2020;10(11):3664. <https://doi.org/10.3390/app10113664>.
- Reyes C. E. A., Rocchi D., Tomasini G., Sánchez M. I., Artano M. Effects of different aerodynamic configurations on crosswind stability of a conventional train. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023;242:105588. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105588>.
- Flynn D., Hemida H., Baker C. On the effect of crosswinds on the slipstream of a freight train and associated effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2016;156:14–28. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.07.001>.
- Maleki S., Burton D., Thompson M. C. Assessment of various turbulence models (ELES, SAS, URANS and RANS) for predicting the aerodynamics of freight train container wagons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2017;170:68–80. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.07.008>.
- Li C., Burton D., Kost M., Sheridan J., Thompson M. C. Flow topology of a container train wagon subjected to varying local loading configurations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2017;169:12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.06.011>.
- Paul J. C., Johnson R. W., Yates R. G. Application of CFD to rail car and locomotive aerodynamics. *The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, And Trains*. 2009;41:259–297. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85070-0_25.
- Maleki S., Burton D., Thompson M. C. Flow structure between freight train containers with implications for aerodynamic drag. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2019;188:194–206. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.02.007>.
- Бороненко Ю. П., Поляков Б. О., Белгородцева Т. М. Определение аэродинамического сопротивления грузовых поездов с инновационными полувагонами на цифровых моделях // Транспорт Российской Федерации. 2021. № 3(94). С. 57–61. EDN: <https://www.elibrary.ru/vysiiq>.
- Boronenko I. U. P., Poliakov B. O., Belgorodtseva T. M. Determination of aerodynamic resistance of cargo trains with open-top wagons in digital simulations. *Transport of the Russian Federation*. 2021;3(94):57–61. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/vysiiq>.
- Воробьев А. А., Ватулин Я. С., Ватаев А. С., Каримов Д. Д., Сотников К. А. К вопросу снижения негативного эффекта воздействия аэроупругого взаимодействия высокоскоростного подвижного состава с элементами тоннельных сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19, № 3. С. 590–599. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2022-3-590-599>.
- Vorob'ev A. A., Vatulin Ya. S., Vataev A. S., Karimov D. D., Sotnikov K. A. On the Issue of Negative Effect Reduction of Aeroelastic Interaction Between High-Speed Rolling Stock and Tunnel Structure Elements. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2022;19(3):590–599. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2022-3-590-599>.
- Демьянчук О. В. Моделирование обтекания потоком воздуха прямоугольного параллелепипеда // Механика. Исследования и инновации. 2023. Вып. 16. С. 64–72. EDN: <https://www.elibrary.ru/sfkchl>.
- Dzemyanchuk V. U. Simulation of air flow movement around a rectangular parallelepiped. *Mechanics. Research and Innovation*. 2023; 16:64–72. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/sfkchl>.
- Shimanovsky A. O., Dzemyanchuk V. U. Simulation of airflow movement around a vehicle. In: *XV Annual International Meeting of the Georgian Mechanical Union, Book of Abstracts*. Batumi, Georgia; 2024:180–181. EDN: <https://elibrary.ru/gxhvne>.
- Молчанов А. М. Математическое моделирование задач газодинамики и теплообмена. М.: МАИ, 2013. 206 с.
- Molchanov A. M. *Mathematical modeling of gas dynamics, heat, and mass transfer problems*. Moscow: MAI; 2013. 206 p. (In Russ.).
- Shimanovsky A. O., Kuzniatsova M. G., Yakubovich V. I. Dynamics of tank trucks with baffles for transportation of viscous liquids. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2018;7(4):438–443. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.7.4.438-443>.
- Шимановский А. О., Демьянчук О. В. Аэродинамика модели железнодорожного грузового вагона при разных углах атаки воздушного потока // Механика машин, механизмов и материалов. 2024. № 2 (67). С. 23–29. <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-23-29>.

Shimanovsky A. O., Dzemyanchuk V. U. Railway freight car model aerodynamics at different airflow attack angles. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2024;2:23–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-23-29>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Олегович ШИМАНОВСКИЙ,

д-р. техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Техническая физика и теоретическая механика», Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ, 246653, Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34), Author ID: 481473, <https://orcid.org/0000-0001-8550-1725>

Ольга Владимировна ДЕМЬЯНЧУК,

аспирант кафедры «Техническая физика и теоретическая механика», Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ, 246653, Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34), Author ID: 1169204, <https://orcid.org/0009-0002-7063-4183>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexandr O. Shimanovsky,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Technical Physics and Theoretical Mechanics Department, Belarusian State University of Transport (246653, Republic of Belarus, Gomel, 34, Kirova St.), Author ID: 481473, <https://orcid.org/0000-0001-8550-1725>

Volha U. Dzemyanchuk,

Postgraduate Student of Technical Physics and Theoretical Mechanics Department, Belarusian State University of Transport (246653, Republic of Belarus, Gomel, Kirova St., 34), Author ID: 1169204, <https://orcid.org/0009-0002-7063-4183>

ВКЛАД АВТОРОВ

Александр Олегович ШИМАНОВСКИЙ. Формулировка цели и методологии исследования, анализ результатов, выводы (30 %).

Ольга Владимировна ДЕМЬЯНЧУК. Разработка компьютерных моделей, выполнение расчетов, описание результатов и их анализ, написание статьи (70 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexandr O. Shimanovsky. Formulation of the purpose and methodology of the study, analysis of the results, conclusions (30 %).

Volha U. Dzemyanchuk. Development of computer models, calculations performing, results description and analysis, article writing (70 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 18.12.2024, рецензия от первого рецензента получена 09.01.2025, рецензия от второго рецензента получена 13.01.2025, рецензия от третьего рецензента получена 22.01.2025, рецензия от четвертого рецензента получена 23.01.2025, принята к публикации 25.04.2025.

The article was submitted 18.12.2024, first review received 09.01.2025, second review received 13.01.2025, third review received 22.01.2025, fourth review received 23.01.2025, accepted for publication 25.04.2025.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 625.143:539.3:531.781.2

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

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



Остаточные эксплуатационные напряжения на поверхности катания рельса Р65

В. И. Сакало, А. В. Сакало✉

Брянский государственный технический университет (БГТУ),
Брянск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблемы долговечности рельсов и методов ее прогнозирования в условиях возрастания грузонапряженности железных дорог продолжают быть актуальными. В области контакта колеса и рельса возникают высокие напряжения, вызванные усилиями их взаимодействия. Они учитываются при оценке контактной прочности рельсов, и для их расчета разработаны эффективные, апробированные методы. Кроме контактных напряжений рельсы содержат в себе остаточные технологические напряжения, возникающие при холодной правке и термоупрочнении, однако эти напряжения претерпевают изменения в процессе эксплуатации рельса. Эти напряжения недостаточно хорошо изучены. Расчетно-экспериментальными методами получены распределения технологических остаточных напряжений во внутренних точках рельса. Эксплуатационные остаточные напряжения исследованы рентгеновским методом в основном для рельсов, изготовленных из зарубежных марок сталей с большим сроком эксплуатации. Целью работы является определение остаточных эксплуатационных напряжений на поверхности катания рельса Р65 при продолжительном силовом воздействии колес тяжеловесных грузовых вагонов.

Материалы и методы. Для определения эксплуатационных остаточных напряжений на поверхности катания рельса использован отрезок рельса длиной 750 мм. Он находился в эксплуатации в течение 20 лет в пути с тяжеловесным движением. Измерение деформаций выполнено с помощью метода электротензометрии. Для измерения использовались тензорезисторы с базой 5 мм и сопротивлением 52,4 Ом. В продольном направлении параллельно оси рельса было наклеено 9 тензорезисторов, а в поперечном 4 тензорезистора. Для определения остаточных напряжений использован метод релаксации напряжений.

Результаты. Получены распределения продольных и поперечных эксплуатационных остаточных напряжений по ширине поверхности катания рельса, а затем выполнен их анализ.

Обсуждение и заключение. Полученные значения продольных и поперечных эксплуатационных остаточных напряжений в точках поверхности катания рельса хорошо согласуются с результатами, полученными другими авторами с использованием рентгеновских методов. При исследовании остаточных напряжений в рельсах с достаточно большим сроком эксплуатации рентгеновскими методами установлено, что наибольшие напряжения примерно одинакового значения возникают в подповерхностном слое толщиной около 10 мм. В этом слое существует наибольшая вероятность зарождения усталостных трещин. Учет полученных остаточных напряжений в методах моделирования процессов накопления контактно-усталостных повреждений позволит их усовершенствовать и повысить достоверность получаемых результатов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный рельс, остаточные напряжения, электротензометрия, тензорезистор, метод релаксации, рентгеновский метод исследования напряжений

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сакало В. И., Сакало А. В. Остаточные эксплуатационные напряжения на поверхности катания рельса Р65 // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 2. С. 92–103.

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 625.143:539.3:531.781.2

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

Scientific specialty: 2.9.2. Railway track, survey and design of railways



Residual service stresses on tread of P65 rail

Vladimir I. Sakalo, Alexey V. Sakalo✉

Bryansk State Technical University,
Bryansk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The problems of rail durability and methods of forecasting it in conditions of increasing traffic density continue to be relevant. High stresses occur in the area of contact between the wheel and the rail, caused by the efforts of their interaction. They are considered in assessing contact strength of rails, and for their calculations effective and proven methods were developed. In addition to contact stresses rails contain residual process stresses that appear during cold straightening and thermal hardening, but these stresses undergo changes during rail operation. These stresses are not well studied. The distributions of technological residual stresses in the inner points of the rail are obtained by computational and experimental methods. Service residual stresses were studied by X-ray method mainly for rails made of foreign grades of steels with a long service life. The aim of the article is to determine the residual service stresses on the tread of P65 rail under the influence of long-term force action of the wheels of heavy-load cars.

Materials and methods. In order to determine the residual service stresses on the tread of rail, a 750 mm long piece of rail was used. It has been in service for 20 years in heavy traffic transit. The deformations were measured using the electric strain gauge measuring method. Strain gauges with a base of 5 mm and a resistance of 52.4 Ohms were used for measurement. Longitudinally, 9 strain gauges were glued in parallel to the rail axis, and 4 strain gauges were glued transversely. The stress relaxation method was used to determine the residual stresses.

Results. The authors obtained distributions of longitudinal and transverse residual service stresses over the width of the tread of rail and performed their analysis.

Discussion and conclusion. The obtained values of the longitudinal and transverse residual service stresses at the points of the tread of rail are in agreement with the results obtained by other authors using X-ray methods. When examining residual stresses in rails with sufficiently long service life using X-ray methods, it was found that the greatest stresses of approximately the same value arise in a subsurface layer with a thickness of about 10 mm. In this layer, there is the greatest probability of fatigue cracks. Considering the obtained residual stresses in the methods of modeling the processes of accumulation of rolling contact fatigue damage would allow to improve them and increase the accuracy of the obtained results.

KEYWORDS: rail, residual stresses, electric strain gauge measurement, strain gauge, relaxation method, X-ray research method of stresses

FOR CITATION: Sakalo V.I., Sakalo A.V. Residual service stresses on tread of P65 rail. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(2):92–103. (In Russ.).

Введение. В железнодорожных рельсах существуют остаточные напряжения, значения которых сопоставимы со значениями напряжений в областях, прилегающих к контакту колеса и рельса, вызванных усилиями их взаимодействия. Введение остаточных напряжений в расчеты, выполняемые при оценке контактной прочности рельса, а также при моделировании процессов накопления контактно-усталостных повреждений в подконтактном слое материала позволяет повысить уровень достоверности получаемых результатов.

Технологические остаточные напряжения в рельсе возникают после завершения его изготовления операциями холодной правки и термической обработки. Они имеют небольшие значения по сравнению с напряжениями, вызванными силами взаимодействия колеса и рельса. Вблизи поверхности контакта продольные напряжения сжимающие. Они достигают значений 50–150 МПа. Поперечные напряжения — растягивающие — около 50 МПа [1].

В процессе эксплуатации рельса остаточные напряжения меняются. Так, например, в рельсе, бывшем в эксплуатации в течение 20 лет, наибольшие поперечные напряжения — сжимающие (около –300 МПа) — могут возникать под поверхностью катания в слое материала толщиной примерно 5 мм, а на глубине около 5–15 мм — растягивающие — около 200 МПа [2].

Расчетами, выполненными авторами с использованием решения Герца [3], было установлено, что в контакте вагонного колеса и рельса с неизношенными поверхностями катания при нагрузке 120 кН пятно контакта имеет эллиптическую форму с большой полуосью $a = 7,45$ мм, ориентированной поперек рельса, и малой полуосью $b = 7,24$ мм в продольном направлении. Возникает максимальное давление p_0 , равное 1056 МПа. Поперечные нормальные напряжения в центре контакта составили –788 МПа, продольные –662 МПа.

Значения остаточных эксплуатационных напряжений могут достигать 0,4 от значения напряжений, возникающих на поверхности контакта, обусловленных силами взаимодействия колеса и рельса. Задача экспериментального определения закономерностей изменения остаточных напряжений от технологических до эксплуатационных, зависящих от срока и условий эксплуатации рельса, является трудоемкой. Тем не менее в расчетах могут быть использованы интерполяционные зависимости, выведенные на основе уже полученных результатов.

Целью работы является исследование остаточных напряжений, возникающих на поверхности катания рельса типа Р65 при продолжительном силовом воздействии колес тяжеловесных грузовых вагонов.

Методы исследования напряжений. Для определения остаточных напряжений в рельсах применяются

следующие методы: электротензометрия, рентгеновский метод, метод конечных элементов, ультразвуковой, контурный.

Напряженное состояние в точках, расположенных на поверхности рельса и во внутренних точках, является трехосным. Экспериментальные методы позволяют определить относительные деформации: продольную ε_x , поперечную ε_y и вертикальную ε_z . Напряжения σ_x , σ_y , σ_z определяются с использованием зависимостей [15]

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)]; \\ \sigma_y &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_z + \varepsilon_x)]; \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)],\end{aligned}\quad (1)$$

где σ_x , σ_y , σ_z — продольное, поперечное и вертикальное нормальные напряжения, МПа;

ε_x , ε_y , ε_z — относительная продольная, поперечная и вертикальная линейные деформации, безразмерные;

ν — коэффициент Пуассона, безразмерный;

E — модуль упругости при растяжении (первого рода), МПа.

Использование двухкомпонентных розеток тензорезисторов с ориентацией оси решетки одного тензорезистора вдоль оси x параллельно оси рельса, а другого вдоль оси y , перпендикулярной ей, позволяет определить продольное остаточное напряжение σ_{xR} и поперечное σ_{yR} .

Экспериментальный способ определения напряжений может комбинироваться с расчетным. Тогда результаты тензометрирования используются как исходные данные для вычисления остаточных напряжений во внутренних точках рельса.

В работе [4] остаточные технологические напряжения определены в рельсе, для которого выполнена заключительная операция — холодная правка. Использован отрезок рельса длиной 500 мм. На поверхности рельса было установлено 12 двухкомпонентных розеток тензорезисторов. Из отрезка рельса выделялся срез с установленными тензорезисторами путем выполнения двух поперечных разрезов с одной и другой стороны от цепочки розеток и третьего по вертикальной оси симметрии полученного среза. После выполнения первого разреза продольные остаточные напряжения вблизи разреза релаксируют. Были замерены обусловленные их релаксацией продольные деформации. На каждом этапе последующего выполнения разрезов они замерялись снова. Продольные деформации оставались практически неизменными при выполнении разрезов после первого разреза. С использованием результатов измерений были вычислены

остаточные напряжения в точках установки розеток тензорезисторов. Расчеты для определения напряжений во внутренних точках поперечного сечения рельса были проведены в программном комплексе ABAQUS. В качестве краевых условий использовались остаточные напряжения, вычисленные по результатам тензометрирования. Вблизи поверхности катания рельса получены остаточные напряжения: поперечные $\sigma_{11} = 50$ МПа, вертикальные $\sigma_{22} = -10$ МПа, продольные $\sigma_{33} = -50$ МПа.

В [1] приведены результаты аналогичных исследований. Остаточные технологические напряжения определены в рельсе, правленном с использованием роликовой правильной машины и термоупрочненным. Для определения остаточных напряжений применена расчетно-экспериментальная методика с регулирующим алгоритмом. На рельс было наклеено 30 тензорезисторов по всему контуру поперечного сечения симметрично относительно оси симметрии профиля рельса. Экспериментально определены продольные остаточные деформации на контуре поперечного сечения рельса по показаниям измерительных схем до вырезания среза и после. Они использованы как входные данные в интерполяционной методике. Она позволила определить продольные остаточные напряжения в объеме рельса. Наибольшие напряжения в головке рельса -150 МПа получены в областях, прилегающих к выкружкам на глубине около $5,8$ мм.

В работе [5], посвященной исследованию условий возникновения дефектов рельсов, применен расчетно-экспериментальный метод с использованием тензорезисторов. Определены продольные остаточные напряжения в поперечных сечениях дифференцированно-термоупрочненного рельса ДТ350 и объемно-закаленного ОТ350. Для рельса ДТ350 в нижней части головки в областях, прилегающих к боковым поверхностям, получены значения сжимающих напряжений от -125 до -150 МПа. Под серединой поверхности катания находится область с растягивающими напряжениями, достигающими значения 250 МПа. Для рельса ОТ350 они составили соответственно: сжимающие -150 МПа и растягивающие 150 МПа.

В [6] для определения остаточных напряжений применен метод кольцевого сердечника, состоящий в следующем: на поверхность рельса наклеивается прямоугольная трехкомпонентная розетка тензорезисторов, снимаются показания измерительных схем, вокруг розетки высверливается кольцевая канавка, напряжения релаксируют, после чего снимаются показания схем и определяются значения главных остаточных напряжений и их направления.

В [7] продольные остаточные напряжения в сварном рельсе определены экспериментально методом высверливания отверстий на глубину 250 мкм. Моде-

лирование температурного поля и термомеханический анализ для этапов контактной сварки — предварительного нагрева, выжигания и осадки — выполнено методом конечных элементов с использованием программы ABAQUS. В слое материала, прилегающем к поверхности катания рельса, получены продольные сжимающие остаточные напряжения около -200 МПа. В нижней части головки рельса растягивающие напряжения достигали 718 МПа.

В [8] методом сверления отверстий определены остаточные напряжения на поверхности рельса, изготовленного из сплава U71Mn контактной сваркой. Процесс термоупругопластической деформации смоделирован с использованием конечно-элементной модели комплекса FEM JWRIAN 2010. Замеры выполнены с использованием трехкомпонентных розеток тензорезисторов. В поперечном сечении рельса, проходящем по сварному стыку, получены средние поперечные напряжения, равные $18,74$ МПа, а в сечении, отстоящем на расстоянии 20 мм, 11 МПа. Продольные остаточные напряжения составили -215 и -224 МПа соответственно.

В работе [9] применен конечно-элементный метод моделирования для определения влияния лазерного порошкового напыления, применяемого для восстановления изношенных рельсов, на остаточные напряжения. Получены распределения продольных, поперечных и вертикальных остаточных напряжений по длине, ширине и толщине области материала, расположенной под поверхностью катания.

В [10] с использованием трехмерных конечно-элементных моделей колеса и рельса исследовано влияние технологических остаточных напряжений в рельсе на напряженное состояние в областях, прилегающих к контакту. В качестве варьируемых факторов рассматривались нагрузка на колесо, коэффициент трения, продольный крип. Приведена картина распределения продольных остаточных напряжений. В верхней части головки рельса они растягивающие, величиной около 96 МПа. Сжимающие напряжения до -200 МПа наблюдаются на расстоянии $11-16$ мм в центральной части под серединой поверхности катания.

В [11] исследовано влияние конструкции вертикальных и горизонтальных правильных роликов на остаточные напряжения в железнодорожном рельсе. Использован пакет Forge для конечно-элементного моделирования. Получены распределения поперечных и вертикальных остаточных напряжений, возникающих после правки рельса. Поперечные напряжения в верхней части головки рельса сжимающие и составляют около -100 МПа. В расположенном ниже слое они растягивающие около 60 МПа.

Работа [12] посвящена разработке моделей прогнозирования остаточных напряжений, возникающих

после роликовой правки рельса. Выявлено влияние напряжений, вызванных изгибом рельса, и контактных напряжений на остаточные напряжения. В программе ABAQUS построена трехмерная конечно-элементная модель с использованием плоской модели для поперечного сечения, образованной из четырехугольных элементов. Сетка сгущена в верхней части головки рельса для обеспечения корректного определения напряжений в области контакта рельса с правильными роликами. Напряжения в поперечном сечении определялись от изменяющегося в процессе правки изгибающего момента. Получены распределения продольных остаточных напряжений по высоте рельса.

В [13] исследован механизм формирования остаточных напряжений в рельсе со сварным стыком. Влияние силы осадки, включая температурный диапазон и ее величину, исследовано с использованием термического упругопластического конечно-элементного анализа. В головке рельса получены сжимающие напряжения, достигающие значения -648 МПа.

Рентгеновские методы нашли применение для определения остаточных напряжений во внутренних точках деталей. Облучение детали рентгеновскими лучами позволяет определить остаточные напряжения в точках поверхностного слоя детали по искажению кристаллической решетки материала, вызванной этими напряжениями.

В работе [14] рентгеновскими методами определены технологические остаточные напряжения в новом рельсе и бывшем в эксплуатации в течение 23 лет. Поперечные и вертикальные напряжения получены для выделенных срезов рельса толщиной 5 мм. Продольные напряжения получены контурным методом. После выполнения разреза исследован профиль поверхности поперечного сечения рельса и по продольным перемещениям его точек определены продольные напряжения. Для нового рельса получены наибольшие продольные напряжения -150 МПа в областях, прилегающих к выкружкам головки рельса, и поперечные напряжения примерно -200 МПа в области, прилегающей к поверхности катания. В изношенном рельсе в слое материала толщиной около 10 мм, прилегающем к поверхности катания, поперечные напряжения достигают -300 МПа.

В [15] исследованы деформации в изношенном рельсе, изготовленном из перлитной стали марки 260 (масса 56 кг/м). Использован срез рельса толщиной 16 мм. Хотя рельс был изношен, существенных изменений профиля не было обнаружено. Головка рельса была покрыта сеткой с расстоянием 2 мм между ее точками. Замеры в точках сетки выполнены с помощью нейтронного дифрактометра. Получены распределения поперечных, вертикальных и продольных

остаточных деформаций в головке рельса. С использованием закона Гука для трехосного напряженного состояния определены соответствующие остаточные напряжения. Продольные напряжения в подконтактном слое толщиной 6 мм в основном сжимающие до -150 МПа. Поперечные остаточные напряжения в этом слое превышают -200 МПа. На глубине более 6 мм в области, прилегающей к оси симметрии профиля рельса, возникают растягивающие напряжения около 150 МПа.

В [2] исследованы остаточные напряжения в срезах рельса, прилегающих к стыку. Рассматривались рельсы в состоянии «после изготовления», «частично поврежденный» и «сильно поврежденный». Использовался нейтронный сканер. Замеры поперечных и вертикальных напряжений выполнены на поперечном срезе рельса толщиной 5 мм. Напряжения измерялись в узлах сеток, использованных для поперечного и продольного срезов. Для рельса с частично поврежденным стыком и сильно поврежденным под поверхностью катания на глубине до 5 мм получены сжимающие продольные и поперечные остаточные напряжения в -300 МПа, а на глубине 15 мм растягивающие в 200 МПа. Значения продольных остаточных напряжений получены с использованием продольного среза. В подконтактном слое они сжимающие и достигают значений -300 МПа. На глубине 34 мм они растягивающие, около 300 МПа.

В [16] для определения остаточных эксплуатационных напряжений использован отрезок прямого рельса длиной 0,5 м, изготовленного из стали JIS E 1101. Рельс находился в эксплуатации в течение 6 лет (пропущенный тоннаж составил 222 млн тонн). Он был подвергнут шлифовке примерно через 2 года после укладки в путь. Глубина шлифовки составила 0,4 мм. Для испытаний на расстоянии 125 мм от торца отрезка плоскостью, перпендикулярной оси z , был выделен срез, прилегающий к поверхности катания головки рельса, размерами 73,5 мм по продольной оси x , 65 мм по поперечной оси y и 14,35 мм по толщине. Измерение остаточных деформаций проведено с использованием анализатора остаточных напряжений RESA. Деформации измерялись по трем направлениям: продольные вдоль оси x , поперечные по оси y и по оси z , перпендикулярной осям x и y . С использованием закона Гука для трехосного напряженного состояния вычислены остаточные напряжения в точках, расположенных на глубине 1,5–4,0 мм по центру рельса и на расстоянии $y = 22,5$ мм от центра по направлению к выкружке рельса. По центру рельса продольные и поперечные напряжения сжимающие, близки по значению к -100 МПа с минимумами -20 и -50 МПа на глубине 2–2,5 мм. В точках, расположенных у выкружки рельса на глубине 1,5 мм, они примерно одинаковой

величины и равны –175 МПа, а у выкружки уменьшаются до –100 МПа.

В [17] исследованы остаточные напряжения в рельсе типа 136RE, восстановление изношенной поверхности которого проведено путем лазерного порошкового напыления. Для этого был использован рентгеновский метод. Получены распределения продольных и поперечных напряжений в зависимости от положения напыляемого слоя. Продольные напряжения для слоев 1, 3, 5 — растягивающие и составили 375, 240 и 320 МПа соответственно. Поперечные остаточные напряжения для слоев 1, 4, 5 растягивающие, равны 250, 190 и 260 МПа соответственно.

В [18] определены остаточные напряжения в зоне сварного стыка. Замеры выполнены рентгеновским методом. Представлены графики распределения продольных и поперечных остаточных напряжений. В центре шва располагается зона растягивающих напряжений со значениями до 391 МПа. По мере удаления от шва они меняются на сжимающие со значением до –166 МПа.

В [19] исследованы остаточные напряжения в головке рельса ультразвуковым методом с использованием разработанного зонда. Получены графики остаточных напряжений для трех образцов в зависимости от расстояния до средней линии по высоте головки. Они изменяются в диапазоне от –400 до –1400 МПа.

В работе [20] представлен контурный метод определения продольных остаточных напряжений, состоящий в следующем. Деталь разрезается на две части, и сканируется геометрия полученной новой поверхности среза для определения перемещений, вызванных релаксацией остаточных напряжений. Эти перемещения используются для определения остаточных напряжений каким-либо аналитическим методом, например, методом конечных элементов. После построения конечно-элементной модели в качестве краевых условий узлам задаются перемещения, противоположные по знаку полученным при сканировании профиля. По принципу суперпозиции Бюхнера этот расчет дает остаточные напряжения, перпендикулярные плоскости среза.

В [21] представлены изолинии продольных остаточных напряжений в головке рельса. На поверхности катания они достигают значения –152 МПа, а на глубине 9 мм равны нулю. Ниже располагается область с растягивающими напряжениями, превышающими 200 МПа.

Выполненный анализ показал, что широкое применение для исследования остаточных напряжений в рельсах получил рентгеновский метод. Он позволяет определить напряжения во внутренних точках рельса и на его поверхности, что является его достоинством. Выполняются поперечные срезы рельса чаще всего толщиной 5 мм. Просвечивание их рентгеновскими

лучами позволяет определить распределения поперечных и вертикальных остаточных напряжений. Для определения продольных остаточных напряжений используются продольные срезы. В таком применении метод является разрушающим.

К разрушающим относится также электротензометрический метод. При определении продольных остаточных напряжений на поверхность рельса наклеиваются тензорезисторы, ориентированные осями решеток в продольном направлении рельса. Затем выделяется поперечный срез с тензорезисторами и по показаниям измерительных схем, снятых до выполнения среза и после, определяются напряжения. Метод обеспечивает получение достаточно точных результатов. Результаты экспериментального метода используются для определения напряжений во внутренних точках рельса при применении расчетного метода, например, метода конечных элементов. При этом они задаются для конечно-элементной модели в качестве краевых условий. Для определения всех компонентов остаточных напряжений в отдельных точках поверхности рельса, в предположении, что напряженное состояние является плоским, используется метод высверливания отверстий и метод кольцевого сердечника. При этом используются трехкомпонентные розетки тензорезисторов.

Ультразвуковой метод для определения остаточных напряжений в рельсе используется редко. Он позволяет определить усредненные по ширине головки рельса продольные и вертикальные напряжения.

В своем исследовании авторы использовали метод электротензометрии.

Метод электротензометрии. При применении данного метода используются розетки тензорезисторов. В точке поверхности рельса наклеивается один тензорезистор либо двухкомпонентная или трехкомпонентная розетки тензорезисторов. Принимается допущение о том, что в месте расположения тензорезисторов напряженное состояние является плоским и напряжение, перпендикулярное поверхности, не учитывается. На рис. 1 показана двухкомпонентная розетка из тензорезисторов 1 и 2, наклеенных на поверхность детали 3. Они подпаиваются в мостовые измерительные схемы.

Если для определения остаточных напряжений используется метод релаксации напряжений, то снимаются показания измерительных схем A_i^0 в единицах шкалы измерителя деформаций или единицы светового табло. При вырезании прямоугольного фрагмента 3 детали малой толщины (рис. 1) остаточные напряжения в нем релаксируют, т.е. уменьшаются до нуля. После этого снимаются показания измерительных схем A_i^P . С использованием разностей показаний $A_i^P - A_i^0$, где A_i^0 — показание измерительной схемы с i -м тензорезистором до вырезания фрагмента рельса,

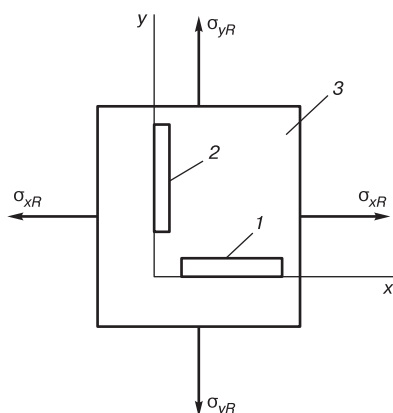


Рис. 1. Двухкомпонентная розетка тензорезисторов*:
1, 2 — тензорезисторы; 3 — фрагмент детали

* Источник: выполнено авторами

Fig. 1. Two-component strain gauge socket*:

1, 2 — strain gauges; 3 — detail piece

* Source: developed by the authors

а A_i^P — показание измерительной схемы с i -м тензорезистором после вырезания фрагмента рельса, а также определяются относительные деформации ε_x (продольная) и ε_y (поперечная) [22]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= C(A_1^P - A_1^0); \\ \varepsilon_y &= C(A_2^P - A_2^0),\end{aligned}\quad (2)$$

где C — цена деления шкалы измерителя деформаций или единицы его светового табло.

Расчетное снятие остаточных напряжений σ_{xR} и σ_{yR} осуществляется приложением к вырезанному фрагменту напряжений противоположного знака. Например, в случае сжимающих остаточных напряжений относительные линейные деформации элемента при приложении положительных снимающих напряжений выражаются зависимостями прямого закона Гука [4]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_{xR} - \nu\sigma_{yR}); \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_{yR} - \nu\sigma_{xR}),\end{aligned}\quad (3)$$

где E — модуль упругости материала рельса при растяжении; ν — коэффициент Пуассона; σ_{xR} , σ_{yR} — продольное и поперечное остаточные нормальные напряжения, МПа.

Деформации ε_x и ε_y определены экспериментальным методом. Тогда остаточные напряжения могут быть вычислены с использованием зависимостей

$$\begin{aligned}\sigma_{xR} &= -\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y); \\ \sigma_{yR} &= -\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x).\end{aligned}\quad (4)$$

Остаточные напряжения принимают со знаком, противоположным знаку снимающих напряжений.

Наиболее надежным способом определения остаточных напряжений методом релаксации является вырезание фрагмента детали с наклеенным тензорезистором. Однако достаточная точность может быть также получена и при выполнении пропилов определенной глубины вокруг тензорезистора. С использованием конечно-элементной модели стальной полосы с боковыми вырезами авторами исследовано влияние глубины вырезов на напряжения на расположенной между ними поверхности, на которую наклеен тензорезистор (рис. 2).

Были приняты следующие размеры полосы: длина $L = 104$ мм, ширина $B = 50$ мм, толщина $\delta = 1$ мм. Ширина вырезов принята равной 2 мм. Длина поверхности между вырезами, на которую наклеивается тензорезистор, принята равной 20 мм. Расчеты выполнены для глубин вырезов 4, 6, 8 и 10 мм.

На узлы конечно-элементной модели, расположенные в плоскости $y = 0$, наложены связи, параллельные оси y , а на узлы, расположенные в плоскости

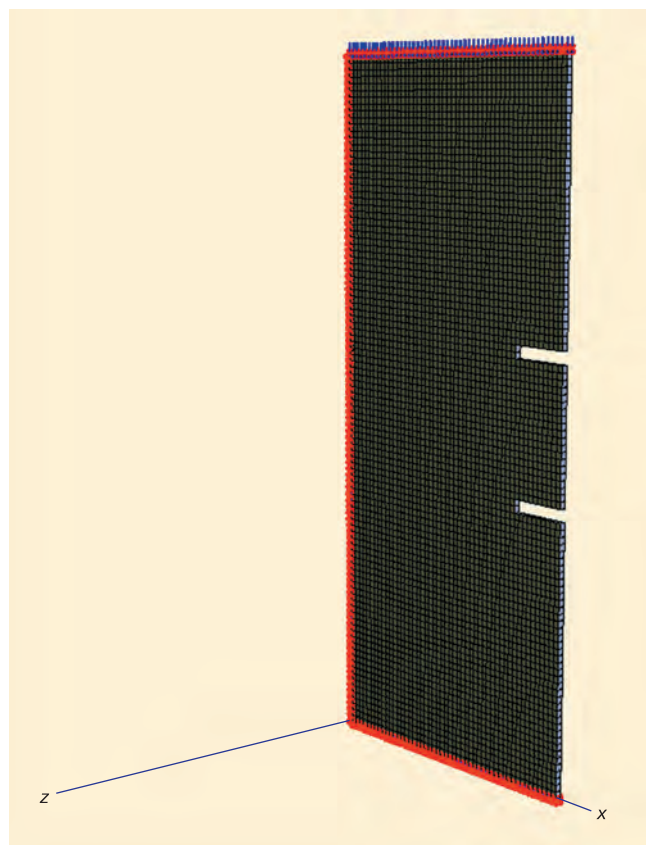


Рис. 2. Конечно-элементная модель полосы с боковыми вырезами*

* Источник: разработан авторами

Fig. 2. Finite-element model of a plate with side cutouts*

* Source: developed by the authors

$x = 0$ связи, параллельные оси x . В качестве краевого условия было задано перемещение узлов, расположенных на верхнем торце полосы, по оси y , равное 0,1 мм. При этом напряжение в поперечном сечении полосы на удалении от вырезов составило 200 МПа.

Распределения напряжений σ_y на длине участка с тензорезистором показаны на рис. 3. При глубине выреза, равной половине длины участка, на котором наклеен тензорезистор, напряжения становятся пренебрежимо малыми. Этот вывод использовался при выполнении резов в рельсе.

Определение остаточных эксплуатационных напряжений на поверхности катания рельса. Исследования проведены на отрезке рельса Р65 длиной 750 мм из прямого участка пути, который эксплуатировался в течение 20 лет на пути с тяжеловесным движением рельса Р65 длиной 750 мм из прямого участка пути, который эксплуатировался в течение 20 лет на пути с тяжеловесным движением. Для исследований использован метод электротензометрирования с тензорезисторами базой 5 мм и сопротивлением 52,4 Ом [22].

На рельс было наклеено 9 продольных тензорезисторов с осями решеток, параллельными оси рельса. Их расположение с нумерацией от наружной выкружки рельса приведено на рис. 4, а и рис. 5. В поперечном направлении относительно оси рельса было наклеено 4 тензорезистора, их расположение показано на рис. 4, б и рис. 6. На рис. 6 буквой «а» помечена линия, от которой отсчитывались координаты s тензорезисторов. Она представляет собой границу между изношенной и неизношенной поверхностью головки рельса.

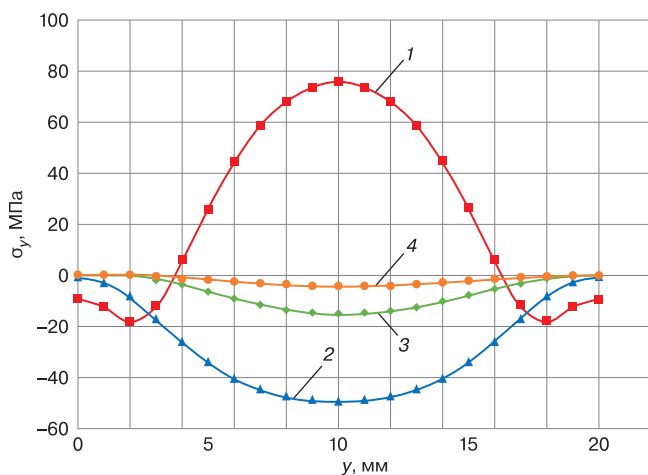


Рис. 3. Эпюры напряжений σ_y для участка наклейки тензорезисторов*

Глубина выреза: 1 — 4 мм; 2 — 6 мм; 3 — 8 мм; 4 — 10 мм

* Источник: разработан авторами

Fig. 3. Stresses σ_y distribution diagram for strain gauges gluing area*

The depths of cutouts: 1 — 4 mm; 2 — 6 mm; 3 — 8 mm; 4 — 10 mm

* Source: developed by the authors

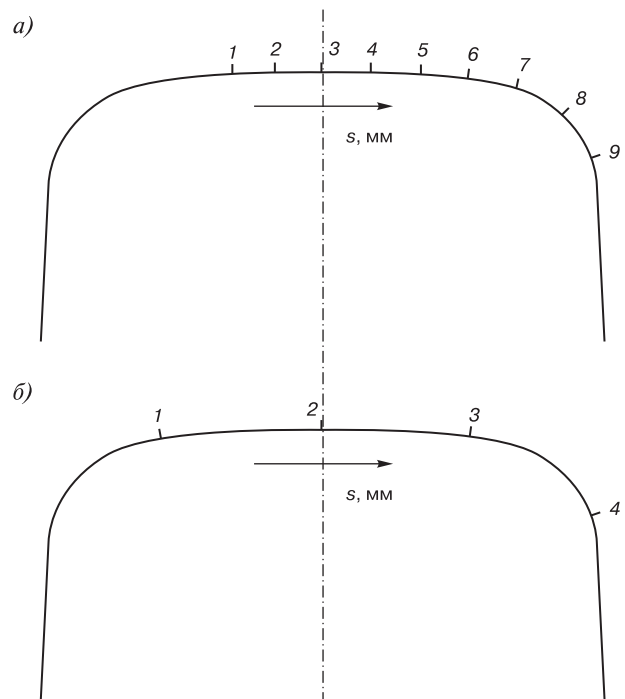


Рис. 4. Расположение тензорезисторов*:

а — продольных; б — поперечных

* Источник: разработан авторами

Fig. 4. Strain gauges position*:

а — longitudinal; б — transverse

* Source: developed by the authors

Тензорезисторы были подпаяны в полумостовые измерительные схемы и покрыты лаком ПФ 170 для защиты от охлаждающей жидкости, подаваемой при получении поперечного среза рельса. После высыхания лака были сняты показания измерительных схем A_i^0 . Для измерений использовался измеритель тензометрический цифровой ИТЦ-1 с ценой единицы светового табло $C = 10^{-6}$.

Срез с продольными тензорезисторами не выполнялся. Пропилы были выполнены на всю высоту головки рельса (рис. 5). На рис. 7 показана операция выполнения поперечного пропила в рельсе справа от продольных тензорезисторов ленточной пилой.

Измерения показаний схем с продольными тензорезисторами выполнены до осуществления поперечных пропилов (A_i^0) и после (A_i^P).

После выполнения пропилов продольные напряжения релаксировали. Этому процессу релаксации соответствует деформация тензорезистора ε_x . К ней прибавилась деформация ε_y , обусловленная остаточными напряжениями σ_{yR} , которая получила возможность реализоваться. С использованием результатов измерений определялась сумма деформаций [22]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_x + \varepsilon_y = C(A_i^P - A_i^0). \quad (5)$$



Рис. 5. Расположение продольных тензорезисторов*
* Источник: фото авторов

Fig. 5. Longitudinal strain gauges position*
* Source: authors' photo

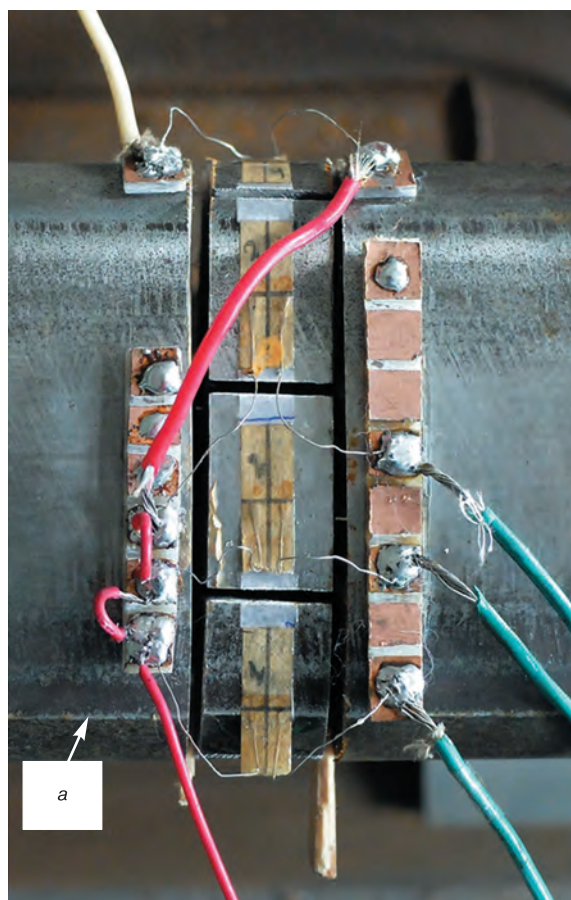


Рис. 6. Расположение поперечных тензорезисторов*
a — линия, от которой отсчитывались координаты s тензорезисторов
* Источник: фото авторов

Fig. 6. Transverse strain gauges position*
a — line from which the coordinates s of the strain gauges were measured
* Source: authors' photo



Рис. 7. Выполнение поперечного разреза рельса ленточной пилой*
* Источник: фото авторов

Fig. 7. Transverse cutting of the rail with a band saw*
* Source: authors' photo

Продольные остаточные напряжения σ_{xR} вычислены с использованием зависимости (4):

$$\sigma_{xR} = -\frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_x + \nu\epsilon_y) = -\frac{E}{1-\nu^2}\epsilon^*. \quad (6)$$

Пропилы для получения среза с поперечными тензорезисторами выполнялись до отверстия в шейке рельса. Срез был выделен из рельса (рис. 8). После этого в нем были выполнены продольные пропилы так, чтобы сохранить целостность среза.

Поперечные деформации определены с использованием зависимости

$$\epsilon_y = C(A_i^P - A_i^0), \quad (7)$$

где A_i^0 — показания измерительных схем с поперечными тензорезисторами до выполнения продольных



Рис. 8. Срез с поперечными тензорезисторами с вырезами*
* Источник: фото авторов

Fig. 8. Slice with transverse strain gauges with cutouts*
* Source: authors' photo

пропилов в срезе; A_i^P — показания измерительных схем после выполнения продольных пропилов.

Поперечные остаточные напряжения σ_{yR} вычислены с использованием зависимости (4), в которой $\varepsilon_x = (\varepsilon^* - \nu \varepsilon_y)$.

При вычислении напряжений модуль упругости материала рельса E принимался равным $2 \cdot 10^{11}$ Па, а коэффициент Пуассона ν равнялся 0,3.

Результаты. Графики изменения остаточных напряжений в зависимости от координаты s точки, отсчитываемой от линии «а» по контуру поперечного сечения рельса, показанной на рис. 6, приведены на рис. 9.

Напряжения σ_{yR} сжимающие, достигают значения -350 МПа у наружной выкружки рельса и незначительно меняются по ширине поверхности катания, снижаясь до -279 МПа вблизи внутренней выкружки. Напряжения σ_{xR} сжимающие, достигают значения -222 МПа у наружной выкружки рельса и снижаются по ширине поверхности катания до -149 МПа вблизи внутренней выкружки.

Обсуждение и заключение. Остаточные напряжения в рельсе оказывают значительное влияние на его контактно-усталостную долговечность. При изготовлении рельса в результате его правки и термического упрочнения в нем образуются остаточные технологические напряжения. Исследованиями с использованием тензометрии установлено, что на поверхности катания и в слое материала головки рельса, расположенном под поверхностью, возникают растягивающие поперечные напряжения около 50 МПа и продольные сжимающие напряжения значительной величины около -150 МПа. В процессе эксплуатации в результате пластического

деформирования материала рельса в областях контакта с колесом система остаточных напряжений претерпевает изменения. Рентгеновские методы измерения напряжений позволяют получить распределения поперечных, вертикальных и продольных эксплуатационных напряжений в поперечном сечении рельса. В подконтактном слое толщиной до 10 мм продольные и поперечные напряжения становятся сжимающими и достигают значений -300 МПа.

При применении рентгеновских методов и тензометрии используется отрезок рельса, из которого вырезаются поперечные и продольные срезы и их фрагменты. Очевидно, это затрудняет проведение исследований для рельсов с различным пропущенным тоннажем с целью установления закономерностей изменения системы остаточных напряжений. Исследования проведены в основном для рельса, находившегося в эксплуатации более 20 лет, либо на отрезке рельса, прилегающем к стыку «значительно поврежденному» или «сильно поврежденному».

В статье представлены результаты определения методом электротензометрии остаточных эксплуатационных напряжений на поверхности катания рельса Р65, находившегося в эксплуатации в главном пути, на прямолинейном участке при воздействии колес грузового подвижного состава в течение 20 лет. Распределения остаточных продольных и поперечных напряжений хорошо согласуются с результатами, полученными другими авторами с помощью рентгеновских методов, что позволяет ввести их в расчеты для оценки контактной усталости рельса, повысить достоверность получаемых результатов и приблизить к результатам, получаемым в эксплуатации.

Благодарности: авторы выражают благодарность за помощь в подготовке и проведении экспериментальных исследований доктору технических наук Хандожко Александру Владимировичу, инженеру Михайлову Николаю Николаевичу, инженеру Сергеенко Владиславу Сергеевичу.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to Alexander Vladimirovich Khandozhko, Doctor of Technical Sciences, Nikolai Nikolaevich Mikhailov, engineer, and Vladislav Sergeenkov, engineer, for their assistance in preparing and conducting experimental research.

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.

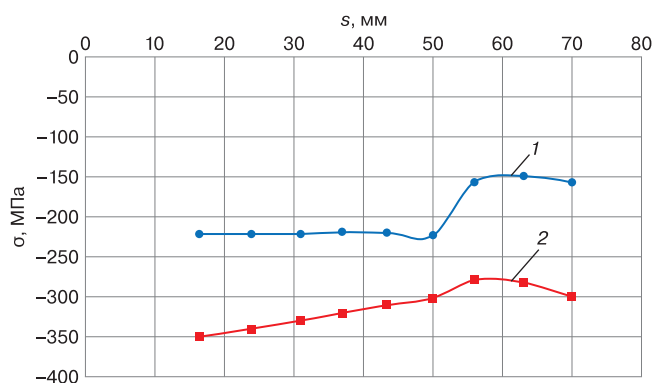


Рис. 9. Распределения остаточных эксплуатационных напряжений на поверхности катания рельса*:
1 — продольные напряжения σ_{xR} ;
2 — поперечные напряжения σ_{yR}
* Источник: разработан авторами

Fig. 9. Distribution of residual service stresses on the tread of rail*:
1 — longitudinal stresses σ_{xR} ; 2 — transverse stresses σ_{yR}
* Source: developed by the authors

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Фимкин А. И., Долотказин Д. Б. Расчетно-экспериментальный метод определения продольных остаточных напряжений в железнодорожных рельсах // Вестник Московского института инженеров ж.-д. транспорта (МИИТ). 2001. № 6. С. 28–39.
2. Fimkin A. I., Dolotkazhin D. B. Computational and experimental method for determining longitudinal residual stresses in railway rails. *Bulletin of the Moscow Institute of Railway Transport Engineers (MIIT)*. 2001;(6):28–39 (In Russ.).
3. Luzin V., Rathod C., Wexler D., Boyd P., Dhanasekar M. Residual Stresses in Rail-Ends from the in-Service Insulated Rail Joints Using Neutron Diffraction. *Materials Science Forum*. 2013;768–769:741–746. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.768-769.741>.
3. Тимошенко С. П., Гудьер Д. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 575 с.
- Timoshenko S. P., Goodyer D. Theory of Elasticity. Moscow: Nauka Publ.; 1975. 575 p. (In Russ.).
4. Takahashi Sh., Sasaki T., Kondoh Y., Hirose Y. Residual stress evaluation of railway rails. *Materials Science Forum, Residual Stresses VII: ECRS 7. Proceedings of the 7th European Conference on Residual Stresses, 13–15 September 2006, Berlin, Germany*. P. 381–386.
5. Комплексный подход к прогнозированию работоспособности и ресурса рельсов нового поколения / И. Г. Горячева [и др.] // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2017. № 5–6. С. 16–26. EDN: <https://www.elibrary.ru/ynebj>.
- Goryacheva I. G., Zakharov S. M., Kogan A. Ya., Torskaya E. V., Shur E. A., Abdurashitov A. Yu., Borts A. I., Zagranichnik K. L. Complex approach to forecasting the operability and resource of new generation rails. *Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways*. 2017;(5–6):16–26 (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/ynebj>.
6. Moazam M. A., Honaripisheh M. Residual Stresses Measurement in UIC 60 Rail by Ring-Core Method and Sectioning Technique. *AUT Journal of Mechanical Engineering*. 2018;2(1):97–104. <https://doi.org/10.22060/mej.2017.12879.5457>.
7. Skyttebol A., Josefson B. L., Ringsberg J. W. Fatigue crack growth in a welded rail under the influence of residual stresses. *Engineering Fracture Mechanics*. 2005;72:271–285. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2004.04.009>.
8. Cai Zhipeng, Nawafune Masashi, Ma Ninshu, Qu Yuebo, Cao Bin, Murakawa Hidekazu. Residual Stresses in Flash Butt Welded Rail. *Transactions of JWRI*. 2011;40(1):79–87.
9. Mortazavian E., Wang Z., Teng H. Finite element investigation of residual stresses during laser powder deposition process as an innovative technique to repair worn rails. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2022;237(1):21–32. <https://doi.org/10.1177/09544097221089410>.
10. Li Y., Chen J., Wang J., Zhao H., Chen L. Study on the residual stress distribution of railway rails. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020; 234(23):4682–4694. <https://doi.org/10.1177/0954406220927069>.
11. Žak S., Woźniak D. Controlling the State of Residual Stresses in Railway Rails by Modifying Pass Design of Straightening Rollers. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2023;68(1):57–70. <https://doi.org/10.24425/amm.2023.141473>.
12. Talamini B., Gordon J., Perlman A. B. Finite Element Estimation of the Residual Stresses in Roller-Straightened Rail. *Proceedings of the ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Rail Transportation. Anaheim, California, 13–19 November, 2004, USA*. p. 123–131. <https://doi.org/10.1115/IMECE2004-61850>.
13. Thadsoongnoen K., Hasap A., Noraphaiphaksa N., Kanchanomai C. Numerical Investigation of Residual Stress Formation Mechanisms in Flash-Butt Welded Rail. *Metals*. 2023; 13(8):1359. <https://doi.org/10.3390/met13081359>.
14. Kelleher J., Prime M. B., Buttler D., Mummery P. M., Webster P. J., Shackleton J., Withers P. J. The measurement of residual stress

in railway rails by diffraction and other methods. *Journal of Neutron Research*. 2003;11(4):187–193. <https://doi.org/10.1080/10238160410001726602>.

15. Jun T. S., Hofmann F., Belnoue J., Song X., Hofmann M., Korsunsky A. M. Triaxial residual strains in a railway rail measured by neutron diffraction. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2009;44(7):563–568. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA545>.

16. Sasaki T., Takahashi S., Kanematsu Y., Satoh Y., Iwafuchi K., Ishida M., Morii Y. Measurement of residual stresses in rails by neutron diffraction. *Wear*. 2008;265(9–10):1402–1407. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.04.047>.

17. Mortazavian E., Wang Z., Teng H. Measurement of Residual Stresses in Laser 3D Printed Train Rail using X-Ray Diffraction Technique. *Proceedings of the ASME 2021 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 2A: Advanced Manufacturing, 1–5 November, 2021*. P. 9. <https://doi.org/10.1115/IMECE2021-69822>.

18. Oliveira B. S., Rodrigues L. A. S., Costa E. S., Braga E. M., Reis M. A. L. X-ray diffraction analysis of residual stresses in the premium rails welded by flash butt process. *Soldagem & Inspeção*. 2020;25(26):1–9. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.29>.

19. Hwang Y.-I., Kim G., Kim Y.-I., Park J.-H., Choi M. Y., Kim K.-B. Experimental Measurement of Residual Stress Distribution in Rail Specimens Using Ultrasonic L_{CR} Waves. *Applied Sciences*. 2021;11(19):9306. <https://doi.org/10.3390/app11199306>.

20. Prime M. B. Cross-Sectional Mapping of Residual Stresses by Measuring the Surface Contour After a Cut. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2001;123(2):162–168. <https://doi.org/10.1115/1.1345526>.

21. Johns T. G., Sampath S. G., Bell J. C., Davies K. B. Engineering Analysis of Stresses in Railroad Rails. *U.S. Department of Transportation. FRA/ORD-81/51. Final Report*. 1981. 414 p.

22. Сакало В. И., Сакало А. В. Определение остаточных напряжений в железнодорожном рельсе методом электротензометрии // Шестой научно-технический семинар «Компьютерное моделирование на железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ», Брянск, 9–13 сентября 2024. Брянск: БГТУ, 2024. С. 78–81. EDN: <https://www.elibrary.ru/hmwulp>.

Sakalo V. I., Sakalo A. V. Determination of residual stresses in a rail by electrotensometry. In: *Sixth scientific and technical workshop “Computer simulation in railway transport: dynamics, strength, wear”, 9–13 September 2024, Bryansk*. Bryansk: BSTU; 2024. p. 78–81 (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/hmwulp>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Иванович САКАЛО,

д-р техн. наук, профессор, Брянский государственный технический университет (БГТУ, 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7), Author ID: 174319, <https://orcid.org/0009-0008-7747-581X>

Алексей Владимирович САКАЛО,

канд. техн. наук, доцент, кафедра производства и сервиса в транспортном машиностроении, Брянский государственный технический университет (БГТУ, 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7), Author ID: 556528, <https://orcid.org/0000-0002-9137-9620>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir I. SAKALO,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Bryansk State Technical University (241035, Bryansk, 7, 50th October Anni Blvd.), Author ID: 174319, <https://orcid.org/0009-0008-7747-581X>

Alexey V. SAKALO,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Production and Service in Transport Engineering, Bryansk State Technical University (241035, Bryansk, 7, 50th October Anni Blvd.), Author ID: 556528, <https://orcid.org/0000-0002-9137-9620>

ВКЛАД АВТОРОВ

Владимир Иванович САКАЛО. Обзор и анализ состояния вопроса, исследование влияния глубины вырезов вокруг тензорезистора на напряжения на расположенной между ними поверхности, подготовка и проведение экспериментальных исследований, оценка результатов, редактирование и подготовка текста статьи (50 %).

Алексей Владимирович САКАЛО. Обзор и анализ состояния вопроса, исследование влияния глубины вырезов вокруг тензорезистора на напряжения на расположенной между ними поверхности, разработка и программная реализация математических моделей, подготовка и проведение экспериментальных исследований, оценка результатов, редактирование и подготовка текста статьи (50 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vladimir I. SAKALO. Review and analysis of the state of the issue, study of the influence of the depth of cutouts around the strain gauge on the stresses on the surface located between them, preparation and implementation of experimental studies, evaluation of results, article editing and preparation (50 %).

Alexey V. SAKALO. Review and analysis of the state of the issue, study of the influence of the depth of cutouts around the strain gauge on the stresses on the surface located between them, development and software implementation of mathematical models, preparation and implementation of experimental studies, evaluation of results, article editing and preparation (50 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 10.01.2025, рецензия от первого рецензента получена 21.01.2025, рецензия от второго рецензента получена 25.02.2025, рецензия от третьего рецензента получена 27.02.2025, принята к публикации 24.04.2025.

The article was submitted 10.01.2025, first review received 21.01.2025, second review received 25.02.2025, third review received 27.02.2025, accepted for publication 24.04.2025.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 629.4.015: 629.4.027.25

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

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



Обеспечение усталостной прочности соединительных балок четырехосных тележек многоосных грузовых вагонов

Л. В. Цыганская¹, Д. Г. Бейн²✉

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Научно-внедренческий центр «Вагоны», Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Из опыта эксплуатации многоосных вагонов, имеющих в своей конструкции четырехосные тележки, известно, что большинство отказов в эксплуатации приходится на соединительные балки. Объектом исследования в статье является соединительная балка четырехосной тележки грузового вагона. Цель исследования — оценка влияния поперечной перевалки кузова вагона на срок службы соединительной балки.

Материалы и методы. Оценка амплитуд динамических напряжений выполнялась с использованием метода конечных элементов в программной среде ANSYS. Амплитуды напряжений в соединительной балке оценивались по стандартизированным режимам нагружения без учета перевалки и отдельно оценивались амплитуды напряжений от поперечной перевалки восьмиосного вагона-цистерны.

Результаты. Проведен анализ работ по исследованию прочности и нагруженности соединительных балок в эксплуатации, который показал, что основным режимом по повреждающему воздействию в эксплуатации, приводящим к разрушению соединительных балок, является поперечная перевалка кузова вагона. Выполнена оценка усталостной прочности соединительной балки с учетом перевалки кузова вагона при движении. Получены результаты сравнительного расчета срока службы соединительной балки в зависимости от учета поперечной перевалки кузова вагона на примере восьмиосного вагона-цистерны.

Обсуждение и заключение. Расчет срока службы соединительной балки восьмиосного вагона-цистерны выполнен по стандартизированным режимам нагружения с учетом и без учета поперечной перевалки кузова. Показано, что срок службы балки, оцененный без учета поперечной перевалки кузова, не соответствует статистическим и опытным данным.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: восьмиосный грузовой вагон, четырехосная тележка вагона, соединительная балка, перевалка кузова, прочность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Цыганская Л. В., Бейн Д. Г. Обеспечение усталостной прочности соединительных балок четырехосных тележек многоосных грузовых вагонов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 2. С. 104–112.

✉ dmitry.bein@nvc-vagon.ru (Д. Г. Бейн)

© Цыганская Л. В., Бейн Д. Г., 2025

Original article

UDK 629.4.015: 629.4.027.25

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

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



Ensuring fatigue strength of connecting beams of four-axle bogies of multi-axle wagons

Lyudmila V. Tsyganskaya¹, Dmitriy G. Beyn²✉

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Saint Petersburg, Russian Federation

²Scientific Research Centre «Vagony»,
Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. From the experience of operating multi-axle wagons with four-axle bogies in their design, it is known that the majority of failures in operation occur on the connecting beams. The object of the study is the connecting beam of a four-axle bogie of a wagon. The purpose of the study is to evaluate the effect of transverse transshipment of the car body on the service life of the connecting beam. Analysis of the work on the strength and load of connecting beams in operation was carried out, which shows that the main mode of damaging effects in operation, leading to the destruction of connecting beams, is the transverse transshipment of the car body.

Materials and methods. The amplitudes of dynamic stresses were estimated using the finite-element method in the ANSYS software environment. The stress amplitudes in the connecting beam were evaluated according to standardised loading modes without considering transshipment, and the stress amplitudes from the transverse transshipment of an eight-axle cistern car were separately evaluated.

Results. The fatigue strength of the connecting beam was assessed, considering the transshipment of the car body during movement. The results of comparative calculation of the service life of the connecting beam are obtained, depending on the consideration of the transverse transshipment of the car body using the example of an eight-axle cistern car.

Discussion and conclusion. The service life of the connecting beam of an eight-axle cistern car is calculated according to standardised loading modes, including and excluding the transverse transshipment of the body. The research shows that the service life of the beam, estimated without considering the transverse transshipment of the car body, does not correspond to statistical and experimental data.

KEYWORDS: eight-axle wagon, four-axle bogie, connecting beam, body transshipment, strength

FOR CITATION: Tsyganskaya L. G., Beyn D. G. Ensuring fatigue strength of connecting beams of four-axle bogies of multi-axle wagons. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(2):104–112. (In Russ.).

Введение. В настоящее время актуальным направлением в области грузового вагоностроения является создание нового восьмьюосного подвижного состава с увеличенной нагрузкой на ось до 25 тс. Такие вагоны способны значительно увеличить провозную способность железнодорожной сети. При сопоставимых условиях эксплуатации восьмьюосных вагонов по сравнению с четырехосными с нагрузкой 23,5 тс даст прирост провозной способности более чем на 30 % в год¹.

Для реализации таких проектов в первую очередь необходима разработка новой конструкции четырехосной тележки с повышенной нагрузкой на ось с учетом имеющегося опыта эксплуатации, новых требований к прочности, безопасности, динамическим характеристикам (по стандартам^{2, 3}) и нового стандарта воздействия на железнодорожный путь⁴.

Из опыта эксплуатации многоосных вагонов, имеющих в своей конструкции четырехосные тележки, известно, что большинство отказов в эксплуатации приходится на соединительные балки. Вопросами обеспечения прочности соединительных балок в конце прошлого века занимались ведущие отраслевые институты МИИТ и ВНИИЖТ [1, 2]. Специалистами указанных организаций была проделана большая работа, в частности, отметим исследование, выполненное в МИИТ в 1996 г.⁵ (далее по тексту — НИР МИИТ). В нем были определены конструктивно-технологические причины низкой надежности соединительных балок и найдены способы повышения запаса прочности.

В то же время, действующие нормативные документы по расчетной оценке прочности грузовых вагонов и их составных частей («Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм»⁶ и ГОСТ 33211-2014⁷) не учитывают отдельные результаты работ (в т.ч. работы [1, 2] и НИР МИИТ), что может привести к проектированию конструкций соединительных балок с недостаточными прочностными характеристиками.

Результаты ранее выполненных исследований. Основным несущим элементом четырехосной тележки является соединительная балка, передающая нагрузки от рамы вагона на надрессорные балки двухосных тележек. Опыт применения четырехосных тележек модели 18-101 показал, что соединительные балки, передающие нагрузку от рамы вагона на двухосные тележки, являются слабым местом конструкции: уже к восьми годам эксплуатации в них возникают трещины в зоне концевых пятников по верхним и нижним горизонтальным листам (см. НИР МИИТ).

Трещины, как правило, начинаются от места приварки верхнего листа балки к пятнику с торца балки и развиваются либо по периметру кольцевого шва, либо под углом 25...30° к продольной оси балки в тело подпятника^{2, 3}.

Основные места возникновения трещин в соединительных балках — это крайние пятники и центральная часть^{8, 9} (рис. 1).

Существовавшие на момент разработки соединительных балок методы расчета (например, «Нормы...»⁶) позволяли с достаточной точностью определять их напряженно-деформированное состояние. При этом для определения частотных параметров нагруженности соединительных балок в эксплуатации и определения основных схем нагружения потребовалось проведение большого объема экспериментальных исследований и многократных ходовых прочностных испытаний.

При проведении исследований (см. НИР МИИТ) изучались конструктивно и технологически различные конструкции соединительных балок: штамповарные с литыми пятниками с различными конструкциями концевой части крайних пятников, с кованными пятниками, балки облегченной конструкции, унифицированные штамповарные балки, балки с пятниками, выполненными механической обработкой из листовой прокатной стали.

¹ Шелкова О. Придать ускорение // Газета «Гудок». 11.01.2023. № 2. [Электронный ресурс]: URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1623993&archive=2023.01.11>

² ГОСТ 34763.1-2021. Тележки трех- и четырехосные грузовых вагонов железных дорог. Общие технические требования: утв. приказом Росстандарта от 06.10.2021 N 1063-ст. М.: ФГБУ «РСТ», 2021.

³ ГОСТ 34768-2021. Балка соединительная четырехосных тележек грузовых вагонов. Технические условия: утв. приказом Росстандарта от 06.10.2021 N 1071-ст. М.: ФГБУ «РСТ», 2021.

⁴ ГОСТ 34759-2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний: утв. приказом Росстандарта от 06.10.2021 N 1068-ст. М.: ФГБУ «РСТ», 2021.

⁵ Отчет о научно-исследовательской работе «Расчетно-теоретическое обоснование выбора базового варианта конструкции соединительной балки и его оптимизация». Тема № 1257 (ЦВ МПС), 1996. № 87/86 (МИИТ). Исполнители: Ю. Н. Аксенов, А. Ю. Богачев, С. Ю. Петров.

⁶ Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных): утв. МПС России от 22 января 1996 г. М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 319 с.

⁷ ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам (с Поправкой, с Изменением № 1): утв. приказом Росстандарта № 565-ст от 05.06.2015. Москва: Стандартинформ, 2020. 54 с.

⁸ РД ВНИИЖТ-059/01-2019. Инструкция по сварке и наплавке при ремонте грузовых вагонов: утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, протокол от 4-5 ноября 2015 г. №63.

⁹ РД 32 ЦВ 052-2009. Ремонт тележек грузовых вагонов тип 2 по ГОСТ 9246 с боковыми скользунами зазорного типа. Общее руководство по ремонту. Протокол 52 заседания Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества (с изм. и доп., утв. на 80-м заседании Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, протокол от 10.06.2024)

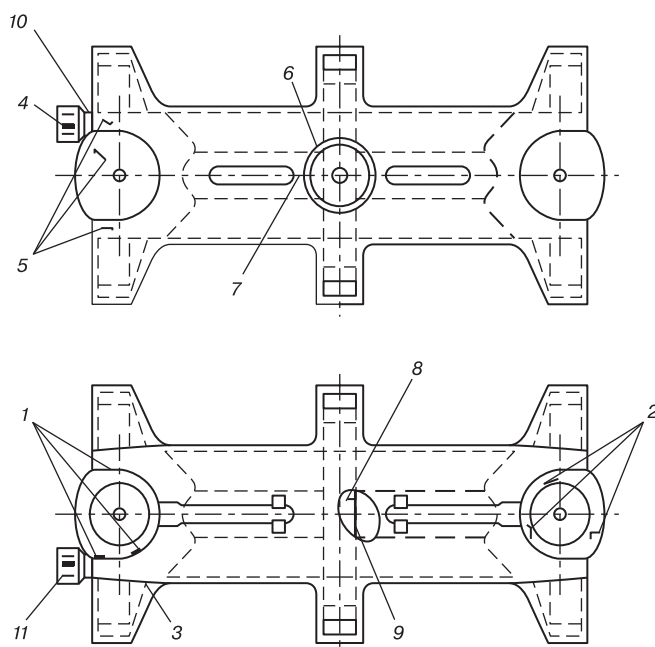


Рис. 1. Дефекты соединительной балки (трещины, изломы), которые разрешено ремонтировать при плановых видах ремонта*:

1 — трещины по зоне сварного шва приварки нижнего листа к пятниковой отливке; 2 — трещины по основному металлу с одной стороны пятниковой отливки (относительно продольной оси); 3 — трещина сварного шва, соединяющего лист нижний и подкрылок скользуна; 4 — излом кронштейна; 5 — трещины верхней части пятниковой отливки с одной стороны; 6 — трещины в зоне сварного шва приварки листа верхнего к пятниковой плите; 7 — трещина верхнего листа балки независимо от длины; 8 — трещины с нижней стороны пятниковой плиты; 9 — трещины по сварным швам приварки внутренней центральной диафрагмы; 10 — трещина сварного шва кронштейна торсиона; 11 — трещина кронштейна

* Источник: РД ВНИИЖТ-059/01-2019⁸, РД 32 ЦВ 052-2009⁹

Fig. 1. Defects in the connecting beam (cracks, kinks), which are allowed to be repaired during scheduled repairs according to*:
1 — cracks in the weld area of welding the bottom sheet to the centre pivot casting; 2 — cracks in the base metal on one side of the centre pivot casting (relative to the longitudinal axis); 3 — weld crack connecting the lower sheet and the side bearer; 4 — fracture of the bracket; 5 — cracks in the upper part of the centre pivot casting on one side; 6 — cracks in the weld area of welding the upper sheet to the centre pivot plate; 7 — crack in the upper sheet of the beam, regardless of length; 8 — cracks on the underside of the centre pivot plate; 9 — cracks on the welds of the welding of the inner central diaphragm; 10 — crack of the weld of the torsion bar bracket; 11 — crack of the bracket

* Source: РД ВНИИЖТ-059/01-2019⁸, РД 32 ЦВ 052-2009⁹

В ходе вышеуказанных многолетних исследований соединительных балок различных конструкций в работах МИИТ, ВНИИЖТ, ПГУПС были получены следующие результаты:

- при движении восьмиосных вагонов со скоростями от 5 до 22 м/с происходит постоянная перевалка кузова с частотами от 0,3 до 1,5 Гц. С увеличением

скорости движения более 22 м/с наблюдается тенденция к увеличению частоты перевалки. В зависимости от конструктивных особенностей вагонов перевалирующая частота может отличаться;

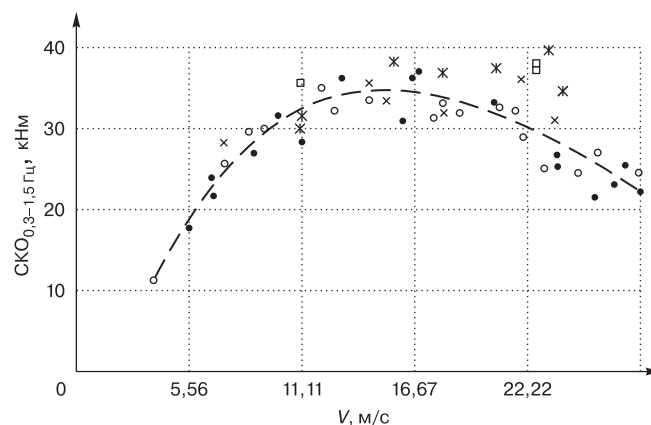
- концевые зоны соединительной балки набегающей (первой по ходу движения) четырехосной тележки всегда нагружены на 12...15% меньше противоположной. Половина соединительной балки со стороны кронштейна торсиона (без учета локального возмущения напряженно-деформированного состояния, вызванного его жесткостью), всегда нагружена на 15...25% больше противоположной половины;

- основным режимом по повреждающему воздействию, приводящим к возникновению трещин в эксплуатации в конструкции балок, является поперечная перевалка кузова вагона при движении. В зоне центрального пятника на повреждение соединительной балки также существенно влияет продольная перевалка кузова;

- были установлены зависимости поперечной перевалки кузова от скорости движения вагона и неровностей пути.

На рис. 2 приведена точечная диаграмма изменения среднеквадратичного отклонения процессов поперечной перевалки (в диапазоне частот 0,3...1,5 Гц) в зависимости от скорости движения [1].

Также исследованиями прочности соединительных балок с учетом перевалки занимались специалисты



Условные обозначения балльности пути
(conventional designations of the route grade):

• 0...50 ○ 50...100 × 100...200 □ 200...300 * 300...400

Рис. 2. Точечная диаграмма изменения среднеквадратичного отклонения процессов поперечной перевалки (в диапазоне частот 0,3...1,5 Гц) в зависимости от скорости движения*

* Источник: НИР МИИТ 1996 г.

Fig. 2. Dot diagramme of the change in the standard deviation of the transversal transshipment processes (in the frequency range 0.3...1.5 Hz) depending on the movement speed*

* Source: МИИТ research in 1996

ПГУПС [3, 4] и Иркутского государственного университета [5–7].

В работе А. А. Романовой¹⁰ отмечено, что основной причиной преждевременного выхода из строя соединительных балок в условиях Сибири и Дальнего Востока является наличие значительного количества кривых участков пути, на которых происходит боковая качка вагона, что приводит к поперечной перевалке балки и возникновению в ней трещин. При экспериментальных исследованиях по определению ресурса схема нагружения реализовалась приложением вертикальной нагрузки к центральному подпятнику и приложением динамических нагрузок от двух пневмопульсаторов, установленных с одной стороны вагона и вызывающих перевалку цистерны на пятниках. При испытаниях соединительная балка переваливалась на концевых пятниках с опиранием концевых подкрылков на наддрессорные балки тележек.

В работе [6] отмечено, что одним из наиболее важных режимов нагружения соединительной балки, оказывающим преобладающее влияние на разрушение зон крайних пятников, является поперечная перевалка (без «завала» на скользуны). При режиме нагружения, соответствующем поперечной перевалке с «завалом» на скользуны, введенные автором [6] изменения значительно улучшили работоспособность наиболее нагруженных зон соединительной балки. При дальнейших исследованиях, в работе [7] расчеты рекомендуемого автором варианта конструкции проводились при поперечной перевалке без завала и с завалом на скользуны, а также при продольной перевалке с опорой на внешние стороны пятников. При моделировании продольной перевалки, как и в работе [1], вертикальная нагрузка на подпятник и крайние пятники распределялась по их рабочей поверхности по закону квадратичной параболы вдоль продольной оси балки. Аналогично для крайних пятников был смоделирован один из наиболее жестких режимов, когда максимальная интенсивность нагрузки на пятники смещена к внешним краям балки. При сравнительном анализе показано, что для корректной оценки работоспособности балки необходим расчет главных амплитуд напряжений. Использование стандартных подходов к оценке прочности недостаточно и в отдельных случаях может приводить к некорректным результатам.

В статье [8] рассмотрены различные конструкции опорных устройств ходовых частей большегрузных восьмиосных вагонов и этапы их модернизации. В работе [9] отмечено, что разработка надежной и легкой конструкции соединительной балки играет важней-

шую роль в обеспечении лучшей динамики восьмиосных вагонов по сравнению с четырехосными.

Следует отметить, что несмотря на огромный расчетно-экспериментальный опыт, полученный при выполнении вышеперечисленных работ, действующие нормативные документы по расчетной оценке прочности грузовых вагонов и их составных частей (ГОСТ 33211-2014 и упомянутые «Нормы...») не учитывают перевалку кузова вагона при расчете соединительной балки, что может привести к проектированию конструкций балок с недостаточными прочностными характеристиками. Задача по оценке усталостной прочности соединительной балки с учетом перевалки кузова вагона при движении остается на сегодня актуальной. Данная работа посвящена исследованию влияния поперечной перевалки кузова вагона на срок службы соединительной балки.

Оценка срока службы соединительной балки. В настоящей работе проведена сравнительная оценка результатов срока службы соединительной балки по чертежу 1500.10.01.000 АО «НВЦ «Вагоны» со сроком службы 16 лет, установленным на основании ресурсных испытаний и подтвержденным опытом эксплуатации (с учетом коррозии). Влияние температурных воздействий в рамках работы не рассматривалось.

В соответствии с действующими нормативными документами оценка прочности соединительных балок выполняется по ГОСТ 33211-2014, а срок службы оценивается с учетом требований ГОСТ 34768-2021 по формуле

$$T_k = \frac{\left(\frac{\sigma_{a,N}}{[n]} \right)^m N_0}{B \cdot f_3 \cdot K_{\Pi} (1 - K_{\Pi}) \sum_{k=1}^p K_{yч k} \sum_{j=1}^q P_{v,j} \sum_{i=1}^r \sigma_{a,i}^m P_{\sigma,i}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{a,N}$ — предел выносливости по амплитуде напряжений натурной детали при установившемся режиме нагружения на базе испытаний $N_0 = 10^7$, МПа;

$[n]$ — допускаемый коэффициент запаса сопротивления усталости, принимаем $[n] = 1,6$ для расчета фактического срока службы балки;

m — показатель степени уравнения в кривой усталости в амплитудах;

B — коэффициент перевода календарного срока службы во время непрерывного движения;

N_0 — базовое число циклов (для несущих деталей $N_0 = 10^7$, МПа);

f_3 — центральная (эффективная) частота процесса;

K_{Π} — коэффициент использования грузоподъемности вагона;

¹⁰ Романова А. А. Совершенствование конструкции соединительных балок восьмиосных вагонов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Петерб. гос. ун-т путей сообщ. Санкт-Петербург, 2004. 22 с.

K_{Π} — коэффициент порожнего пробега;
 $P_{v,j}$ — доля времени (вероятность) эксплуатации в j -м интервале скоростей;
 $K_{уч k}$ — средняя доля протяженности характерных участков пути;
 $\sigma_{a,i}$ — уровень амплитуды динамических напряжений, МПа;
 $P_{\sigma,i}$ — частота (вероятность) появления амплитуд напряжений с уровнем $\sigma_{a,i}$ в i -м интервале скоростей;
 p — число характерных участков пути;
 q — принятое число разрядов скоростей движения;
 r — принятое число разрядов амплитуд напряжений в y -м интервале скоростей движения вагона.

Оценка амплитуд динамических напряжений выполнялась с использованием метода конечных элементов в программной среде ANSYS. Амплитуды напряжений в соединительной балке оценивались по стандартизированным режимам нагружения по ГОСТ 33211-2014 без учета перевалки и отдельно оценивались амплитуды напряжений от поперечной перевалки восьмиосного вагона-цистерны.

Для оценки напряжений от поперечной перевалки вагона на пятник соединительной балки нагрузка от веса кузова вагона прикладывалась в виде давления, распределенного по квадратичной зависимости, показанной на рис. 3. Нелинейный характер распределения контактного давления по поверхности пятника показан в работе НИР МИИТ. Выполненные авторами сопоставления ранее проведенных результатов испытаний соединительных балок с расчетами показали, что квадратичная зависимость нагружения пятника при расчете прочности с учетом поперечной перевалки наиболее точно отражает характер его напряженно-деформированного состояния.

Диаграмма распределения давления по пятнику показана на рис. 4.

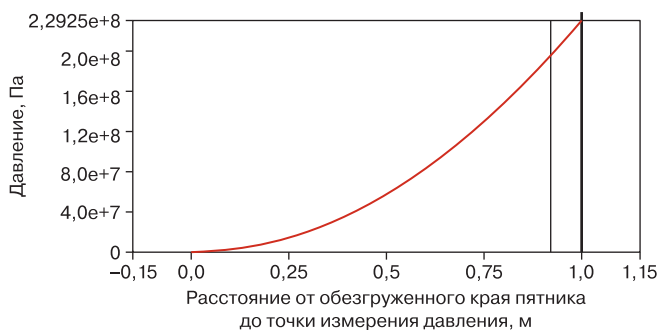


Рис. 3. График квадратичной зависимости распределения давления по пятнику*

* Источник: данные авторов

Fig. 3. Graph of the quadratic dependence of the pressure distribution on centre pivot*

* Source: authors data

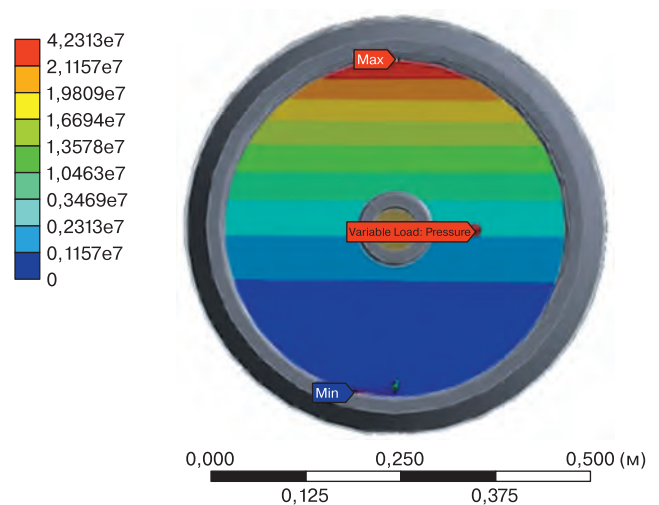


Рис. 4. Диаграмма распределения давления по пятнику*

* Источник: данные авторов

Fig. 4. Diagramme of the pressure distribution on the centre pivot*

* Source: authors data

На основании формулы (1), а также с учетом данных работы и распределений скоростей по ГОСТ 33211-2014 и приложению А ГОСТ 34768-2021 проведена оценка срока службы по формуле

$$T_k = \frac{\left(\frac{\sigma_{a,N}}{[n]} \right)^m N_0}{B \cdot f_{\text{пер}} \cdot K_{\Pi} (1 - K_{\Pi}) \sum_{k=1}^p K_{\text{уч}} \sum_{j=1}^q P_{v,j} \sum_{i=1}^r \sigma_{a,i}^m P_{\sigma,i}}, \quad (2)$$

где $f_{\text{пер}}$ — частота поперечной перевалки кузова вагона на соединительной балке, равна 1,5 Гц;

$\sigma_{a,i}^{\text{пер}}$ — уровень амплитуды динамических напряжений при поперечной перевалке, МПа.

Диаграммы распределений эквивалентных напряжений в пятнике в зависимости от учета перевалки показаны на рис. 5.

Диаграммы распределений главных напряжений в пятнике по оси, перпендикулярной направлению движения вагона в зависимости от учета перевалки, показаны на рис. 6.

Результаты расчета напряжений для консольного пятника в зависимости от учета перевалки приведены в табл. 1.

По результатам проведенных расчетов, при учете перевалки кузова, эквивалентные напряжения в консольном пятнике соединительной балки в 1,5 раза выше, а главные напряжения — в 5 раз по сравнению с результатами расчетов без учета перевалки кузова (табл. 1). Результаты сравнительного расчета срока службы консольного пятника T_k показывают, что с учетом перевалки величина срока службы снижается с 245 до 25 лет (табл. 2).

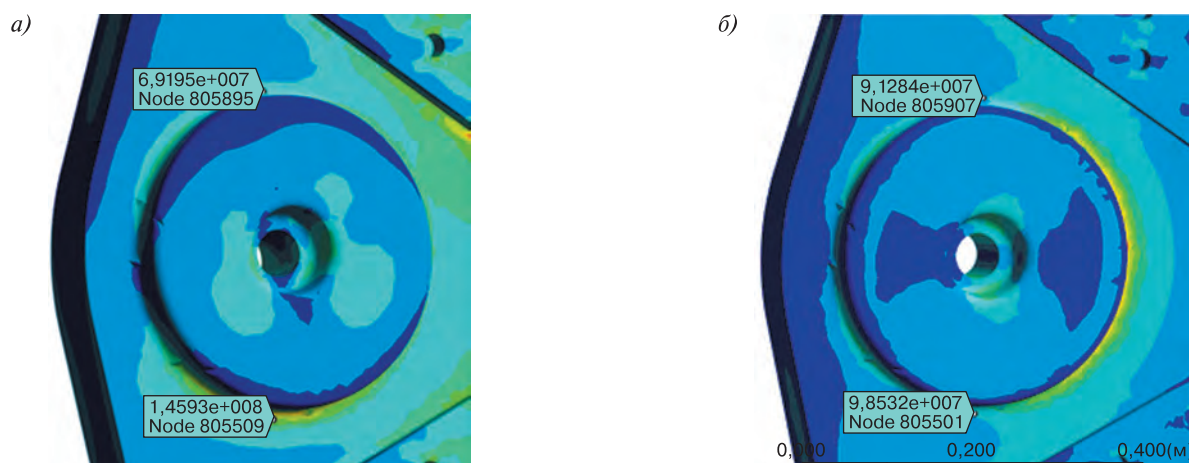


Рис. 5. Диаграммы распределений эквивалентных напряжений в пятнике*:
a — с учетом перевалки; *б* — без учета перевалки
 * Источник: данные авторов

Fig. 5. Diagrammes of equivalent stress distributions in the centre pivot*:
a — with transshipment; *б* — without transshipment
 * Source: authors data

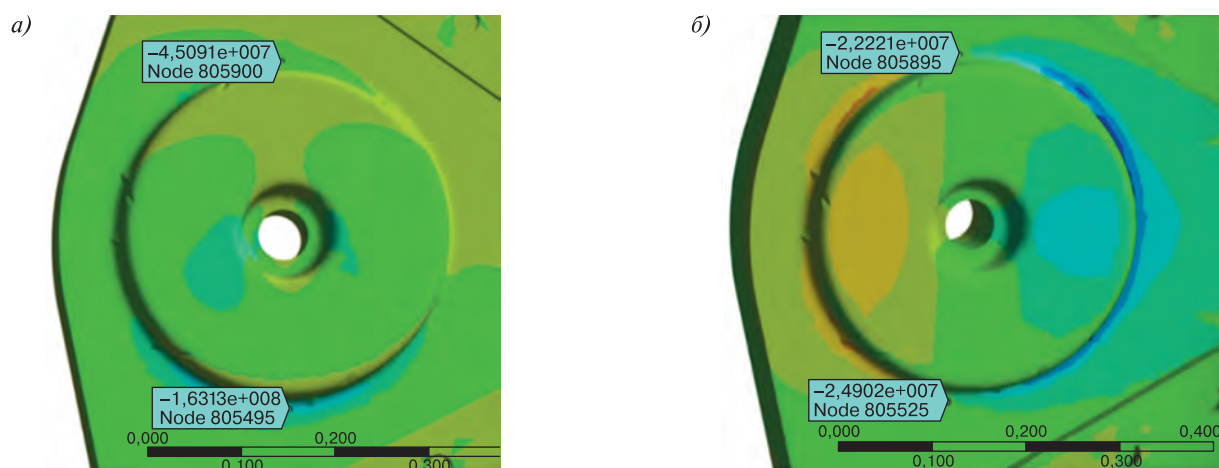


Рис. 6. Диаграммы распределений главных напряжений в пятнике по оси, перпендикулярной направлению движения вагона*:
a — с учетом перевалки; *б* — без учета перевалки
 * Источник: данные авторов

Fig. 6. Diagrammes of the distribution of the main stresses in the center pivot along the axis which is perpendicular to the direction of car movement*:
a — with transshipment; *б* — without transshipment
 * Source: authors data

Таблица 1

Результаты расчета напряжений для консольного пятника в зависимости от учета перевалки*

Table 1

Results of console centre pivot stresses calculation, depending on the accounting of transshipment*

Рассматриваемый случай	Без учета поперечной перевалки	С учетом поперечной перевалки	Расхождение с вариантом без учета поперечной перевалки, %
Эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$, МПа	98,5	145,9	+48
Главные напряжения σ_1 , МПа	24,9	163,0	+555

* Источник: данные авторов

* Source: authors data

Таблица 2
Результаты сравнительного расчета срока службы
для консольного пятника*

Table 2

Results of comparative calculation of service life for console centre pivot*

Рассматриваемый случай	$\sigma_{a,N}$, МПа	$\sigma_{a,z}$, МПа	T_k , лет
Без учета поперечной перевалки	65,25	3,97	245
С учетом поперечной перевалки	65,25	49,63	25

* Источник: данные авторов

* Source: authors data

Обсуждение и заключение. Анализ работ по исследованию прочности и нагруженности соединительных балок в эксплуатации показал, что основным режимом по повреждающему воздействию в эксплуатации, приводящим к разрушению соединительных балок, является поперечная перевалка кузова вагона.

Выполнен сравнительный расчет срока службы соединительной балки, который показал, что оценка срока службы по ГОСТ 34768-2021, не учитывающая основной разрушающий режим для соединительных балок грузовых вагонов — поперечную перевалку кузова — не соответствует экспериментальным и статистическим данным.

Возможные направления дальнейших исследований по повышению усталостной прочности соединительных балок четырехосных тележек авторы видят в применении скользящих с упругими элементами, в выборе оптимальных величин переходных радиусов балки и установке дополнительных подкрепляющих ребер, в изменении системы опирания соединительной балки на тележки.

Отдельные результаты использованы компанией РМ РЕЙЛ при разработке новых соединительных балок, при выборе технического решения соединительной балки для четырехосной тележки.

Планируется проведение полного комплекса испытаний по требованиям стандартов и дополнительных стендовых испытаний, имитирующих перевалку кузова.

Предлагается рассмотреть возможность разработки и внедрения новой методики расчета соединительных балок четырехосных тележек, учитывающей влияние поперечной перевалки кузова на ее срок службы.

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

- Аксенов Ю. Н., Богачев А. Ю., Павлов Н. В., Голышев А. И. Анализ характеристик износа пятниковых зон надрессорных и соединительных балок // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2000. № 3. С. 40–45. Aksyonov Yu. N., Aksenov Yu. N., Bogachev A. Yu., Pavlov N. V., Golyshev A. I. Analysis of wear characteristics of center plate units of bolsters and span bolsters. *Vestnik VNIIZhT*. 2000;3:40–45. (In Russ.).
- Аксенов Ю. Н., Фаерштейн Ю. О. Анализ НДС и эксплуатационной надежности сварных соединений соединительной балки четырехосной тележки // Труды МИИТ. 1986. Вып. 783. С. 71–77. Aksenov Yu. N., Fayershteyn Yu. O. Analysis of VAT and operational reliability of welded joints of the connecting beam of a four-axle trolley. *Tr. MIIT*. 1986;783:71–77. (In Russ.).
- Бороненко Ю. П. Анализ повреждаемости центральных пятников 8-осных цистерн / Ю. П. Бороненко, В. М. Бубнов, А. С. Вершинин и др. // Петербургский институт инженеров железнодорожного транспорта: сб. науч. трудов. СПб., 1993. 126 с. Boronenko Yu. P. Analysis of damageability of central pads of 8-axle tank cars. Yu. P. Boronenko, V. M. Bubnov, A. S. Vershinin et al. // *In: St. Petersburg Institute of Railway Engineers: collection of scientific papers*. St. Petersburg, 1993. 126 p. (In Russ.).
- Романова А. А. Повышение ресурса соединительной балки // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2004. № 1. С. 63–66. EDN: <https://www.elibrary.ru/lrhuqn>. Romanova A. A. Increasing the resource of the connecting beam. *Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering*. 2004;(1):63–66. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/lrhuqn>.
- Конечноэлементный анализ кинетики температурных полей и деформации при термообработке соединительной балки / А. Е. Неживляк, Ю. Н. Аксенов, М. В. Гречнева, В. Н. Матханов // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственные процессы: Сборник трудов международной конференции, Кацивели, Крым, 16–20 сентября 2002 г. Кацивели, Крым: Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 2002. С. 140–144. EDN: <https://elibrary.ru/yqkbkn>. Nezhivlyak A. E., Aksenov Yu. N., Grechneva M. V., Matkhanov V. N. Finite Element Analysis of Temperature Field Kinetics and Deformation during Heat Treatment of a Connecting Beam. In: *Mathematical Modeling and Information Technologies in Welding and Related Processes: Collection of Proceedings of the International Conference, Katsiveli, Crimea, September 16–20, 2002*. Katsiveli, Crimea: E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2002. P. 140–144. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/yqkbkn>.
- Разработка рациональной конструкции соединительных балок по результатам конечноэлементного анализа / А. Е. Неживляк, М. В. Гречнева, А. Е. Балановский, Ю. Н. Аксенов // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственные процессы: Сборник трудов Второй международной конференции, поселок Кацивели, Крым, 13–17 сентября 2004 г. Кацивели, Крым: Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 2004. С. 195–199. EDN: <https://elibrary.ru/yqcbid>. Nezhivlyak A. E., Grechneva M. V., Balanovsky A. E., Aksenov Yu. N. Development of a rational design of connecting beams based on the results of finite element analysis. In: *Mathematical modeling and information technologies in welding and related processes: Proceedings of the Second international conference, Katsiveli, Crimea, September 13–17, 2004*. Katsiveli, Crimea: E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2004. P. 195–199. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/yqcbid>.

7. Неживляк А. Е., Гречнева М. В., Неживляк Д. А. Усовершенствование конструкции соединительной балки вагона на основе метода конечных элементов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 4(52). С. 188–192. EDN: <https://www.elibrary.ru/xfecpz>.

Nezhivlyak A. E., Grechneva M. V., Nezhivlyak D. A. Improvement of the design of the connecting beam of the car based on the finite element method. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2016;4(52): 188–192. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/xfecpz>.

8. Попова Т. А. Эволюция систем опирания кузова восьмиосного вагона на ходовые части / Т. А. Попова, Г. И. Петров, В. Н. Филиппов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 1(81). С. 10–21. EDN: <https://www.elibrary.ru/egfavg>.

Popova T. A., Petrov G. I., Filippov V. N. Evolution of systems for supporting the body of an eight-axle wagon on the running gear. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2024;1(81):10–21. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/egfavg>.

9. Попова Т. А. Конструктивные особенности исполнения тележек большегрузных восьмиосных вагонов / Т. А. Попова, Г. И. Петров, Ф. Ф. Музаффаров // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: Ташкент, 17–20 апреля 2024 г.: мат. Третьей Межд. науч.-техн. конф. Ташкент: ТГТУ, 2024. С. 326–332. EDN: <https://www.elibrary.ru/ycymzi>.

Popova T. A., Petrov G. I., Muzaffarov F. F. Design features of the bogies of heavy-duty eight-axle wagons. In: *Railway rolling stock: problems, solutions, prospects: Proceedings of the Third International Scientific and Technical Conference, Tashkent, April 17–20, 2024*. Tashkent: TSTU, 2024. P. 326–332. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/ycymzi>.

10. Выбор технического решения соединительной балки для четырехосной тележки / В. С. Коршунов, Л. В. Цыганская, С. В. Буриков, Э. Р. Хамраева // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: Санкт-Петербург, 21–24 августа 2023 г.: мат. XVII Межд. науч.-техн. конф. Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2024. С. 64–65. EDN: <https://www.elibrary.ru/pwkwsd>.

Selection of a technical solution for a connecting beam for a four-axle bogie / V. S. Korshunov, L. V. Tsyganskaya, S. V. Burikov, E. R. Khamraeva. In: *Rolling stock of the 21st century: ideas, requirements, projects: Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference, St. Petersburg, August 21–24, 2023*. St. Petersburg: Emperor Alexander I Petersburg State University of Railway Engineering, 2024. P. 64–65. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/pwkwsd>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Людмила Валериевна ЦЫГАНСКАЯ,

канд. техн. наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС, 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 9), Author ID: 546427, <https://orcid.org/0009-0005-8189-9971>

Дмитрий Григорьевич БЕЙН,

канд. техн. наук, заместитель главного конструктора, АО «Научно-внедренческий центр «Вагоны» (АО «НВЦ «Вагоны», 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 22 литера М), Author ID: 741584, <https://orcid.org/0009-0007-7881-2155>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lyudmila V. TSYGANSKAYA,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Railway Cars Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (190031, Saint Petersburg, 9, Moskovsky Ave.), Author ID: 546427, <https://orcid.org/0009-0005-8189-9971>

Dmitriy G. BEYN,

Cand. Sci. (Eng.), Deputy Chief Constructor, Scientific and Innovation Centre “Vagony” (190013, Saint Petersburg, 22M, Moskovsky Ave.), Author ID: 741584, <https://orcid.org/0009-0007-7881-2155>

ВКЛАД АВТОРОВ

Людмила Валериевна ЦЫГАНСКАЯ. Постановка целей и задач исследования, общее руководство исследованием, выполнение расчетов, подготовка таблиц и рисунков с результатами расчетов, написание текста статьи (50 %)

Дмитрий Григорьевич БЕЙН. Подготовка обзора работ, написание текста статьи, редактирование текста статьи и рисунков (50 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Lyudmila V. TSYGANSKAYA. Setting research goals and objectives, general management of the research, performing calculations, preparing tables and figures with calculation results, article writing (50 %).

Dmitriy G. BEYN. Preparing article reviews, article writing, article text and drawings editing (50 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 12.03.2025, рецензия от первого рецензента получена 24.03.2025, рецензия от второго рецензента получена 24.03.2025, рецензия от третьего рецензента получена 07.04.2025, принята к публикации 11.04.2025.

The article was submitted 12.03.2025, first review received 24.03.2025, second review received 24.03.2025, third review received 07.04.2025, accepted for publication 11.04.2025.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 625.143.51

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

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



Валидация конечно-элементной модели клеммы узла промежуточного рельсового скрепления

В. О. Березин¹✉, А. В. Замуховский¹, А. А. Ефимов², А. В. Гречаник¹

¹Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
Москва, Российская Федерация

²Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта (АО «ИЦ ЖТ»),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен вопрос валидации и верификации конечно-элементной модели упругой клеммы узла промежуточного рельсового скрепления. Проведение валидации и верификации производится с целью получения модели клеммы, позволяющей с достаточной степенью точности проводить оценку напряженно-деформированного состояния клеммы для заданных случаев нагружения. Достоверные результаты расчетов существенно сокращают вероятность несоответствия показателей жесткости и прочности проектным характеристикам.

Материалы и методы. В качестве исследуемой клеммы была выбрана упругая клемма ЦП 369.102. Разработка ее конечно-элементной модели проведена с учетом реальной геометрии изделия, полученной с помощью 3D-сканирования, и упруго-пластической модели материала. При проведении верификации конечно-элементной модели проведен анализ сеточной сходимости, анализ качества конечных элементов и сравнение с результатами аналитического расчета. Валидация проводилась путем сравнения результатов натурного и виртуального экспериментов по двум параметрам: жесткость клеммы в зоне давления на концевые участки и напряжения на боковых участках клеммы. В качестве метода измерения напряжений для натурного эксперимента выбран метод тензометрии.

Результаты. Полученные результаты показали приемлемую сходимость между натурным и виртуальным экспериментами для параметра жесткости клеммы в зоне давления на концевые участки, и погрешность между натурным и виртуальным экспериментом составила 4 %, для напряжения на боковых участках клеммы — от 8,3 до 15,4 %. Данные показатели свидетельствуют о достаточной точности разработанной модели.

Обсуждение и заключение. Предложены и обсуждены возможные причины расхождения результатов по параметру напряжения. Запланированы дальнейшие исследования для повышения точности разработанной конечно-элементной модели, направленные на оценку чувствительности тензорезисторов к поперечным и касательным деформациям. Валидация конечно-элементной модели подтвердила ее пригодность для использования в инженерных расчетах при проектировании клемм, разработке на ее основании методик испытаний клемм и других научных изысканиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рельсовое скрепление, упругая клемма, тензорезистор, напряжения, верификация модели, валидация

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: 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.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 625.143.51

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

Scientific specialty: 2.9.2 Railway track, survey and design of railways



Validation of finite-element model of clamp of rail fastening system

Vadim O. Berezin¹✉, Alexander V. Zamukhovsky¹,
Andrey A. Efimov², Alexander V. Grechanik¹

¹Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

²Engineering Centre of Railway Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper discusses the validation and verification process of the finite element model (FEM) of the elastic clamp of the rail fastening system. Validation and verification are conducted to obtain clamp model that allows to sufficiently evaluate the stress-strain state of clamp condition for specified loading cases. Reliable calculation results significantly reduce the possibility of mismatch of stiffness and strength indicators with design characteristics.

Materials and methods. The elastic clamp CP 369.102 is chosen as the clamp under study. The development of its FEM is carried out considering real geometry of the product obtained by 3D scanning and the elastic-plastic model of the material. The verification of the FEM is conducted by analysing the mesh convergence, the quality of finite elements and by comparing with the results of analytical calculation. Validation involves comparison of natural and virtual experiment results for two parameters: the stiffness of the clamp in the pressure zone on the end sections and the stresses on the lateral sections of the clamp. The strain gauge method was chosen as the method for measuring stresses for the natural experiment.

Results. The obtained results showed acceptable convergence between the natural and virtual experiments for two parameters: the stiffness of the clamp in the pressure zone on the end sections and the stresses on the lateral sections of the clamp. For the first parameter, the deviation between natural and virtual experiments is 4 %, for the second — from 8.3 to 15.4 %. These indicators testify to the sufficient accuracy of the developed model.

Discussion and conclusion. Possible reasons for the discrepancy of the results for the stress parameter are proposed and discussed. Further studies are planned to improve the accuracy of the developed FEM, aimed at evaluating the sensitivity of strain gauges to transverse and tangential deformations. Validation of the FEM confirmed its suitability for use in engineering calculations for clamp design, development of clamp test methods based on it, and other scientific research.

KEYWORDS: rail fastening, elastic clamp, strain gauge, stress, verification, validation

FOR CITATION: Berezin V. O., Zamukhovsky 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.).

Введение. Одним из этапов проектирования упругих клемм является их расчет на жесткость и прочность, который может проводиться с помощью программного комплекса, реализующего метод конечных элементов (далее — МКЭ). Возможность получения достоверных результатов расчета обеспечивается, в том числе, верификацией и валидацией конечно-элементной модели (далее — КЭМ). Достоверные результаты расчетов существенно сокращают риски несоответствия характеристик реального изделия проектным характеристикам.

Примеры верификации КЭМ упругих клемм описаны в работах [1–7, 9].

Одним из примеров валидации КЭМ является работа [7], в которой измеренные деформации сравниваются с соответствующими рассчитанными в КЭМ значениями. В работах [5–6] применяется аналогичный подход к валидации конечно-элементной модели упругой клеммы.

Другим примером валидации КЭМ по деформациям является метод корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation — DIC) [8], позволяющий получать распределение поля деформаций на поверхности нагруженного объекта исследования. В [9] авторы применили данный метод для получения поля деформаций при нагружении клеммы. Еще один пример валидации упругой клеммы приведен в работе [1]. В данном случае соотнесение результатов натурального и виртуального экспериментов проводилось по параметру жесткости клеммы в зоне давления на нарельсовые участки.

В настоящей работе предложен подход к верификации и валидации КЭМ упругой клеммы, который позволяет получать достоверные результаты расчета ее упруго-прочностных характеристик. Новый подход является обобщением подходов, представленных в работах [1–7, 9] с применением дополнительных методов верификации: анализа качества сетки и подтверждения корректности выбора типа и размера конечного элемента посредством сравнения с результатами аналитического расчета.

Подход к валидации, предлагаемый авторами, в отличие от используемых в работах [1, 5, 6, 7, 9] направлен на подтверждение сходимости результатов натурального и виртуального экспериментов сразу по двум ключевым для клеммы параметрам: действующим напряжениям и жесткости. Он состоит в последовательном решении следующих задач:

- выбор параметров сравнения результатов моделирования и натурального эксперимента;
- подготовка и проведение натурального эксперимента;
- разработка КЭМ упругой клеммы, проведение ее верификации;

- проведение моделирования натурального эксперимента (виртуальный эксперимент);
- сравнение результатов натурального и виртуального экспериментов.

Выбор объекта исследования и параметров сравнения.

В качестве объекта исследования выбрана серийно используемая на сети железных дорог Российской Федерации упругая клемма ЦП 369.102. Для сравнения выбраны параметры жесткости клеммы при приложении сосредоточенных сил на ее концевые участки и напряжения на боковых участках клеммы (пересчитываются из измеренных значений выходных сигналов, полученных при проведении тензометрии). Метод тензометрии выбран как наиболее распространенный и достаточно точный для выполнения поставленной задачи.

Методика испытаний. Натурное испытание состоит в имитации статического нагружения клеммы в процессе ее затяжки в составе узла рельсового скрепления и рельса. На рис. 1 представлена соответствующая схема нагружения.

Основное допущение методики заключается в том, что участок опорной плиты, с которым контактирует нарельсовая часть клеммы, выполнен без наклона, имеющего место в реальной конструкции подошвы рельса.

Клемму устанавливают на опорную плиту испытательной машины и осуществляют трехкратное нагружение перед контрольным нагружением для проверки остаточных деформаций. Фото клеммы на испытательной машине представлено на рис. 2.

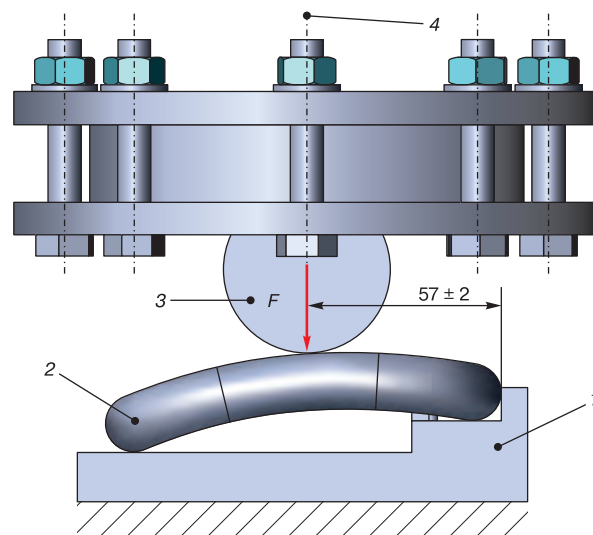


Рис. 1. Схема приложения нагрузки*:

1 — опорная плита; 2 — клемма; 3 — нагрузочное приспособление; 4 — ось штока испытательной машины; F — статическая нагрузка

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig 1. Load application scheme*:

1 — base plate; 2 — clamp; 3 — loading device; 4 — testing machine rod axis; F — static load

* Source: compiled by the authors according to research materials

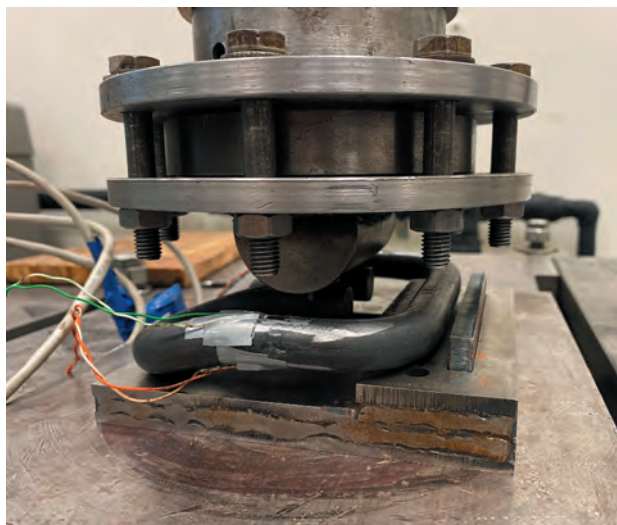


Рис. 2. Фото клеммы на испытательной машине*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 2. Photo of clamp on test machine*

* Source: compiled by the authors according to research materials

Нагружение концевых участков клеммы осуществляют через нагружающее приспособление. Нагружение клеммы производят, контролируя усилие на штоке испытательной машины, до достижения усилия, равного 25 кН. Указанное усилие, приложенное к концевым участкам клеммы (половина расстояния между точками опор на упоре и на рельсе), обеспечивает требование ГОСТ 32698-2014 к усилию монтажного прижатия рельса к шпале от двух клемм не менее 25 кН.

В эксперименте осуществляется запись усилия на штоке и перемещения штока вдоль его оси встроенными в испытательную машину датчиками. Кроме того, для экспериментального определения напряжений были использованы тензорезисторы ТКБО-5-120(12) с базой 5 мм (рис. 3). Схема наклейки представлена на рис. 4.

Положения тензорезисторов определяли на основе данных предварительного виртуального эксперимента нагружения КЭМ клеммы с учетом рекомендаций¹. При выборе мест наклейки учитывали требование к отсутствию пластических деформаций и высокому градиенту напряжений в данных областях.

На рис. 4 приведена схема наклейки тензорезисторов. Парное расположение датчиков в двух сечениях — на выпуклой части (сверху) и на вогнутой части (снизу) на боковых участках клеммы связано с необходимостью получения достаточной информации о распределении напряжений в каждом из рассмотренных сечений клеммы.



Рис. 3. Фото клеммы с наклеенными тензорезисторами (вид сверху)*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 3. Photo of clamp with glued strain gauges (top view)*

* Source: compiled by the authors according to research materials

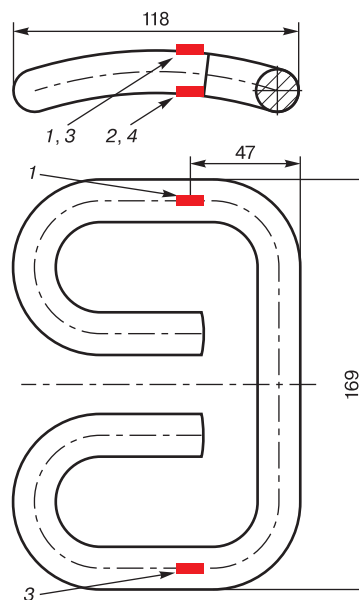


Рис. 4. Расположение тензорезисторов на клемме*:

1, 3 — тензорезисторы сверху клеммы; 2, 4 — тензорезисторы снизу клеммы

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 4. Location of strain gauges on the clamp*:

1, 3 — strain gauges on top of the clamp; 2, 4 — strain gauges on bottom of the clamp

* Source: compiled by the authors according to research materials

При проведении эксперимента для каждого тензорезистора осуществляется запись величины выходного сигнала, пропорционального деформации клеммы.

¹ Тензометрия в машиностроении. Справ. пособие / Р. А. Макаров, А. Б. Ренский, Г. Х. Боркунский, М. И. Этингоф; под ред. Р. А. Макарова. М.: Машиностроение, 1975. 287 с.

Для перевода величины выходного сигнала в значение соответствующего напряжения используется калибровочный коэффициент. В настоящей работе калибровочный коэффициент определяли с помощью стальной балки равного сопротивления в соответствии с [10].

Разработка и верификация КЭМ. В целях учета в расчетах напряженно-деформированного состояния фактической геометрии клеммы проведено 3D-сканирование выбранного экземпляра клеммы и получена ее твердотельная модель. Результат 3D-сканирования приведен на рис. 5, на поверхностях клеммы заметны следы от инструмента.

Для построения соответствующей эксперименту сборной КЭМ использовались 3D-модели клеммы, опорной плиты и нагружающего приспособления с последующим заданием их физических свойств (рис. 6).

Разработанная КЭМ учитывает следующие виды нелинейностей: геометрическую, физическую и нелинейность, обусловленную наличием контактного взаимодействия деталей. Все контактные взаимодействия учитывают трение.



Рис. 5. Результат 3D-сканирования*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 5. Result of 3D scanning*

* Source: compiled by the authors according to research materials



Рис. 6. Конечно-элементная модель клеммы, опорной плиты и нагружающего приспособления*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 6. Finite-element model of the clamp, base plate and loading device*

* Source: compiled by the authors according to research materials

Модели материалов клеммы (сталь 60С2А ГОСТ 14959-2016), опорной плиты и нагружающего приспособления (сталь 20 ГОСТ 1050-2013) упругопластические, изотропные. Физико-механические характеристики материалов приведены в табл. 1.

Конечно-элементные модели клеммы, опорной плиты и нагружающего приспособления построены с использованием гексагональных конечных элементов первого порядка. Для клеммы выбран тип элементов с точками интегрирования в узлах для более точного получения распределения напряжений на поверхности клеммы. Для ориентации модели в пространстве выбрана декартова система координат $X1$, $Y1$, $Z1$ (рис. 7).

В качестве граничных условий приложены закрепления согласно схеме на рис. 7. Обозначения $U1$, $U2$, $U3$ соответствуют поступательным степеням свободы вдоль осей $X1$, $Y1$, $Z1$, а $R1$, $R2$, $R3$ — вращательным степеням свободы вокруг осей $X1$, $Y1$, $Z1$ соответственно.

Таким образом, нижняя поверхность опорной плиты закреплена по трем поступательным степеням свободы $U1$, $U2$, $U3$ (граничное условие № 1), верхняя плоская поверхность нагружающего приспособления имеет связь с опорным узлом через кинематическую связь, передающую все степени свободы (кинематическая связь № 1), опорный узел закреплен по пяти степеням свободы $U1$, $U3$, $R1$, $R2$, $R3$ и имеет возможность перемещаться вдоль оси $Y1$ (граничное условие № 2). К опорному узлу в направлении $Y1$ приложено сосредоточенное усилие F величиной 25 кН.

Актуальные положения тензорезисторов в КЭМ клеммы согласно отсканированной 3D-модели отмечены на рис. 8 номерами 1–4.

Для выбора размера конечного элемента клеммы проведен анализ сеточной сходимости. Сеточная сходимость оценивалась как среднее значение напряжений в узлах, лежащих на оси первого тензорезистора в направлении измерения по оси тензорезистора. Результаты анализа приведены на рис. 9.

Таблица 1

Физико-механические характеристики материалов*

Table 1

Physical and mechanical characteristics of materials*

Параметр	Сталь 20 ГОСТ 14959-2016	Сталь 60С2А ГОСТ 1050-2013
Модуль упругости, МПа	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
Предел текучести, МПа	265	1575
Предел прочности, МПа	573	1750

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

* Source: compiled by the authors according to research materials

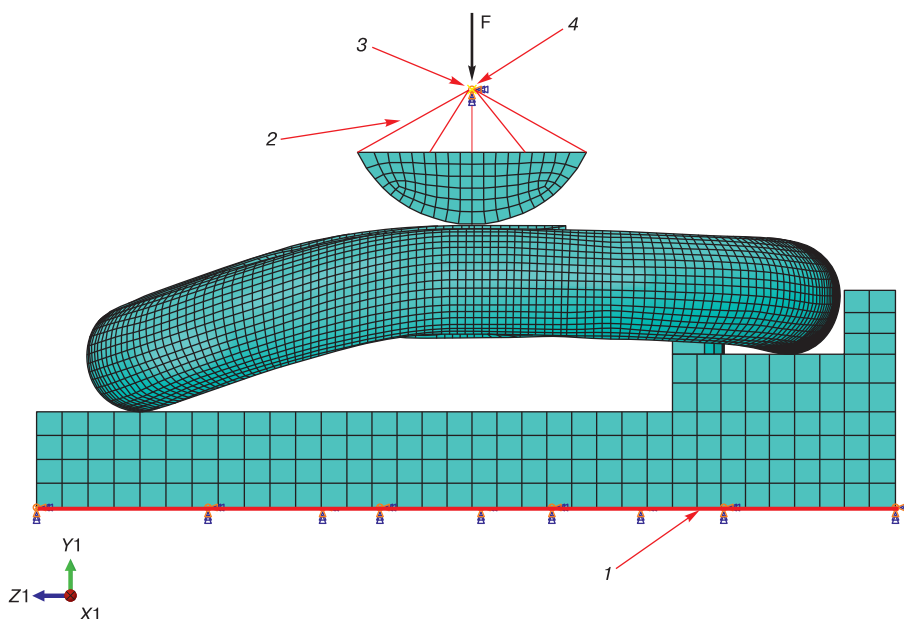


Рис. 7. Схематичное изображение граничных условий*:
 1 — граничное условие № 1; 2 — кинематическая связь № 1; 3 — граничное условие № 2; 4 — опорный узел
 * Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 7. Schematic illustration of boundary conditions*:
 1 — boundary condition No. 1; 2 — kinematic connection No. 1; 3 — boundary condition No. 2; 4 — reference node
 * Source: compiled by the authors according to research materials

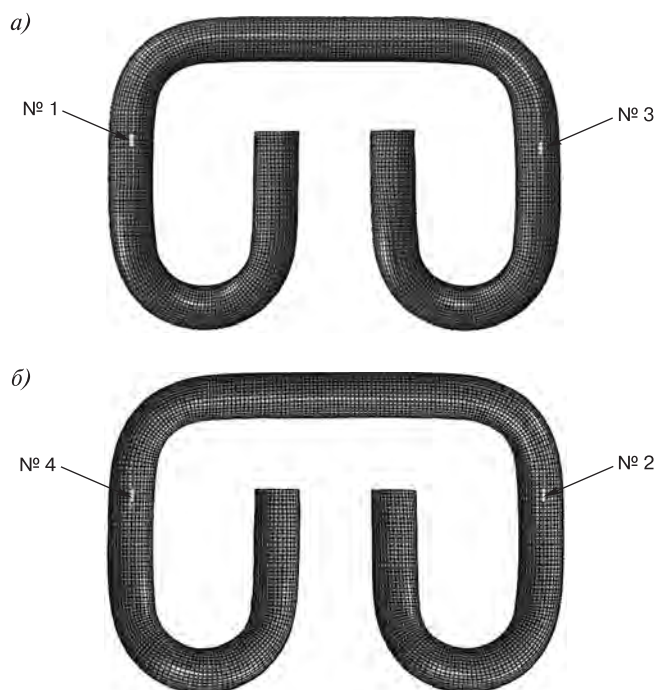


Рис. 8. Актуальные положения тензорезисторов на КЭМ клеммы*:
 а — вид сверху; б — вид снизу

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 8. Actual positions of strain gauges on the FEM of the clamp*:
 а — top view; б — bottom view

* Source: compiled by the authors according to research materials

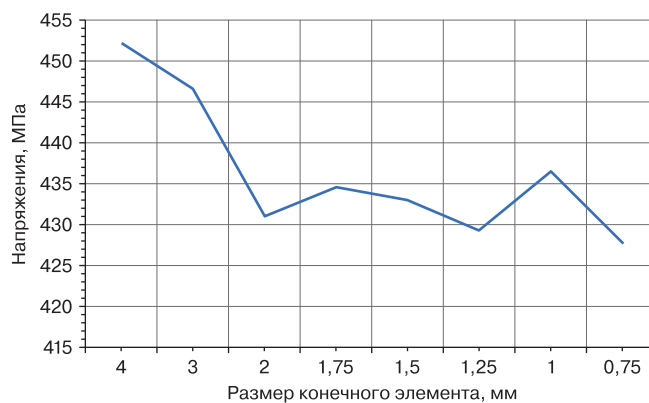


Рис. 9. График сеточной сходимости*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 9. Mesh convergence graph*

* Source: compiled by the authors according to research materials

Из результатов на рис. 9 видно, что сеточная сходимость достигается при размере конечного элемента 2 мм. Однако ширина чувствительного элемента используемого тензорезистора равна 2 мм. С учетом необходимости расположения конечных элементов симметрично относительно продольных осей тензорезисторов был выбран характерный размер конечного элемента 1 мм. При таком размере ширина элемента соответствует половине ширины чувствительной части тензорезистора.

Верификация КЭМ упругой клеммы состоит в проверке качества КЭ сетки, проверки корректности выбора типа и характерного размера конечных элементов.

В табл. 2 приведены результаты проверки качества КЭ сетки для клеммы с размером конечного элемента 1 мм.

Для проверки корректности выбора типа конечных элементов и их размера был проведен дополнительный конечно-элементный расчет балки круглого сечения диаметром 17 мм с заделкой одного конца и нагруженной сосредоточенной силой на противоположном конце. Указанная балка имеет идентичные выбранным для моделирования клеммы характеристики

Таблица 2

Результаты проверки качества конечно-элементной сетки**

Table 2

Finite element mesh quality control results**

Проверяемый параметр	Критерий	Показатель*	Среднее значение	Наихудшее значение
Минимальный угол на четырехгранных поверхностях, град	Не менее 10	0 (0 %)	78,36	50,34
Максимальный угол на четырехгранных поверхностях, град	Не более 160	0 (0 %)	102,66	149,75
Соотношение сторон	Не более 5	0 (0 %)	1,61	3,78
Максимальная длина грани, м	Нет	—	0,00125	0,00213
Минимальная длина грани, м	Нет	—	0,00079	0,00039

* Указано количество элементов, выходящих за рамки критерия, в скобках указан процент вышедших за рамки критерия элементов от количества элементов в детали

* The number of elements that exceed the criteria is indicated, the percentage of elements that exceed the criteria from the number of elements in the part is indicated in parentheses

** Источник: составлено авторами по материалам исследования

** Source: compiled by the authors according to research materials

конечных элементов. Результат сравнивался с аналитическим решением.

Расчетная схема представлена на рис. 10.

Исходные данные для проведения аналитического расчета приведены в табл. 3.

Напряжения от изгиба в рассматриваемом сечении составят:

$$\sigma = \frac{32 \cdot F_k \cdot l}{\pi \cdot D^3} = \frac{32 \cdot 2000 \text{ Н} \cdot 0,035 \text{ м}}{\pi \cdot 0,017^3 \text{ м}^3} = 145,2 \text{ МПа}, \quad (1)$$

где F_k — сила, Н; l — плечо, м; D — диаметр рассматриваемого сечения, м.

КЭМ балки с приложенными граничными условиями, аналогичными рис. 10, приведена на рис. 11.

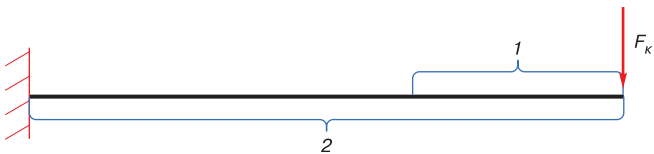


Рис. 10. Расчетная схема нагружения балки*:
1 — плечо для рассматриваемого сечения (35 мм);
2 — длина балки (100 мм)

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 10. Calculation scheme of beam loading*:
1 — lever arm for the considered section (35 mm);
2 — beam length (100 mm)

* Source: compiled by the authors according to research materials

Таблица 3

Исходные данные для аналитического расчета балки*

Table 3

Initial data for analytical calculation of the beam*

Диаметр рассматриваемого сечения D , м	Сила F_k , Н	Плечо силы для рассматриваемого сечения l , м
0,017	2000	0,035

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

* Source: compiled by the authors according to research materials

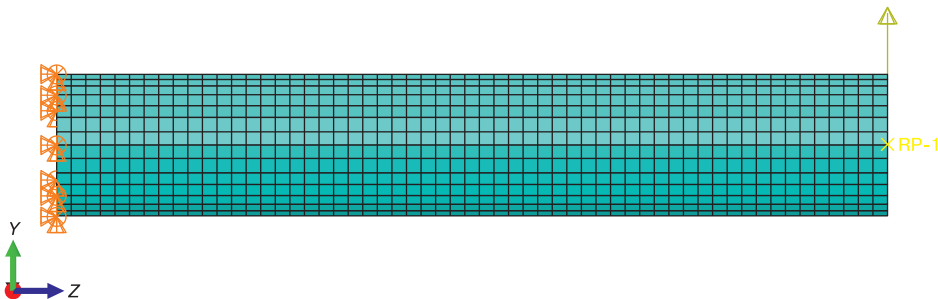


Рис. 11. Конечно-элементная модель балки с приложенными граничными условиями*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 11. Finite-element model of the beam with applied boundary conditions*

* Source: compiled by the authors according to research materials

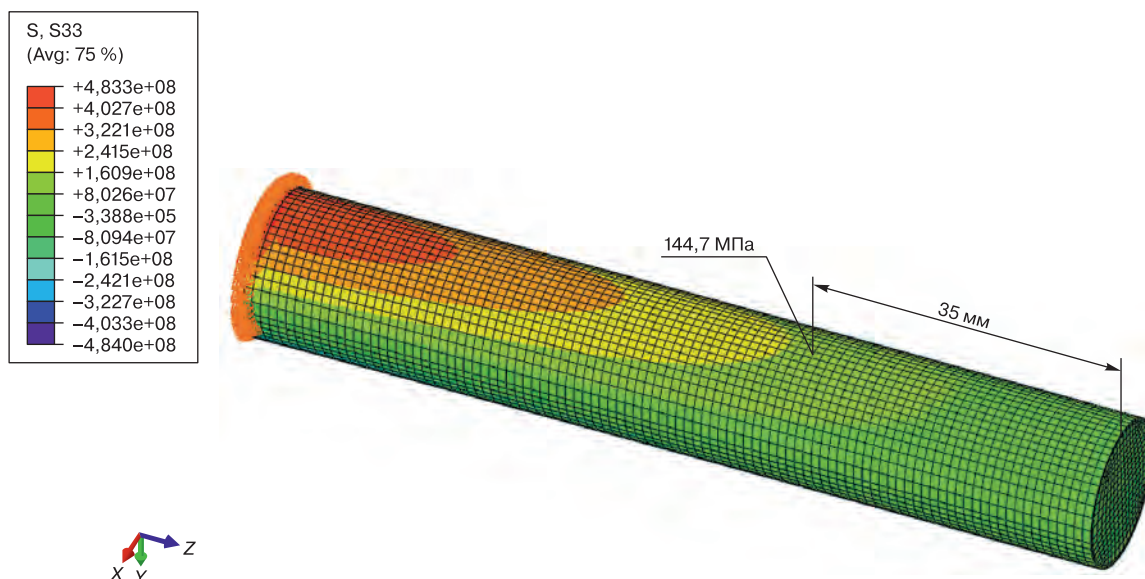


Рис. 12. Распределение напряжений в балке вдоль оси Z^*
 * Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 12. Stress distribution in the beam along the axis Z^*
 * Source: compiled by the authors according to research materials

Распределение напряжений в балке вдоль оси Z (согласно рис. 11) приведено на рис. 12.

Из рис. 12 видно, что максимальное значение напряжений в балке на расстоянии 35 мм от торцевой поверхности равно 144,7 МПа. Погрешность в сравнении с аналитическим расчетом составляет 0,34 %. Это позволяет сделать вывод о корректном выборе типа и размера конечного элемента.

Валидация КЭМ состоит в сравнении результатов натурного и виртуального экспериментов. В процессе проведения натурного эксперимента проведена запись продольного усилия на штоке испытательной машины, продольного перемещения штока и величин выходных сигналов тензорезисторов, пропорциональных их деформациям. Далее величины выходных сигналов переведены в механические напряжения с помощью калибровочного коэффициента.

При проведении виртуального эксперимента была получена зависимость усилия на имитаторе нагружающего приспособления от его перемещения в направлении оси Y_1 согласно рис. 7.

На рис. 13 приведена зависимость продольного усилия на штоке испытательной машины от перемещения штока и зависимость усилия на имитаторе нагружающего приспособления от перемещения имитатора, полученные из результатов натурного и виртуального экспериментов соответственно.

В табл. 4 приведены жесткости клеммы в зоне давления на концевые участки для натурного и виртуального экспериментов. Жесткость клеммы для

натурного и виртуального экспериментов определялась по следующей формуле:

$$C = \frac{F_{25} - F_{20}}{z_{25} - z_{20}}, \quad (2)$$

где F_{25} — усилие на штоке/имитаторе, составило 25 кН;
 F_{20} — усилие на штоке/имитаторе, составило 20 кН;
 z_{25} — перемещение штока/имитатора при усилии 25 кН, мм;
 z_{20} — перемещение штока/имитатора при усилии 20 кН, мм.

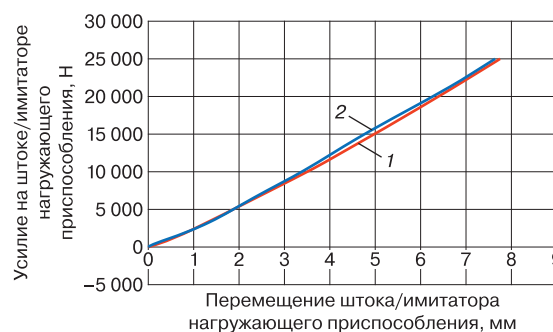


Рис. 13. Зависимость усилия от перемещения для натурного и виртуального экспериментов*:
 1 — зависимость для натурного эксперимента;
 2 — зависимость для виртуального эксперимента

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 13. Force-displacement dependence for natural and virtual experiments*
 1 — dependence for natural experiment;
 2 — dependence for virtual experiment

* Source: compiled by the authors according to research materials

Таблица 4

Жесткости клемм для натурального и виртуального экспериментов*

Table 4

Clamp stiffness for natural and virtual experiments*

Жесткость при натурном эксперименте, кН/мм	Жесткость при виртуальном эксперименте, кН/мм	Погрешность, %
4,10	3,94	4,0

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

* Source: compiled by the authors according to research materials

Из данных рис. 13 и табл. 4 видно, что результаты виртуального и натурального экспериментов по параметру жесткости клеммы в зоне давления на концевые участки совпадают с погрешностью 4%, т.е. они показали удовлетворительную сходимость.

Были рассчитаны значения механических напряжений в местах фактического расположения тензорезисторов. Вывод расчетных напряжений осуществлялся в узлах, расположенных на внешней поверхности клеммы и находящихся внутри габаритов чувствительной части каждого из наклеенных тензорезисторов, после чего значения в указанных узлах усреднялись. Направления вывода рассчитанных напряжений соответствуют направлениям измерений тензорезисторов.

Таблица 5

Напряжения в датчиках для натурального и виртуального экспериментов*

Table 5

Stresses in sensors for natural and virtual experiments*

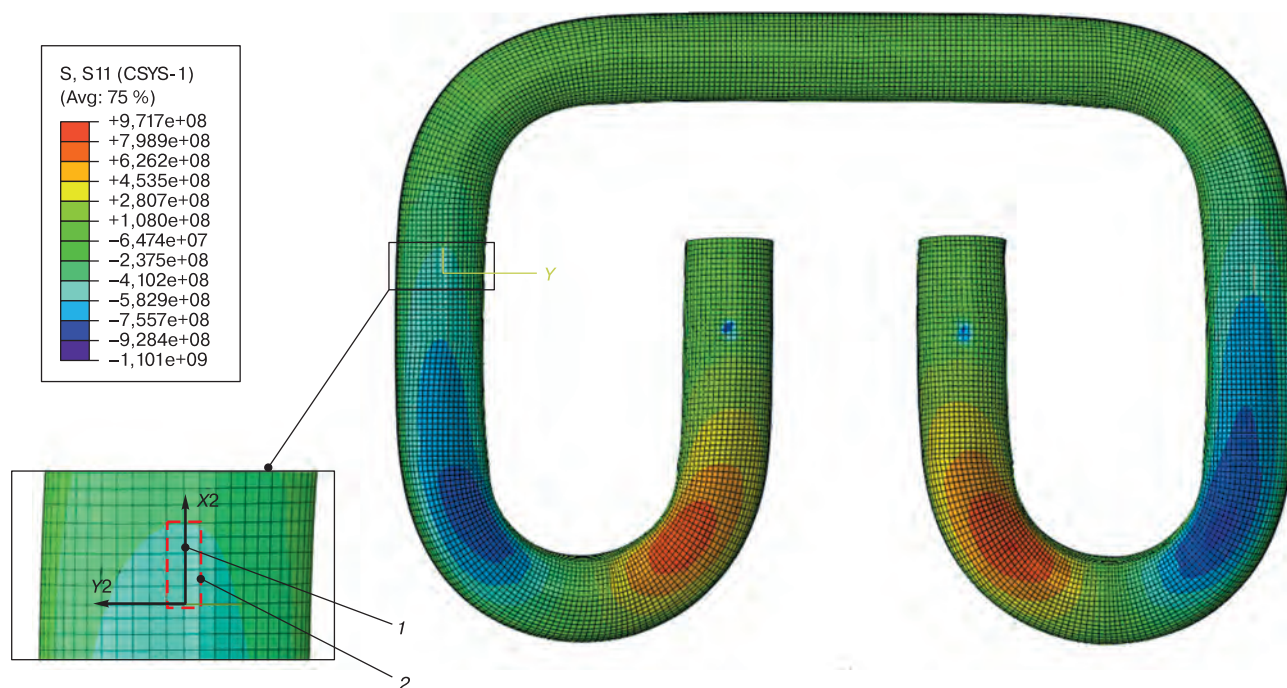
Тензорезистор, №	Напряжение (натурный эксперимент), МПа	Напряжение (виртуальный эксперимент), МПа	Погрешность, %
1	367,6	434,6	15,4
2	363,6	415,8	12,5
3	467,0	542,1	13,8
4	483,2	527,2	8,3

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

* Source: compiled by the authors according to research materials

В табл. 5 приведены напряжения для каждого из четырех тензорезисторов при натурном и виртуальном экспериментах.

Пример распределения напряжений в клемме в направлении измерения первого тензорезистора с указанием зоны его чувствительного элемента приведен на рис. 14 (ось X_2 соответствует направлению измерений, ось Y_2 перпендикулярна направлению измерений).

Рис. 14. Распределение напряжений в клемме в направлении оси X_2 первого тензорезистора (вид сверху)*:

1 — направление измерений тензорезистора; 2 — зона чувствительного элемента тензорезистора

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 14. Stress distribution in the clamp in the direction of axis X_2 of the first strain gauge (top view)*:

1 — strain gauge measurement direction; 2 — strain gauge sensing grid area

* Source: compiled by the authors according to research materials

Из табл. 5 видно, что правый боковой участок клеммы (тензорезисторы № 3 и № 4) является более нагруженным, чем левый боковой участок (тензорезисторы № 1 и № 2). Это можно объяснить неплоскостностью клеммы, возникающей в процессе ее производства.

Данные табл. 5 показывают, что сходимость между результатами виртуального и натурального экспериментов по параметру действующих напряжений является удовлетворительной. Погрешности (от 8,3 до 15,4%) могут быть связаны с недостаточной точностью задания положений осей тензорезисторов в КЭМ клеммы. В табл. 6 приведена зависимость среднего напряжения в зоне чувствительного элемента от угла наклона тензорезистора относительно базового положения для тензорезистора № 1.

Из табл. 6 видно, что положение оси тензорезистора в КЭМ клеммы существенно влияет на результат.

На результат натурального эксперимента могли повлиять погрешности, вносимые тензорезисторами и измерительно-вычислительным комплексом с модулем для работы с тензометрическими датчиками, а также погрешность определения калибровочного коэффициента для тензорезисторов. Сумма указанных погрешностей не превышает 3%.

Помимо перечисленного выше, на сходимость может влиять криволинейность поверхности в местах наклейки тензорезисторов на клемме.

Кроме того, на результат натурального эксперимента могла повлиять чувствительность тензорезисторов к поперечным деформациям², а также к касательным деформациям [11] в зоне их наклейки при проведении натурального эксперимента.

На рис. 15 приведено распределение напряжений в поперечном направлении (в направлении оси Y2) относительно направления измерений первого тензорезистора. В зоне положения тензорезистора № 1 среднее значение поперечных напряжений составляет 20 МПа.

На рис. 16 приведено распределение касательных напряжений относительно оси первого тензорезистора. Среднее значение действующих касательных напряжений в зоне положения тензорезистора № 1 в плоскости X2Y2 составляет 420,5 МПа.

Ввиду отсутствия информации от производителя о коэффициенте чувствительности тензорезисторов к поперечным и касательным деформациям, оценить их влияние на показания в направлении измерений не представляется возможным.

Описанный подход к верификации и валидации КЭМ упругой клеммы позволяет получать достаточно достоверные результаты расчетов на упруго-прочностные характеристики.

Результаты исследования могут быть учтены при:

- проектировании новых упругих клемм узлов промежуточных рельсовых скреплений в части оценки достоверности результатов расчетного обоснования прочности;
- разработке экспериментальных методик, позволяющих сформулировать требования к изделию, направленные на повышение его эксплуатационной надежности;
- дальнейших научных изысканиях.

Для учета возможного влияния чувствительности тензорезисторов к поперечным и касательным деформациям запланировано проведение дополнительного исследования, направленного на оценку чувствительности используемых тензорезисторов к поперечным и касательным деформациям.

Заключение. В результате проведения исследования выбраны параметры для сравнения результатов натурального и виртуального экспериментов, подготовлен и проведен натуральный эксперимент, разработана и верифицирована конечно-элементная модель упругой клеммы, проведен виртуальный эксперимент, а также проведено сравнение полученных результатов для виртуального и натурального экспериментов.

Таблица 6

Напряжения для натурального и виртуального экспериментов для тензорезистора № 1 в зависимости от изменения направления измерений*

Table 6

Mechanical stresses for natural and virtual experiments for strain gauge No. 1 depending on the change in the direction of measurements*

Напряжения (натурный эксперимент), МПа	Напряжения (виртуальный эксперимент), МПа				
	Смещение положения оси датчика на +2°	Смещение положения оси датчика на +1°	Актуальное положение оси датчика	Смещение положения оси датчика на -1°	Смещение положения оси датчика на -2°
367,6	404,7	419,7	434,6	449,3	463,4
Погрешность, %	9,2	12,4	15,4	18,2	20,7

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

* Source: compiled by the authors according to research materials

² Там же.

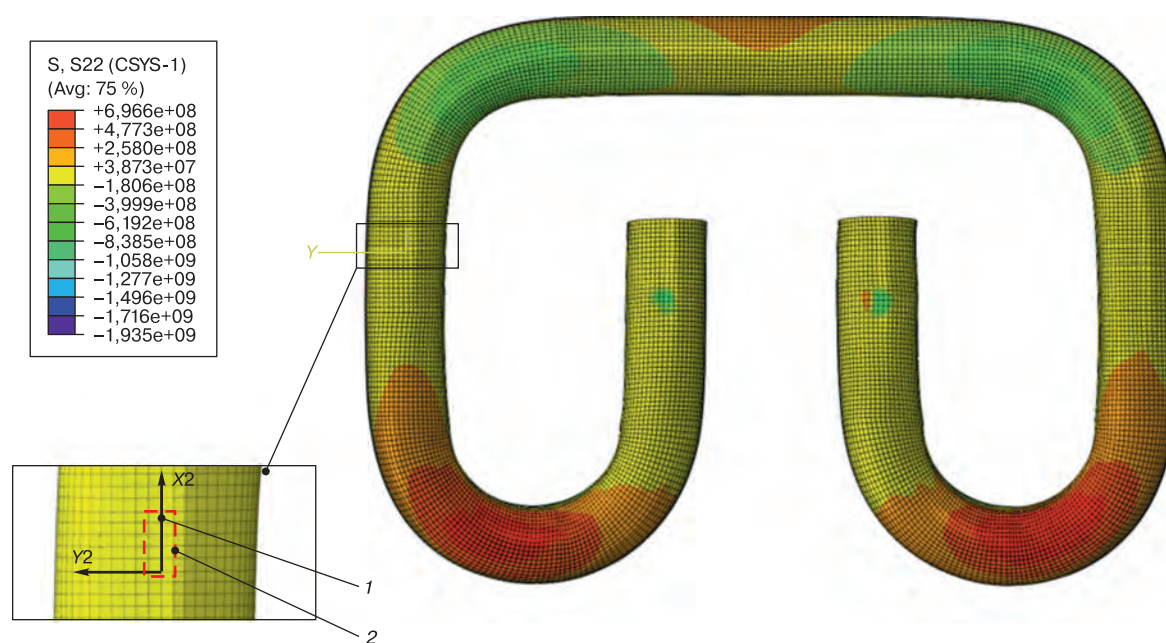


Рис. 15. Распределение напряжений в клемме в направлении оси Y2 первого тензорезистора (вид сверху), Па*:
1 — направление измерений тензорезистора; 2 — зона чувствительного элемента тензорезистора

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 15. Stress distribution in the clamp in the direction of axis Y2 of the first strain gauge (top view)*:

1 — strain gauge measurement direction; 2 — strain gauge sensing grid area

* Source: compiled by the authors according to research materials

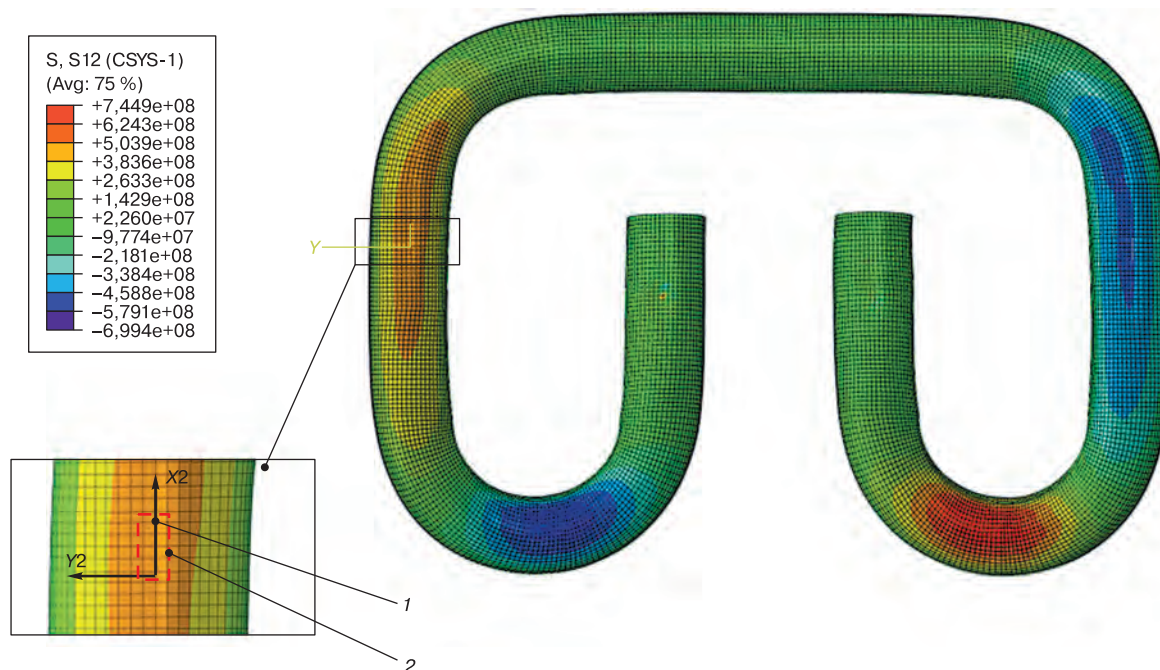


Рис. 16. Распределение касательных напряжений в клемме в плоскости X2Y2 первого тензорезистора (вид сверху)*:
1 — направление измерений тензорезистора; 2 — зона чувствительного элемента тензорезистора

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 16. Distribution of tangential stresses in the clamp in the plane X2Y2 of the first strain gauge (top view)*:

1 — strain gauge measurement direction; 2 — strain gauge sensing grid area

* Source: compiled by the authors according to research materials

При натурном и виртуальном экспериментах жесткости клеммы составили 4,10 кН/мм и 3,94 кН/мм соответственно. Погрешность результатов составила 4 %. Указанный уровень сходимости является приемлемым.

По параметру «напряжения» наилучшая сходимость между натурной и виртуальной моделью получена для тензорезистора № 4. Напряжения при натурном и виртуальном эксперименте составили 483,2 МПа и 527,2 МПа соответственно. Погрешность результатов составила 8,3 %. Наихудшая сходимость получена для тензорезистора № 1 (натурный эксперимент — 367,6 МПа, виртуальный эксперимент — 434,5 МПа, погрешность — 15,4 %). Погрешности результатов для тензорезисторов № 2 и № 3 составили 12,5 и 13,8 % соответственно.

Выдвинута гипотеза, что такие погрешности по параметру напряжений могут быть связаны:

- с недостаточно точным соответствием направления вывода рассчитанного в КЭМ напряжения и фактического направления наклейки тензорезистора;
- с влиянием чувствительности выбранных тензорезисторов к поперечным и касательным деформациям (требует дополнительных экспериментальных исследований);
- с криволинейной поверхностью клеммы в местах наклейки тензорезисторов.

Благодарности: коллектив авторов исследования выражает благодарность генеральному директору компании ООО «Сфера Альянс» Александру Владимировичу Попову за технологическую поддержку проведения исследования.

Acknowledgements: the team of authors expresses gratitude to the General Director of LLC "Sphere Alliance" Alexander V. Popov for the technological support of the study.

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.

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. Ferreño D., Casado J.A., Carrascal I.A., Diego S., Ruiz E., Saiz M., Sainz-Aja J.A., Cimentada A.I. Experimental and finite element fatigue assessment of the spring clip of the SKL-1 railway fastening system. *Engineering Structures*. 2019;118:553–563. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.053>.
2. Hong X., Xiao G., Haoyu W., Xing L., Sixing W. 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):1–12. <https://doi.org/10.1177/1687814018767249>.

3. Hong X., Jia-Bin W., Yan-Rong Z. The fractures of e-type fastening clips used in the subway: Theory and experiment. *Engineering Failure Analysis*. 2017;81:57–68. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.07.006>.
4. Hasap A., Paitekul P., Noraphaiphapaksa N., Kanchanomai C. Analysis of the fatigue performance of elastic rail clip. *Engineering Failure Analysis*. 2018;92:195–204. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.05.013>.
5. Park Y.C., An C., Sim H.B., et al. 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>.
6. Hasap A., Noraphaiphapaksa N., Kanchanomai C. Influence of malposition on the performance of elastic rail clip: Toe load, stress, and friction. *Structures*. 2020;28:2661–2670. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.073>.
7. Chen Z., Shin M., Wei S., Andrawes B., Kuchma A.D. Finite element modeling and validation of the fastening systems and concrete sleepers used in North America. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2014;228(6):590–602. <https://doi.org/10.1177/0954409714529558>.
8. Любути́н П. С., Панин С. В., Титков В. В., Еремин А. В., Сундер Р. Развитие метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов деформации и разрушения конструкционных материалов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2019. № 1. С. 87–107. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.1.08>.
- Lyubutin P.S., Panin S.V., Titkov V.V., Yeregin A.V., Sunder R. Development of digital image correlation method to study deformation and fracture processes of structural materials. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019;(1): 87–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.1.08>.
9. Liu Y., Jiang X., Li Q., Liu H. Failure analysis and fatigue life prediction of high-speed rail clips based on DIC technique. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021;13(12):1–13. <https://doi.org/10.1177/16878140211066225>.
10. Кузубов А. С., Бушуев Д. А., Парашук Е. М. Построение и валидация конечно-элементной виртуальной модели балки равного сопротивления весоизмерительной системы // Научные ведомости Белгородского Государственного Университета. 2019. № 3 (2). С. 274–282. <https://doi.org/10.18413/2411-3808-2019-46-2-274-282>.
- Kuzubov A.S., Bushuev D.A., Parashchuk E.M. Construction and validation of the finite element virtual model of the beam of equal resistance of the weight measurement system. *Belgorod State University Scientific Bulletin*. 2019;46(2):274–282. (In Russ.). <https://doi.org/10.18413/2411-3808-2019-46-2-274-282>.
11. Волков А. Д., Евтухович А. С., Моисеенко А. С., Соби́ров Б. М., Цамалаидзе З., Цверева Н. Влияние внутреннего давления на натяжение в сварных строу трекового детектора // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6, № 1. С. 83–90. EDN: <https://www.elibrary.ru/yrsngn>.
- Volkov A.D., Evtoukhovich P.G., Moiseenko A.S., Sabirov B.M., Tsamalaide Z., Tsvetava N. Influence of internal pressure on stress of welded straws of track detectors. *Advances in Applied Physics*. 2018;6(1): 83–90. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/yrsngn>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вадим Олегович БЕРЕЗИН,

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

Александр Владимирович ЗАМУХОВСКИЙ,

канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство», Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 825248, <https://orcid.org/0000-0001-5900-7942>

Андрей Александрович ЕФИМОВ,

ведущий эксперт, группа моделирования и расчетов, Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта (ИЦ ЖТ, 121205, г. Москва, инновационный центр Сколково, Большой б-п., д. 40), <https://orcid.org/0009-0004-7722-7032>

Александр Викторович ГРЕЧАНИК,

канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория «Путеиспытательная», Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ)), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 1057381, <https://orcid.org/0009-0005-8678-2991>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vadim O. BEREZIN,

Postgraduate Student, Track and track facilities Department, Russian University of Transport (127994, Moscow, bldg. 9, 9, Obraztsova St.), <https://orcid.org/0009-0008-1831-6093>

Alexander V. ZAMUKHOVSKY,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Track and track facilities Department, Russian University of Transport (127994, Moscow, bldg. 9, 9, Obraztsova St.), Author ID: 825248, <https://orcid.org/0000-0001-5900-7942>

Andrey A. EFIMOV,

Leading Expert, Modeling and Calculation Group, JSC «Engineering Center of Railway Transport» (121205, Moscow, Skolkovo Innovation Centre, 40, Bolshoi Blvd.), <https://orcid.org/0009-0004-7722-7032>

Alexander V. GRECHANIK,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher, Track Testing Research Laboratory, Russian University of Transport (127994, Moscow, bldg. 9, 9, Obraztsova St.), Author ID: 1057381, <https://orcid.org/0009-0005-8678-2991>

ВКЛАД АВТОРОВ

Вадим Олегович БЕРЕЗИН. Постановка целей и задач исследования, проведение натурного эксперимента, проведение расчетов, анализ результатов, написание текста статьи (60 %).

Александр Владимирович ЗАМУХОВСКИЙ. Постановка целей и задач исследования, общее руководство исследованием, проведение натурного эксперимента, редактирование текста статьи (15 %).

Андрей Александрович ЕФИМОВ. Постановка целей и задач исследования, консультирование при проведении расчетов, анализ результатов, написание текста статьи, редактирование текста статьи (15 %).

Александр Викторович ГРЕЧАНИК. Постановка целей и задач исследования, подготовка к проведению натурного эксперимента, проведение натурного эксперимента, редактирование текста статьи (10 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vadim O. BEREZIN. Setting research goals and objectives, conducting field experiments, carrying out calculations, results analysis, article writing (60 %).

Alexander V. ZAMUKHOVSKY. Setting research goals and objectives, general management of the research, conducting field experiments, article editing (15 %).

Andrey A. EFIMOV. Setting research goals and objectives, consulting on calculations, results analysis, article writing and editing (15 %).

Alexander V. GRECHANIK. Setting research goals and objectives, preparation for the field experiment, conducting field experiment, article editing (10 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

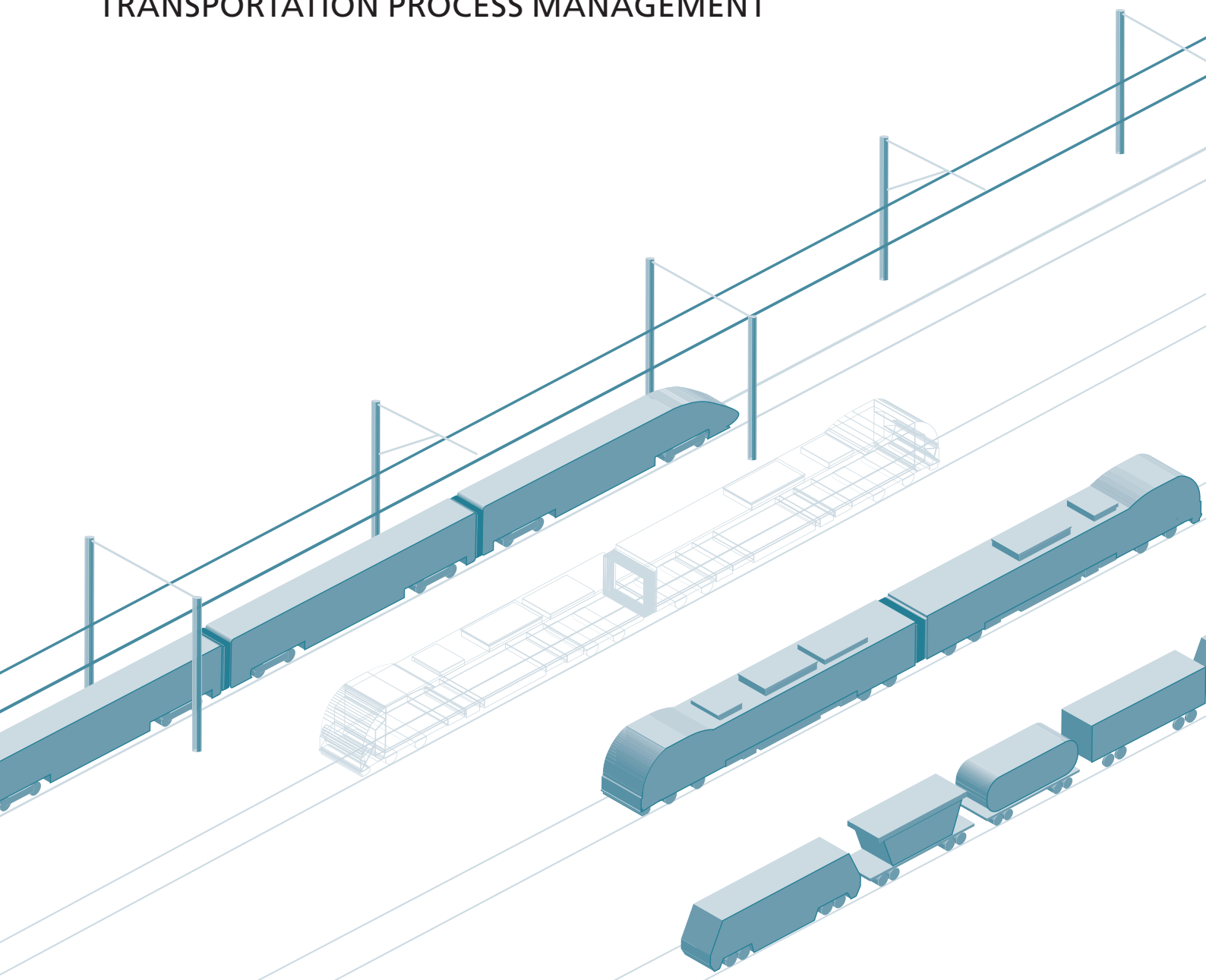
The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 27.01.2025, рецензия от первого рецензента получена 04.02.2025, рецензия от второго рецензента получена 06.02.2025, рецензия от третьего рецензента получена 24.04.2025, рецензия от четвертого рецензента получена 25.04.2025, принята к публикации 02.06.2025.

The article was submitted 27.01.2025, first review received 04.02.2025, second review received 06.02.2025, third review received 24.04.2025, fourth review received 25.04.2025, accepted for publication 02.06.2025.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT



УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК

Оригинальная научная статья

УДК 656.022.5

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

Научная специальность: 2.9.4. Управление процессами перевозок



Расчет показателей дублируемости маршрутной сети на полигоне транспортного обслуживания пассажиров

М. А. Килоличцкая✉

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ),
Гомель, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Современные транспортные системы региональных (пригородных) перевозок пассажиров сталкиваются с проблемой избыточного дублирования маршрутов между железнодорожным и автомобильным транспортом, что приводит к нерациональному использованию ресурсов, росту эксплуатационных затрат и снижению качества обслуживания населения. Актуальность исследования показателей дублируемости маршрутной сети обусловлена необходимостью оптимизации транспортной инфраструктуры, минимизации пересечений маршрутов и повышения эффективности распределения пассажиропотоков. При этом дублируемость маршрутов не является исключительно негативным явлением, так как в определенных случаях способствует повышению транспортной доступности и гибкости передвижения пассажиров.

Материалы и методы. Разработана методика расчета показателей дублируемости маршрутной сети железнодорожного и автомобильного транспорта на полигоне транспортного обслуживания пассажиров районного подчинения. Использованы статистические данные Белорусской железной дороги по объему и структуре перевезенных пассажиров железнодорожным транспортом по видам сообщений, а также количество отправленных пассажиров со станций по маршрутам курсирования; данные от операторов автомобильных перевозок пассажиров и автомобильных перевозчиков по маршрутам и рейсам, относящимся к анализируемому полигону. Для оценки дублируемости маршрутов перевозки пассажиров ключевыми показателями выбраны коэффициент пересечения маршрутов, показатель конкуренции провозных возможностей и эффективность распределения пассажиропотоков.

Результаты. Анализ дублируемости маршрутной сети на полигоне выявил высокий уровень пересечения маршрутов железнодорожного и автомобильного транспорта на участках Минск — Осиповичи и Осиповичи — Гродзянка. Интегральный показатель дублируемости варьируется от 0,01 до 1,04 и от 0,55 до 5,52 соответственно, указывая на различную степень конкуренции и взаимодополнения видов транспорта. Предложены оптимизационные меры по сокращению частоты движения железнодорожных маршрутов с перераспределением пассажиропотоков на автомобильный транспорт, что снижает эксплуатационные затраты и повышает эффективность распределения ресурсов.

Обсуждение и заключение. Разработка комплексного подхода к расчету дублируемости маршрутной сети на региональном уровне не только оптимизирует использование инфраструктуры, но и способствует устойчивому развитию транспортных систем, что соответствует целям повышения доступности и эффективности пассажирских перевозок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный транспорт, автомобильный транспорт, маршрутная сеть, маршрут перевозки, дублируемость маршрутов, транспортная работа, транспортное обслуживание

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Килоличцкая М. А. Расчет показателей дублируемости маршрутной сети на полигоне транспортного обслуживания пассажиров // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 2. С. 127–139.

TRANSPORTATION PROCESS MANAGEMENT

Original article

UDK 656.022.5

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

Scientific specialty: 2.9.4. Transportation process management



Calculation of duplication indicators of the route network at the passenger transportation range

Marina A. Kilochitskaya✉

Belarusian State University of Transport,
Gomel, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. Modern transport systems of regional (suburban) passenger transportation face the problem of excessive route duplication between rail and road transport, which leads to irrational use of resources, increased operating costs and decrease in the quality of public services. The relevance of studying route network duplication indicators is due to the need to optimise transport infrastructure, minimise route crossings and increase the efficiency of passenger traffic flow distribution. At the same time, route duplication is not an exclusively negative phenomenon, as in certain cases it helps to increase transport accessibility and flexibility of passenger movement.

Materials and methods. Methodology has been developed for calculating the indicators of duplication of the route network of railway and automobile transport at the passenger transportation range of the district subordination. Statistical data from Belarusian Railways on the volume and structure of passengers transported by rail by the types of communications, as well as the number of passengers sent from stations along the routes and data from passenger transportation operators and car carriers on routes and flights related to the analysed range were used. In order to assess the duplication of passenger transportation routes, the key indicators are the route intersection coefficient, the indicator of the competition of transportation capabilities and the efficiency of passenger traffic distribution.

Results. Analysis of route network duplication at testing area revealed a high level of railway and road routes crossings in the Minsk — Osipovichy and Osipovichy — Grodzyanka sections. The integral duplication indicator varies from 0.01 to 1.04 and from 0.55 to 5.52, respectively, indicating a different degree of competition and complementarity between transport modes. The author proposes optimisation measures to reduce the frequency of railway routes with the redistribution of passenger traffic flow to road transport, which reduces operating costs and increases efficient allocation of resources.

Discussion and conclusion. The development of an integrated approach to calculating route network duplication at the regional level not only optimises the use of infrastructure, but also contributes to the sustainable development of transport systems, which meets the goals of increasing accessibility and efficiency of passenger transport services.

KEYWORDS: railway transport, road transport, route network, transportation route, route duplication, transport work, transport service

FOR CITATION: Kilochitskaya M.A. Calculation of duplication indicators of the route network at the passenger transportation range. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(2):127–139. (In Russ.).

✉ kil_ma@bsut.by (M. A. Kilochitskaya)

© Kilochitskaya M. A., 2025

Введение. Современная транспортная система крупных регионов характеризуется высокой степенью интеграции различных видов транспорта, что требует эффективного управления процессами перевозок пассажиров на маршрутной сети. Одним из ключевых аспектов управления является оценка дублируемости маршрутов железнодорожного и автомобильного пассажирского транспорта на полигоне транспортного обслуживания пассажиров. Избыточность или, напротив, недостаточная координация маршрутной сети может приводить к нерациональному использованию инфраструктуры, увеличению издержек перевозчиков и снижению качества обслуживания пассажиров.

Оптимизация маршрутной сети невозможна без детального анализа показателей дублируемости, которые позволяют выявить пересечения и параллельное функционирование маршрутов различных видов транспорта. Эти показатели помогают определить, в какой степени железнодорожный и автомобильный виды транспорта дублируют друг друга, где возможна оптимизация маршрутов, а также какие направления требуют перераспределения потоков для более эффективного обслуживания пассажиров.

Краткий обзор проблемы. Дублирование маршрутной сети выражается в наличии параллельных маршрутов железнодорожного и автомобильного транспорта, обслуживающих одни и те же направления с сопоставимой частотой и уровнем заполняемости транспортных средств. В ряде случаев это приводит к конкуренции между видами транспорта, снижению заполняемости подвижного состава и неэффективному расходованию ресурсов. В то же время, при недостаточном уровне дублируемости пассажиры могут сталкиваться с нехваткой альтернативных маршрутов, особенно в периоды сбоев или перегрузки отдельных видов транспорта.

Сложность анализа заключается в том, что дублируемость не является однозначно негативным явлением. В ряде случаев она способствует повышению транспортной доступности, особенно для удаленных районов, а также обеспечивает гибкость передвижения пассажиров. Однако при этом важно сбалансированное распределение маршрутов, исключающее неоправданное дублирование при наличии возможностей для интеграции различных видов транспорта.

Дублирование маршрутной сети общественного транспорта активно изучается в научной литературе, особенно в контексте эффективности, устойчивости и доступности транспортных систем.

Так, в статье [1] проанализирована проблема дублирования маршрутов регулярных перевозок, предложен метод определения показателя дублирования маршрутов с использованием показателя смежности маршрутов, учитывающего направления и объемы корреспонденций пассажиров. В то же время автор

отмечает, что при наличии результатов, отражающих высокий уровень смежности маршрутов, окончательное решение о сохранении, изменении или отмене маршрутов следует принимать только после всестороннего анализа других факторов, не ограничиваясь коэффициентом смежности маршрутов, которые не описаны в исследовании.

Статья [2] посвящена исследованию дублируемости маршрутов общественного транспорта в городской среде на примере г. Ижевска (Удмуртская Республика в составе Российской Федерации). Авторы разработали методику, основанную на теории графов и линейной алгебре, для количественной оценки дублирования с использованием матрицы маршрутов, вектор-маршрутов и коэффициентов дублируемости, рассчитанных через проекцию одного вектора маршрута на другой. Данная методика подходит для оценки городских автобусных маршрутов и оценивает исключительно их топографическое пересечение.

Российский опыт планирования маршрутных сетей на примере городов Ангарск, Киров и Тюмень обобщен в исследовании [3]. Авторы затрагивают вопрос дублирования маршрутов исключительно в контексте усиления сформированной маршрутной сети необходимыми маршрутами, позволяющими совершать поездки пассажиров с культурно-бытовыми целями, выделяемыми в дополнительную маршрутную сеть, однако в исследовании не оценивалась степень дублирования таких маршрутов.

Зарубежные исследования показывают, что дублирование маршрутов может быть как позитивным, так и негативным явлением. Например, авторы статьи [4] исследуют восприятие пересечения маршрутов в мультимодальных городских системах и оценивают ряд моделей (PSCL) для учета корреляций между пересекающимися маршрутами, основываясь на данных активации смарт-карт пассажиров в г. Амстердаме (Нидерланды). Результаты указывают, что пересечение маршрутов на узлах пересадок ценится пассажирами положительно, но избыточное дублирование на отдельных участках может снижать эффективность перевозок.

Научная работа [5] фокусирует внимание на оптимизации расписания автобусных маршрутов с учетом их пересечения за счет применения эвристического алгоритма, минимизирующего общие затраты на время поездок пассажиров и эксплуатационные расходы компании. Рассматриваемый пример г. Харбина (Китай) показывает, что учет пересечения маршрутов позволяет снизить общее время поездок на 5,2 % и затраты на 8,8 % по сравнению с моделями, игнорирующими дублирование.

В [6] проанализирована автобусная сеть в г. Акита (Япония) посредством анализа эффективности (DEA). Были выделены проблемы, связанные с радиальной

структурой города и дублированием маршрутов, что приводит к преобладанию расходов над доходами на убыточных маршрутах. Доля маршрутов с дублированием составляет 20 % от всего количества, но они дают более 80 % убытков автобусной сети. Предлагается разделение маршрутов на магистральные и на ответвления для повышения эффективности, что демонстрирует необходимость управления дублированием для экономической устойчивости.

Работа [7] представляет обзор алгоритмов планирования маршрутов в транспортных сетях, включая общественный транспорт. Хотя дублирование не являлось центральной темой исследования, авторы указывают, что планирование может учитывать пересечения для обеспечения устойчивости сети, особенно в условиях сбоев. В статье также отмечено, что дублирование может повышать резервы транспортной системы, но требует значительных предварительных расчетов.

В исследовании [8] авторы анализировали вопросы взаимодействия между метро и общественным автомобильным транспортом. Результаты показывают, что в мультимодальных системах общественного транспорта автобусные маршруты и линии метрополитена скорее сосуществуют, чем сотрудничают, имеет место дублирование маршрутов, что часто приводит к конкуренции, а не кооперации. Авторы подчеркивают, что необходимо учитывать индивидуальные особенности сетей общественного транспорта и способствовать их интеграции.

Выполненный анализ показывает, что проблема дублируемости сохраняет свою актуальность для маршрутных сетей. Цель данной работы — предложить методику, позволяющую рассчитать показатели и количественно оценить степень параллельного функционирования маршрутов. Такая методика будет востребована при принятии решений по корректировке маршрутной сети, повышению ее эффективности и улучшению качества транспортного обслуживания пассажиров.

Материалы и методы. В условиях значительного спроса на пригородные перевозки, особенно во временные периоды с высокой нагрузкой (например, в утренние и вечерние часы, поездки на работу и с работы), важно обеспечить баланс между пропускной способностью железнодорожных линий и гибкостью автомобильного транспорта. Однако дублирование маршрутов часто возникает стихийно, без учета анализа пассажиропотоков и пространственного распределения спроса, что усугубляет неравномерность использования вместимости транспортных средств и увеличивает время ожидания для пассажиров.

Предлагаемая методика расчета показателей дублируемости маршрутной сети железнодорожного и автомобильного видов транспорта на полигоне транспорт-

ного обслуживания пассажиров районного подчинения заключается в следующем.

Первым этапом является формирование границ полигона транспортного обслуживания пассажиров, в пределах которого будет проводиться анализ. Отделяются все маршруты железнодорожного (городское и региональное сообщение) и автомобильного (пригородное и межобластное сообщение) видов пассажирского транспорта.

На втором этапе производится графическое представление маршрутной сети анализируемого полигона транспортного обслуживания. Для удобства анализа транспортная сеть может быть представлена в виде графа, где узлы (вершины) представляют собой останочные и пересадочные пункты (вокзалы, станции, остановки), а ребра (дуги) — транспортные связи между узлами с учетом характеристик маршрутов (длина, время в пути, частота движения, вместимость подвижного состава). В таком виде граф строится отдельно для железнодорожного и автомобильного транспорта, а затем совмещается для выявления зон пересечения маршрутов.

На третьем этапе производится выявление участков дублирования, при этом дублирующими считаются участки, где маршруты железнодорожного и автомобильного видов транспорта проходят параллельно на протяжении значительного расстояния, обслуживают одни и те же населенные пункты или районы, предлагая альтернативные способы передвижения с сопоставимым временем в пути либо имеют схожий график движения (разница в интервалах движения не превышает 20–30 %). Анализ выполняется на основе маршрутных данных и данных о пассажиропотоке.

На четвертом этапе для количественной оценки степени дублирования производится расчет коэффициента дублируемости K_d , рассчитываемый по формуле:

$$K_d = \frac{L_d}{L_{min}}, \quad (1)$$

где L_d — суммарная длина дублирующих участков маршрутов железнодорожного и автомобильного транспорта, км; L_{min} — длина более короткого маршрута из дублирующей пары, км.

Для маршрутов железнодорожного и автомобильного транспорта, имеющих пространственное пересечение, необходима дополнительная оценка коэффициентов использования вместимости транспортных средств K_z (отношение фактического количества пассажиров к вместимости транспортных средств) и интенсивности движения f (количество рейсов в сутки на данном участке). Для более полной и точной оценки дублируемости вводится интегральный

показатель D , объединяющий показатели топологической дублируемости маршрутов, частоту движения и заполняемость транспорта:

$$D = K_d \frac{f_{\text{жд}} K_{\text{зжд}}}{f_{\text{авт}} K_{\text{завт}}}, \quad (2)$$

где $f_{\text{авт}}, f_{\text{жд}}$ — частота движения автомобильных транспортных средств и железнодорожного подвижного состава на дублируемом участке, рейсы/сутки; $K_{\text{завт}}, K_{\text{зжд}}$ — коэффициенты использования вместимости автомобильных транспортных средств и железнодорожного подвижного состава.

Интерпретация полученных значений K_d и D представлена в табл. 1.

На основе полученных значений коэффициентов выявляются проблемные участки маршрутной сети на полигоне транспортного обслуживания пассажиров. В зависимости от уровня дублирования, существующего пассажиропотока и использования вместимости железнодорожного и автомобильного транспорта предлагается проведение оптимизационных мероприятий (табл. 2).

Таким образом, по мнению автора предложенная методика позволяет объективно оценить дублируемость маршрутной сети железнодорожного и автомобильного транспорта на полигоне транспортного обслуживания пассажиров районного подчинения и принять решения по ее оптимизации, повышая эффективность транспортного обслуживания пассажиров.

Таблица 1

Уровень дублирования маршрутов в зависимости от значений K_d и D^*

Table 1

Level of routes duplication depending on the values of K_d and D^*

Уровень дублирования	Характеристика уровня	Коэффициент	Интегральный показатель D
Низкий	маршруты не конкурируют, а дополняют друг друга	$K_d < 0,3$	$D < 0,6$
Умеренный	есть частичное пересечение маршрутов, но их роли различны	$0,3 \leq K_d < 0,7$	$0,6 \leq D < 1,0$
Высокий	существенное пересечение, потенциальная избыточность	$K_d \geq 0,7$	$D \geq 1,0$

* Источник: данные автора

* Source: author's data

Фактические данные. Для расчета показателей дублируемости маршрутной сети был рассмотрен полигон транспортного обслуживания административно-территориальной единицы Республики Беларусь, границы которого включают участок Минск — Осиповичи с охватом г. Минска, а также Минской и Могилевской областей. Маршрутная сеть анализируемого полигона транспортного обслуживания представлена на рис. 1 [9].

Таблица 2

Матрица рекомендаций по уровням дублирования маршрутов железнодорожного и автомобильного транспорта*

Table 2

Matrix of recommendations on the levels of rail and road transport routes duplication*

Характеристика пассажиропотока и уровня загрузки**	Уровень дублирования		
	Низкий	Умеренный	Высокий
Низкий пассажиропоток, низкая загрузка	оставить без изменений, ввести новые маршруты	возможное сокращение дублирующих маршрутов	сокращение параллельных маршрутов или перевод на менее емкий транспорт
Высокий пассажиропоток, низкая загрузка	добавить маршруты в перспективных зонах	согласование расписаний для равномерного распределения пассажиров	перенаправление части потоков, введение экспресс-маршрутов
Низкий пассажиропоток, высокая загрузка	оптимизировать использование вместимости транспортных средств	оптимизация тарифов и схем движения	оптимизация загруженных маршрутов, сокращений дублируемых маршрутов
Высокий пассажиропоток, высокая загрузка	увеличить вместимость подвижного состава, расширить маршрутную сеть	введение пересадочных узлов, координация видов транспорта	развитие новой маршрутной сети, перераспределение потоков

* Источник: данные автора

* Source: author's data

** Под загрузкой понимается уровень использования вместимости автомобильных транспортных средств и железнодорожного подвижного состава

** Loading refers to the level of capacity utilisation of road vehicles and railway rolling stock

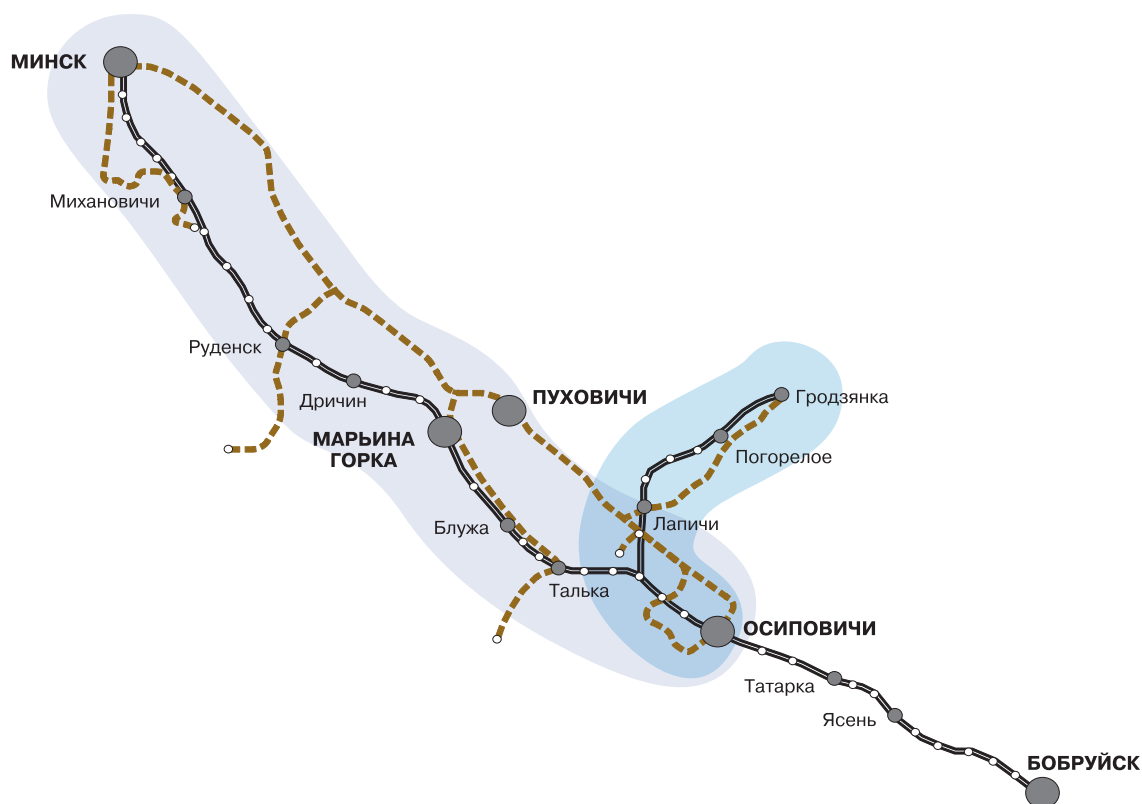


Рис. 1. Маршрутная сеть анализируемого полигона транспортного обслуживания*

— железнодорожное сообщение; — автомобильное сообщение; анализируемые участки

* Источник: составлено автором по материалам исследования

Fig. 1. Route network of the analysed transportation service range*

— railway service; — car service; analysed regions

* Source: compiled by the author according to research materials

На основании рис. 1 выявлены следующие участки дублирования на исследуемом полигоне транспортного обслуживания пассажиров: Минск — Осиповичи, Осиповичи — Гродзянка, где маршруты железнодорожного и автомобильного транспорта проходят параллельно на протяжении выявленных участков, обслуживают одни и те же населенные пункты.

Для выполнения анализа на предмет дублирования участков Минск — Осиповичи и Осиповичи — Гродзянка необходимо использовать маршрутные данные и данные о пассажиропотоке на анализируемом полигоне^{1, 2}.

Перечень маршрутов железнодорожного и автомобильного транспорта с зоной обслуживания населенных пунктов Минской и Могилевской областей

на выявленных участках дублирования представлен в табл. 3 и табл. 4 соответственно.

Анализ данных табл. 3 и 4 показывает, что существующие параметры обслуживания пассажиров в полной мере удовлетворяют потребности населения выбранного полигона транспортного обслуживания в перевозках. В части железнодорожного транспорта необходимо проведение корректировки размеров движения железнодорожного транспорта в зависимости от фактически выполняемого объема транспортной работы по перевозке пассажиров по направлению Минск — Осиповичи. На маршрутах автотранспорта требуется реализовать комплекс мер для улучшения системы транспортного обслуживания.

¹ Государственным объединением «Белорусская железная дорога» была предоставлена исходная база для выполнения анализа из отчетных документов Кассовой компьютерной системы (ККС): объем и структура перевезенных пассажиров железнодорожным транспортом по видам сообщений между населенными пунктами полигона за неделю, а также количество отправленных пассажиров со станций по маршрутам курсирования за аналогичный период.

² По запросу Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь были предоставлены данные от операторов автомобильных перевозок пассажиров и автомобильных перевозчиков, сформированные на основании фактически проданных проездных документов (билетов) за неделю по маршрутам и рейсам, относящимся к анализируемому полигону.

Таблица 3

Маршруты железнодорожного транспорта с зоной обслуживания населенных пунктов Минской и Могилевской областей*

Table 3

Railway transport routes with settlement service area for Minsk and Mogilev regions*

Маршрут	Протяженность маршрута, км	Вид сообщения	Тип ПС	Периодичность курсирования	Количество пар поездов
Участок дублирования Минск — Осиповичи					
Минск — Руденск	41	городское	ЭПг	ежедневно	10
Минск — Пуховичи	63	региональное эконом класса	ЭР9Т	ежедневно	2
Минск — Талька	83	региональное эконом класса	ЭР9Т	ежедневно	3
Минск — Осиповичи	107	региональное эконом класса	ЭР9Т	ежедневно	8
				пт., сб., вск.	1
Минск — Бобруйск	149	региональное эконом класса	ЭР9Т	ежедневно	1
Участок дублирования Осиповичи — Гродзянка					
Осиповичи — Гродзянка	44	региональное эконом класса	ПВЛТ	ежедневно	1
				по выходным	1

* Источник: составлено автором по материалам исследования

* Source: compiled by the author according to research materials

Таблица 4

Маршруты автомобильного транспорта с зоной обслуживания населенных пунктов Минской и Могилевской областей*

Table 4

Road transport routes with settlement service area for Minsk and Mogilev regions*

Номер маршрута	Маршрут	Протяженность маршрута, км	Вид сообщения	Количество рейсов в неделю	Вместимость транспортного средства
Участок дублирования Минск — Осиповичи					
7603-ТК	Минск — Осиповичи	96,8–110	регулярное межобластное	53–167	15–17
475Э	Минск — АС Марьина Горка	54,0	регулярное пригородное	164	16–29
476С	Минск — АС Марьина Горка	54,7	регулярное пригородное	56	29
883С	Минск — Руденск ж.-д. ст.	74,5	регулярное пригородное	4	—
2075ТК	Минск — Марьина Горка	54,0	регулярное пригородное	238	17–20
218С	АС Марьина Горка — Сутин	35,3	регулярное пригородное	—	—
Участок дублирования Осиповичи — Гродзянка					
211С	Осиповичи — Гродзянка	50–61	регулярное	13	73–98
212С	Гродзянка — Осиповичи	53–58	регулярное	1–2	73
213С	Осиповичи — Погорелое	41–44	регулярное	2	73
215С	Осиповичи — Лапичи	28–33	регулярное	3	19–100
219С	Осиповичи — Гродзянка	55–62	регулярное	1–2	73

* Источник: составлено автором по материалам исследования

* Source: compiled by the author according to research materials

Объем транспортной работы, объем выполненных перевозок пассажиров и коэффициент использования вместимости транспортных средств по видам транспорта

и по маршрутам перевозки на рассматриваемых участках дублирования за неделю, установленные в соответствии с [10], приведены в табл. 5 и на рис. 2 и 3.

Таблица 5

Объемы транспортной работы, выполненных перевозок пассажиров и коэффициент использования вместимости транспортных средств по видам транспорта и по маршрутам перевозки*

Table 5

Volume of transport work, performed passenger transportation and the capacity utilisation factor of vehicle by type of transport and transportation routes*

Маршрут	Общее количество перевезенных пассажиров, тыс. чел.	Объем транспортной работы, пасс-км	Коэффициент использования вместимости
Участок Минск — Осиповичи			
Минск — Руденск	26 213	611 876	0,31–0,47
Минск — Пуховичи	9 367	252 174	0,05–0,22
Минск — Талька	20 990	597 762	0,10–0,50
Минск — Осиповичи	65 878	2 372 238	0,15–0,22
Минск — Бобруйск	11 667	447 645	0,12–0,30
7603-ТК Минск — Осиповичи	1 789	178 772	0,64–0,69
475Э Минск — АС Марьина Горка	2 928	126 490	0,49–0,89
476С Минск — АС Марьина Горка	948	41 484	0,47
883С Минск — Руденск ж.-д. ст.	сведения отсутствуют	сведения отсутствуют	—
2075ТК Минск — Марьина Горка	сведения отсутствуют	сведения отсутствуют	—
218С АС Марьина Горка — Сутин	сведения отсутствуют	сведения отсутствуют	—
Участок Осиповичи — Гродзянка			
Осиповичи — Гродзянка	696	30 624	0,46
211С Осиповичи — Гродзянка	1 100	34 100	0,45–0,70
212С Осиповичи — Гродзянка	53	1 378	0,16–0,36
213С Осиповичи — Погорелое	106	2 332	0,36–0,39
215С Осиповичи — Лапичи	75	1 275	0,13–0,80
219С Осиповичи — Гродзянка	150	4 650	0,58–1,03

* Источник: составлено автором по материалам исследования

* Source: compiled by the author according to research materials

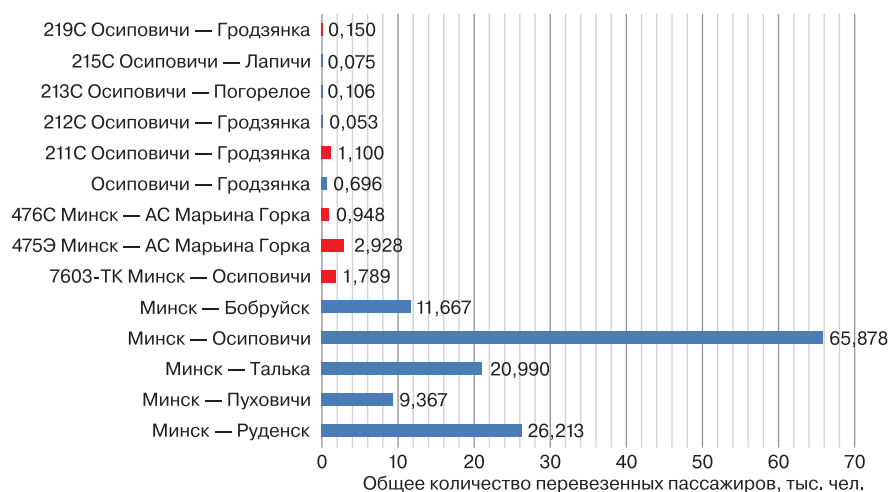


Рис. 2. Объем выполненных перевозок пассажиров по видам транспорта и по маршрутам перевозки*:
красный цвет — автомобильное сообщение; синий — железнодорожное сообщение

* Источник: составлено автором по материалам исследования

Fig.2. Volume of passenger transportation performed by types of transport and transportation routes*:
red — car service; blue — railway service

* Source: compiled by the author according to research materials

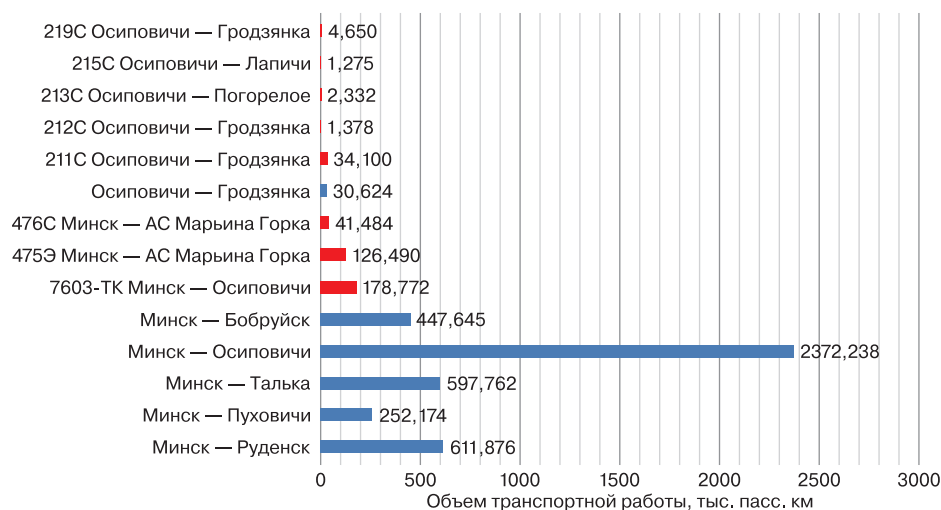


Рис. 3. Объем транспортной работы по видам транспорта и по маршрутам перевозки*:
красный цвет — автомобильное сообщение; синий — железнодорожное сообщение
* Источник: составлено автором по материалам исследования

Fig. 3. The volume of transport work by types of transport and transportation routes*:
red — car service; blue — railway service
* Source: compiled by the author according to research materials

Результаты. По данным, представленным на рис. 1 и в табл. 3, можно сделать вывод об иерархической структуре железнодорожной маршрутной сети полигона транспортного обслуживания.

На основании исходных данных, приведенных в табл. 3 и 4, был произведен расчет коэффициента дублируемости K_d по формуле (1) для участков Минск — Осиповичи и Осиповичи — Гродзянка. Поскольку железнодорожные и автомобильные маршруты на рассматриваемом полигоне транспортного обслуживания дублируют друг друга на всей протяженности более коротких маршрутов из дублирующих пар, то для всех маршрутов коэффициент K_d будет равен 1, что соответствует высокому уровню дублирования (см. табл. 1).

Для более полной и точной оценки дублируемости рассчитаем интегральный показатель D по формуле (2) для участков дублирования, исходные данные для расчета которого по маршрутам сведены в табл. 6. Для расчета принимаются маршруты, имеющие количественное значение заполняемости транспорта (см. табл. 5). В расчете также принимаем медианное значение коэффициента использования вместимости транспортных средств на маршруте.

Рассчитанные значения интегрального показателя D для участков дублирования Минск — Осиповичи и Осиповичи — Гродзянка представлены в табл. 7 и 8 соответственно.

На участке дублирования Минск — Осиповичи интегральный показатель D находится в интервале от 0,01 до 1,04 (см. табл. 7), что свидетельствует о том, что

большинство маршрутов не конкурируют, а дополняют друг друга, в то же время выявлена потенциальная избыточность дублируемых маршрутов железнодорожного и автомобильного транспорта при перевозке пассажиров.

На участке Осиповичи — Гродзянка интегральный показатель дублируемости D находится в интервале от 0,55 до 5,52 (см. табл. 8), что свидетельствует о существенном пересечении маршрута железнодорожного транспорта с автомобильными маршрутами на анализируемом направлении перевозок пассажиров. Сокращение частоты движения по железнодорожному маршруту Осиповичи — Гродзянка поспособствует уменьшению значений показателя D на анализируемом участке.

Анализ результатов. Проведенный анализ дублируемости маршрутной сети на полигоне транспортного обслуживания пассажиров на участке Минск — Осиповичи (с охватом г. Минска, Минской и Могилевской областей) позволил выявить ключевые особенности взаимодействия железнодорожного и автомобильного транспорта в условиях региональных (пригородных) перевозок. Расчет показателей дублируемости, основанный на предложенной методике, позволил количественно оценить степень пересечения маршрутов, конкуренцию провозных возможностей и эффективность распределения пассажиропотоков между различными видами пассажирского транспорта.

Результаты анализа свидетельствуют о высоком уровне пространственной дублируемости маршрутов на участках Минск — Осиповичи и Осиповичи — Гродзянка, где коэффициент дублируемости, рассчитанный

Таблица 6

Исходные данные для расчета интегрального показателя дублируемости D по маршрутам*

Table 6

Initial data on integrated duplication indicator D calculation by routes*

Маршрут	Частота движения, $f_{\text{авт}}$ (рейсы/сутки)	Частота движения, $f_{\text{жд}}$ (рейсы/сутки)	Коэффициент использования вместимости, $K_{\text{з авт}}$	Коэффициент использования вместимости, $K_{\text{з жд}}$
Маршруты автомобильного транспорта				
7603-ТК Минск — Осиповичи	220	—	0,665	—
475Э Минск — АС Марьина Горка	164	—	0,690	—
476С Минск — АС Марьина Горка	56	—	0,470	—
211С Осиповичи — Гродзянка	13	—	0,575	—
212С Осиповичи — Гродзянка	3	—	0,260	—
213С Осиповичи — Погорелое	2	—	0,375	—
215С Осиповичи — Лапичи	3	—	0,465	—
219С Осиповичи — Гродзянка	3	—	0,805	—
Маршруты железнодорожного транспорта				
Минск — Руденск	—	70	—	0,390
Минск — Пуховичи	—	14	—	0,135
Минск — Талька	—	21	—	0,300
Минск — Осиповичи	—	59	—	0,185
Минск — Бобруйск	—	7	—	0,210
Осиповичи — Гродзянка	—	9	—	0,460

* Источник: составлено автором по материалам исследования

* Source: compiled by the author according to research materials

Таблица 7

Значения интегрального показателя дублируемости D для участка Минск — Осиповичи*

Table 7

Values of integrated duplication indicator D for the Minsk — Osipovichi section*

Железнодорожный маршрут	Автомобильный маршрут		
	7603-ТК Минск — Осиповичи	475Э Минск — АС Марьина Горка	476С Минск — АС Марьина Горка
Минск — Руденск	0,19	0,24	1,04
Минск — Пуховичи	0,01	0,02	0,07
Минск — Талька	0,04	0,06	0,24
Минск — Осиповичи	0,07	0,10	0,41
Минск — Бобруйск	0,01	0,01	0,06

* Источник: составлено автором по материалам исследования

* Source: compiled by the author according to research materials

Таблица 8

Значения интегрального показателя дублируемости D для участка дублирования Осиповичи — Гродзянка*

Table 8

Values of the integrated duplication indicator D for the Osipovichi — Grodzyanka duplication section*

Железнодорожный маршрут	Автомобильный маршрут				
	211С Осиповичи — Гродзянка	212С Осиповичи — Гродзянка	213С Осиповичи — Погорелое	215С Осиповичи — Лапичи	219С Осиповичи — Гродзянка
Осиповичи — Гродзянка	0,55	5,31	5,52	2,97	1,71

* Источник: составлено автором по материалам исследования

* Source: compiled by the author according to research materials

по формуле (1), достигает значения 1. Это свидетельствует о полном совпадении маршрутов железнодорожного и автомобильного транспорта на значительных отрезках сети. Однако интегральный показатель дублируемости, рассчитанный по формуле (2) и учитывающий частоту движения и коэффициент использования вместимости транспортных средств, демонстрирует различия в характере этого пересечения.

На участке Минск — Осиповичи значения интегрального показателя дублируемости варьируются от 0,01 до 1,04, что указывает на преимущественно взаимодополняющий характер функционирования видов транспорта, за исключением отдельных маршрутов, где наблюдается потенциальная избыточность.

В качестве рекомендаций по оптимизации дублируемых маршрутов железнодорожного и автомобильного транспорта на участке Минск — Осиповичи, разработанных на основе анализа интегрального показателя дублируемости, существующего пассажиропотока и коэффициента использования вместимости железнодорожного подвижного состава и автомобильных транспортных средств, а также с учетом матрицы рекомендаций по уровням дублирования (см. табл. 2), предлагаются следующие мероприятия:

1. Железнодорожный маршрут Минск — Руденск и автомобильный маршрут 476С Минск — АС Марьина Горка с высоким интегральным показателем дублируемости, средним уровнем пассажиропотока и средним уровнем коэффициента использования вместимости транспортных средств. На участке рекомендуется сократить частоту движения железнодорожного маршрута на 20–30 % (например, с 10 до 7 рейсов в сутки), сохраняя рейсы в пиковые часы, перераспределить часть пассажиров на автомобильный маршрут, при необходимости увеличив вместимость автобусов, что позволит снизить интегральный показатель дублируемости до уровня ниже 1,0, оптимизируя затраты и сохраняя качество обслуживания.

2. Железнодорожный маршрут Минск — Пуховичи и автомобильный маршрут 475Э Минск — АС Марьина Горка с низким интегральным показателем дублируемости, средним пассажиропотоком и низким (на железнодорожном маршруте)/средним (на автомобильном маршруте) уровнем коэффициента использования вместимости транспортных средств. Рекомендуется рассмотреть сокращение частоты движения на 10–15 % для обоих маршрутов или объединение рейсов в периоды низкого спроса, что снизит эксплуатационные затраты, сохраняя необходимый уровень транспортной доступности.

3. Железнодорожный маршрут Минск — Осиповичи и автомобильный маршрут 7603-ТК Минск — Осиповичи со средним интегральным показателем дублируемости, высоким пассажиропотоком и низким

(на железнодорожном маршруте)/средним (на автомобильном маршруте) уровнем коэффициента использования вместимости транспортных средств. Рекомендуется сохранить текущую частоту движения автомобильных транспортных средств на маршруте, незначительно сократив частоту движения на железнодорожном маршруте в межпиковые периоды, так как высокий пассажиропоток и коэффициент использования вместимости транспортных средств оправдывают существующее дублирование, оптимизировать расписание, устранив пересечения рейсов железнодорожного и автомобильного транспорта с интервалом менее 30 минут, осуществлять мониторинг пиковых часов для предотвращения перегрузки и рассмотреть интеграцию тарифных систем для удобства пересадок.

На участке Осиповичи — Гродзянка диапазон значений интегрального показателя дублируемости (от 0,55 до 5,52) указывает на более выраженную конкуренцию между видами транспорта, что сопровождается перерасходом эксплуатационных ресурсов. Целесообразно рассмотреть сокращение числа рейсов железнодорожного транспорта на 40–50 % (либо их отмену) с одновременным перераспределением пассажиропотоков на автомобильные маршруты, что позволит увеличить использование вместимости автомобильного транспорта, снизить эксплуатационные затраты и сбалансировать транспортную систему, особенно в периоды максимального пассажиропотока, обеспечив гибкость и экономическую эффективность.

Обсуждение. Результаты работы показали, что для маршрутов с высоким уровнем дублирования ($D \geq 1,0$) и низкой загрузкой (K_z менее 0,40) целесообразно сокращение частоты движения транспорта с меньшей заполняемостью, чтобы минимизировать эксплуатационные затраты. Так, в случае маршрутов Минск — Руденск и 476С Минск — АС Марьина Горка, железнодорожный маршрут демонстрирует более низкую заполняемость при сопоставимом пассажиропотоке для различных видов транспорта. Сокращение частоты железнодорожных рейсов на 20–30 % позволяет устранить избыточное предложение транспортных услуг, сохраняя рейсы в пиковые часы. Одновременно увеличение вместимости автобусов на автомобильном маршруте компенсирует перераспределение пассажиропотоков, так как автобусы обладают большей гибкостью в организации рейсов и меньшими эксплуатационными затратами на данном направлении. Обратный подход (сокращение автобусных рейсов и увеличение железнодорожных) менее эффективен при низком и среднем пассажиропотоке, так как железнодорожный транспорт имеет более высокие фиксированные затраты и меньшую адаптивность к колебаниям спроса. Для маршрутов с низким уровнем дублирования и высокой загрузкой рекомендуется сохранение текущей

частоты движения или ее незначительная корректировка, чтобы поддерживать транспортную доступность.

Обсуждение полученных результатов подчеркивает необходимость дифференцированного подхода к управлению маршрутной сетью. Оптимизация должна учитывать как количественные показатели дублируемости, так и качественные аспекты, такие как удобство для пассажиров и рациональное использование инфраструктуры. Предложенные меры, включая корректировку расписаний и перераспределение пассажиропотоков, направлены на снижение эксплуатационных затрат и повышение устойчивости транспортной системы.

Заключение. Исследование дублируемости маршрутной сети на полигоне транспортного обслуживания пассажиров Минск — Осиповичи, охватывающем г. Минск, Минскую и Могилевскую области, выявило ключевые особенности взаимодействия железнодорожного и автомобильного транспорта в условиях региональных и пригородных перевозок.

Разработанная методика расчета показателей дублируемости, основанная на коэффициенте пересечения маршрутов и интегральном показателе D , позволила провести объективную количественную оценку степени пересечения маршрутов и выявить участки с избыточным дублированием. На участке Минск — Осиповичи коэффициент дублируемости равен 1, а значения D варьируются от 0,01 до 1,04, что свидетельствует о преимущественно взаимодополняющем характере функционирования видов транспорта, за исключением отдельных маршрутов, таких как Минск — Руденск, где наблюдается потенциальная избыточность. На участке Осиповичи — Гродзянка значения D находятся в диапазоне от 0,55 до 5,52 и указывают на более выраженную конкуренцию, сопровождаемую неравномерным использованием вместимости транспортных средств.

Анализ пассажиропотоков и коэффициентов использования вместимости транспортных средств подтвердил, что дублирование маршрутов создает как возможности для повышения транспортной доступности, так и вызовы в виде нерационального использования ресурсов. Предложенные оптимизационные меры, в том числе сокращение частоты железнодорожных рейсов на 20–50 % на отдельных направлениях и перераспределение пассажиропотоков на автомобильный транспорт, направлены на устранение избыточного дублирования, снижение эксплуатационных затрат и повышение эффективности распределения ресурсов. Эти меры учитывают различия в гибкости и экономических характеристиках видов транспорта, что обеспечивает сбалансированный подход к управлению маршрутной сетью.

Полученные результаты подчеркивают значимость комплексного подхода к анализу дублируемости для региональных транспортных систем. Разработанная

методика доказала свою применимость для выявления проблемных участков сети и обоснования управленческих решений, способствующих повышению эффективности инфраструктуры.

Благодарности: автор выражает благодарность научному руководителю Александру Александровичу Ерофееву и рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the author expresses gratitude to the scientific advisor Alexander A. Erofeev and to the reviewers for useful comments that contributed to the improvement of the article.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов и не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Енин Д. В. Подходы к определению уровня дублирования маршрутов регулярных перевозок // Мир транспорта. 2021. Т. 19, № 1 (92). С. 210–228. EDN: <https://www.elibrary.ru/fgywzx>.
2. Енин Д. В. Approaches to Determining the Regular Transit Route Duplication Level. *World of Transport and Transportation*. 2021;19(1):210–228. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/fgywzx>.
3. Касаткина Е. В., Вавилова Д. Д. Анализ данных системы городского общественного транспорта для решения проблемы дублируемости маршрутов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2022. № 1. С. 66–78. EDN: <https://www.elibrary.ru/oxcmqo>.
4. Kasatkina E. V., Vavilova D. D. Data analysis of public urban transport system to solve the problem of route duplication. *Proceedings of VSY. Series: systems analysis and information technologies*. 2022;(1):66–78. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/oxcmqo>.
5. Мельников М. С., Соболев Д. Ю. Обзор российского опыта по организации планирования развития городской маршрутной сети // Экономика, предпринимательство и право. 2021. Т. 11, № 2. С. 415–430. EDN: <https://www.elibrary.ru/rxxdggf>.
6. Melnikov M. S., Sobolev D. Yu. Review of Russian experience on the organization of planning the development of the urban route network. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*. 2021;11(2):415–430. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/rxxdggf>.
7. Dixit M., Cats O., Brands T., van Oort N., Hoogendoorn S. Perception of overlap in multi-modal urban transit route choice. *Transport-metrica A: Transport Science*. 2023;19(2):2005180. <https://doi.org/10.1080/23249935.2021.2005180>.
8. Bie Y., Tang R., Wang L. Bus Scheduling of Overlapping Routes With Multi-Vehicle Types Based on Passenger OD Data. *IEEE Access*. 2020;(8):1406–1415. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2961930>.
9. Suzuki Y., Hino S., Kanno T., Amemiya D. A study on the possibility of a BUS route network with connections based on an analysis of the efficiency of the bus route network and resistance of bus users to transfer. *Research in Transportation Economics*. 2023;102:101357. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2023.101357>.
10. Bast H., Delling D., Goldberg A., Müller-Hannemann M., Pajor T., Sanders P., Wagner D., Werneck R. Route Planning in Transportation Networks. In: *Algorithm Engineering. Lecture Notes in Computer Science*. 2016;9220:19–80. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49487-6_2.
11. Georgiadis G., Papaioannou P., Politis I. Rail and road public transport: Cooperation or coexistence? *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2020;5:100122. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100122>.

9. Ерофеев А. А., Килочицкая М. А. Комплексное транспортное обслуживание пассажиров // Железнодорожный транспорт. 2024. № 10. С. 40–44. EDN: <https://www.elibrary.ru/aotram>.

Erofeev A. A., Kilochitskaya M. A. Comprehensive passenger transport services. *Railway Transport*. 2024;(10):40–44. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/aotram>.

10. Килочицкая М. А. Разработка системы планирования комплексного транспортного обслуживания пассажиров // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2024. № 2 (49). С. 63–66. EDN: <https://elibrary.ru/lnisir>.

Kilochitskaya M. A. Development of a comprehensive passenger transport service planning system. *Bulletin of BSUT: science and transport*. 2024;2(49):63–66. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/lnisir>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Марина Анатольевна КИЛОЧИЦКАЯ,
младший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория «Управление перевозочным процессом», Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ, 246653, Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34), AuthorID: 1228032, <https://orcid.org/0009-0007-6658-2380>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Marina A. KILOCHITSKAYA,
Junior Researcher, Management of the Transportation Process Research Laboratory, Belarusian State University of Transport (246653, Republic of Belarus, Gomel, Kirova St., 34), AuthorID: 1228032, <https://orcid.org/0009-0007-6658-2380>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

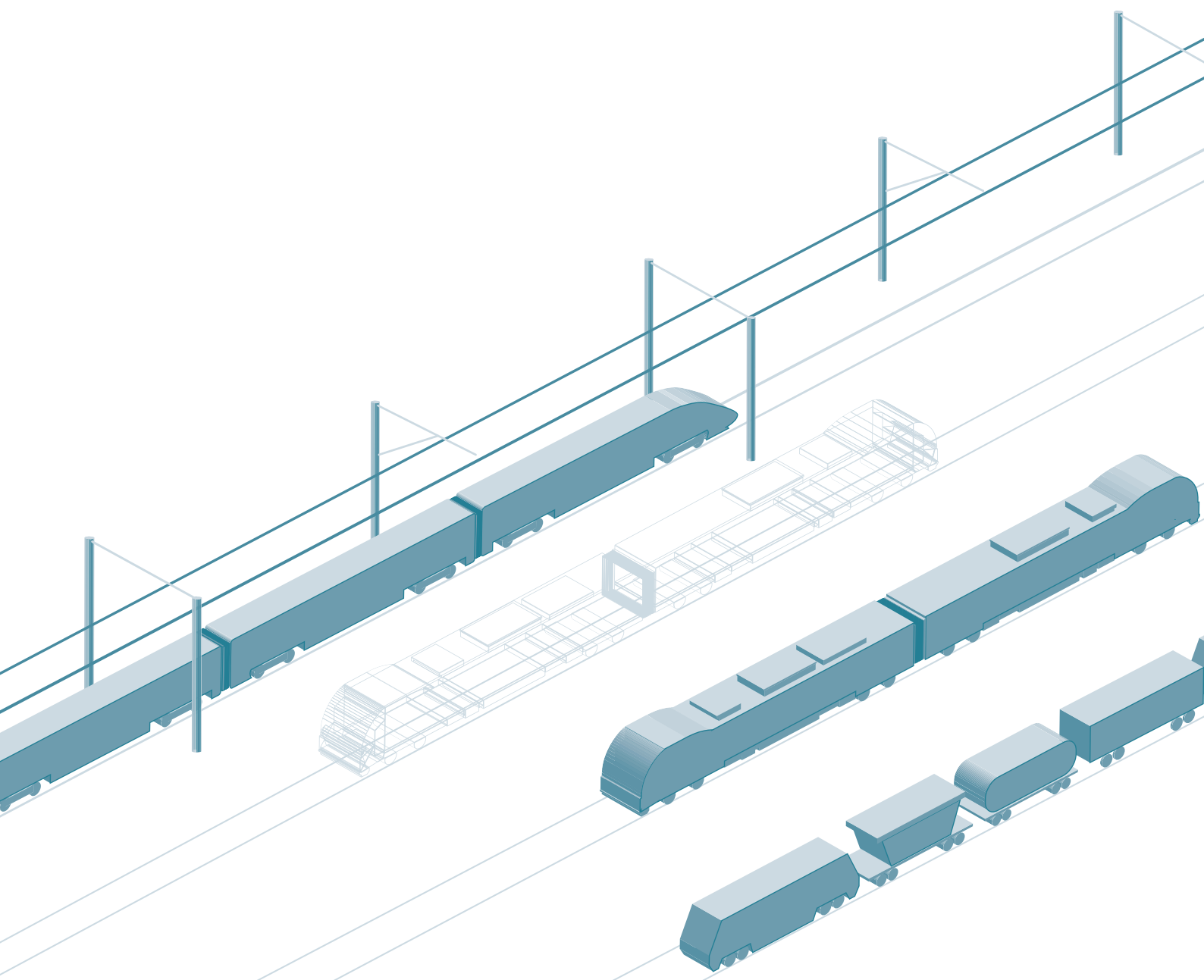
The author has read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 28.03.2025, рецензия от первого рецензента получена 07.04.2025, рецензия от второго рецензента получена 11.04.2025, рецензия от третьего рецензента получена 14.04.2025, рецензия от четвертого рецензента получена 05.05.2025, принята к публикации 20.05.2025.

The article was submitted 28.03.2025, first review received 07.04.2025, second review received 11.04.2025, third review received 14.04.2025, fourth review received 05.05.2025, accepted for publication 20.05.2025.

ВНИИЖТ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

VNIIZhT: YESTERDAY, TODAY, TOMORROW



Обзорная статья

УДК 625.1: 001.891

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

Роль научно-корреспондентских пунктов в железнодорожной науке в 1942–1945 гг.

И. В. Анохов✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Во время войны перед железнодорожными институтами страны была поставлена задача в кратчайшие сроки перестроить свою работу на мобилизационный лад. Практически сразу выяснилось, что в новых условиях функционирование нескольких узконаправленных институтов не целесообразно и поэтому в конце 1941 года все отраслевые институты Народного комиссариата путей сообщения СССР были объединены в Центральный научно-исследовательский институт Народного комиссариата путей сообщения.

Быстро меняющаяся ситуация в сфере перевозок потребовала от науки не только оперативных и практических решений, но и дополнительных шагов по перемещению научной деятельности в прифронтовую зону. В этой связи руководством Института было принято решение о создании сети научно-корреспондентских пунктов.

Материалы и методы. Для написания статьи использованы публикации в журнале «Техника железных дорог» 1942–1945 гг., а также архивные материалы Института.

Результаты. Освещена роль научно-корреспондентских пунктов в восстановлении путей сообщения в военное время. Констатируется, что сеть научно-корреспондентских пунктов стала эффективной организационной формой для проведения прикладных исследований в условиях, приближенных к боевым. Результатом этого административного шага стал целый ряд исследований и разработок, содействовавших работе железнодорожного транспорта в чрезвычайных условиях того времени.

Обсуждение и заключение. Материалы статьи могут быть полезны как для ученых и исследователей, занимающихся изучением железнодорожной отрасли, так и для руководителей отрасли. Кроме того, она будет интересна любителям истории железных дорог, стремящимся углубить свои знания о становлении и развитии данной области.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный транспорт, научные исследования, организация науки, научно-корреспондентские пункты, филиалы института

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Анохов И. В. Роль научно-корреспондентских пунктов в железнодорожной науке в 1942–1945 гг. // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 2. С. 141–150.

Review article

UDK 625.1: 001.891

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



Role of scientific correspondent points in railway science in 1942–1945

Igor V. Anokhov✉

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. During the war, the country's railway institutions faced the task to reorganise their work into a mobilisation mode as soon as possible. It became clear almost immediately that in new conditions, the functioning of several narrowly focused institutes was not advisable, and therefore, at the end of 1941, all the branch institutes of the People's Commissariat of Communication Routes of the Soviet Union were merged into the Central Research Institute of the People's Commissariat of Communication Routes.

The rapidly changing situation in the field of transportation required science not only to make operational and practical decisions, but also to take additional steps to move scientific activities to the frontline zone. In this regard, the management of the Institute decided to create a network of scientific correspondent points.

Materials and methods. Publications in the Railway Engineering journal for the period of 1942–1945, as well as archival materials of the Institute, were used in the article.

Results. The role of scientific correspondent points in the restoration of communication routes during the war is highlighted. It is stated that the network of scientific correspondent points has become an effective organisational form for conducting applied research in environment close to military. This step resulted in a number of studies and developments that facilitated the operation of railway transport in the emergency conditions of that time.

Discussion and conclusion. The materials of the article may be useful both for scientists and researchers studying the railway industry, as well as for industry heads. In addition, it may appeal to railway historians who seek to deepen their knowledge of the formation and development of this field.

KEYWORDS: railway transport, scientific research, organisation of science, scientific correspondent points, branches of the Institute

FOR CITATION: Anokhov I.V. Role of scientific correspondent points in railway science in 1942–1945. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(2):141–150. (In Russ.).

✉ anokhov.igor@vniizht.ru (I. V. Anokhov)

© Anokhov I. V., 2025



«В трудное для страны время научная организация не имеет права говорить о невозможности решения поставленной задачи. Единственный вопрос, который может быть задан, это вопрос о том, сколько есть времени на ее решение»

А. В. Горинов, д-р. техн. наук, профессор,
член-корреспондент АН СССР,
директор ЦНИИ с 1941 до 1943 гг.

(из воспоминаний
главного научного сотрудника АО «ВНИИЖТ»,
д-ра техн. наук, проф. Б. Э. Глюзберга)

Введение. В довоенный период в стране функционировало несколько научно-исследовательских институтов железнодорожной отрасли: Институт пути и путевого хозяйства, Институт железнодорожного строительства и проектирования, Институт паровозо-вагонного хозяйства и энергетики, Институт связи, СЦБ и электрификации и др.

После начала Великой Отечественной войны часть ведущих ученых из этих организаций была направлена в аппарат Народного комиссариата путей сообщения СССР (далее — НКПС) и на железные дороги страны, многие сотрудники ушли на фронт. Все это серьезно ослабило научный потенциал институтов. В декабре 1941 г. все НИИ железнодорожного транспорта были эвакуированы в Ташкент.

Член-корреспондент Академии наук СССР, профессор А. В. Горинов в своей статье «Развернуть научную работу на железных дорогах» [1] в 1942 г. отмечал, что уже в первые месяцы войны все отраслевые научно-исследовательские институты НКПС перестроились на военную тематику и выполнили ряд весьма ценных оборонных работ. Так, Институт пути и путевого хозяйства разработал несколько конструкций простейших стрелочных переводов для применения их при восстановлении железных дорог, создал улучшенную конструкцию путеразрушителя, сконструировал станок для правки деформированных рельсов. Институт железнодорожного строительства и проектирования разработал вопросы форсированного строительства железных дорог и технические нормативы по строительству дорог в условиях военного времени. Институт паровозо-вагонного хозяйства и энергетики предложил съемное оборудование паровоза специального назначения, усовершенствовал конструкцию сбрасывателя подвижного состава. Институт связи, СЦБ и электрификации разработал переносную телефонную аппаратуру диспетчерской связи, различного рода светомаскировочные устройства и создал ряд приспособлений и приборов для быстрого восстановления электрифицированных железных дорог. Институт движения и грузовой работы предложил механизм для погрузки-разгрузки боевых машин и тяжелых оборонных грузов.

По мнению А. В. Горинова ученые оказали немалую помощь железнодорожному транспорту и Красной армии, но обстановка военного времени требовала дополнительных мер. Вместе с этим, количественно ослабленный состав сотрудников научных институтов и ограничения их функционирования в условиях эвакуации сказывались на результативности их научной деятельности. Между тем быстро меняющаяся обстановка тех лет требовала максимальной концентрации всех ресурсов (в том числе научных) для немедленного реагирования на нужды страны. В результате решением Правительства все отраслевые институты НКПС вошли в состав Центрального научно-исследовательского института Народного комиссариата путей сообщения (ЦНИИ НКПС), объединившего несколько сот высококвалифицированных научных сотрудников. Возглавил институт член-корреспондент Академии наук СССР А. В. Горинов.

Объединенный ЦНИИ НКПС располагал несколькими десятками крупных лабораторий по самым различным областям исследований, среди них:

- хорошо оснащенная механическая лаборатория, имеющая универсальную горизонтальную испытательную машину с пульсатором, позволяющую под воздействием нагрузок, достигающих до 200 т, проводить как статические, так и динамические испытания на растяжение, сжатие и изгиб объектов длиной до 3,5 м; вертикальный пресс для испытания на сжатие и продольный изгиб объектов под нагрузкой до 500 т и высотой до 5,5 м и на поперечный изгиб балок пролетом до 6 м; прессы Бринелля, Виккерса, Роквелла и др. для определения твердости металла;
- лаборатория трения и износа, оснащенная передовыми приборами, изготовленными как в СССР, так и за границей: машины универсального типа «А» опытного завода ЦНИИ, машина типа «И» завода ГЗИП для испытания на износ тонких поверхностных покрытий; отечественные и заграничные приборы для оценки качества поверхностей трущихся деталей;
- металлографическая и термическая лаборатория, располагающая первоклассным оборудованием для исследования структуры металла (макро и микро).

Здесь также имелись три больших металлографических микроскопа, струнный гальванометр, дилатометр Шевенара, бинокулярные микроскопы, приспособления и станки для изготовления макро- и микрошлифов, фотооптика, аппараты и приспособления для технических снимков.

Сотрудники объединенного института активно участвовали в решении многочисленных сложных проблем, вставших перед железнодорожным транспортом в военные годы. В частности, была предложена новая технология работы по ускоренному продвижению стратегических грузов и воинских эшелонов. Уже в первые месяцы военных действий были разработаны технические указания по восстановлению верхнего строения пути и земляного полотна, которыми впоследствии руководствовались все организации, выполняющие соответствующие работы. В марте 1942 г. по приказу НКПС на Бескудниковской ветке под руководством Б.Н. Зверева был создан опытный полигон ЦНИИ для исследования верхнего строения пути, искусственных и гражданских сооружений.

Особое внимание уделялось ремонту и обслуживанию локомотивов (в основном паровозов) и вагонов. Применение разработок Института обеспечило возможность значительно быстрее восстанавливать поврежденный подвижной состав и повысить его надежность. Заблаговременное оснащение железных дорог не только прифронтовой, но и тыловой зоны резервными и дублирующими устройствами связи и СЦБ, созданными в Институте, позволило поддерживать бесперебойное движение поездов на линиях.

Выполнялись работы и по оборонной тематике, в том числе ходовые испытания трофейного самоходного орудия типа «Фердинанд», освоение опытным заводом отливки гильз для «Катюш» (БМ-13), организация в зимний период массового разогрева двигателей перевозимых танков от «горячего» паровоза, что обеспечивало их быструю разгрузку с платформ, причем своим ходом. Институт также провел большую работу по развитию чугунного и сталелитейного производства в депо и на заводах.

Организация научно-корреспондентских пунктов. ЦНИИ НКПС осуществлял свою научную деятельность в г. Ташкенте, что, очевидно, в условиях ограниченных возможностей почтовой и телефонной связи того времени затрудняло оперативное реагирование института на запросы фронта и тыла. Требовались принципиально новые организационные решения.

На железнодорожном транспорте имелась большая сеть деповских, дорожных и строительных лабораторий, работающих над своими собственными задачами и слабо связанных с передовой железнодорожной наукой. Это приводило к тому, что научные работы институтов не внедрялись на местах «из-за отсутствия

специальных организаций, которые занимались бы проблемами освоения новой техники, внедрения новых конструкций и предложений с одновременным приспособлением этих конструкций применительно к требованиям производства». В связи с этим, руководство Института в инициативном порядке решило взять эту задачу на себя: обеспечить живую связь Института с производством, с железными дорогами сети.

Институт выдвинул предложение, которое было одобрено НКПС приказом № 112/ЦЗ о создании на железнодорожной сети СССР научно-корреспондентских пунктов Центрального научно-исследовательского института НКПС.

Руководствуясь этим решением, Институт в короткое время совместно с дорогами и строительными управлениями развернул свыше десяти первых научно-корреспондентских пунктов при управлениях Томской, Закавказской, Ташкентской, Свердловской, Пермской, Южно-Уральской, им. В.В. Куйбышева, Московско-Рязанской, Кировской и Октябрьской железных дорог [2, с. 30].

Научная работа корреспондентского пункта ЦНИИ осуществлялась с участием командиров и научных корреспондентов дорог, причем для разработки научных вопросов, имеющих практическое применение для дорог, привлекался профессорско-преподавательский состав Ташкентского, Новосибирского, Томского, Тбилисского и московских институтов железнодорожного транспорта.

В своих действиях руководство Института опиралось и на иностранный опыт. Так, на железных дорогах США того времени огромное значение придавалось высвобождению наиболее квалифицированных специалистов для ведения научно-исследовательской работы [3]. Для этого были созданы специальные научные отделы, занятые исследовательской работой, и содержался штат ученых экспертов (инженеров-металлургов, химиков), которые занимались исследованиями и испытаниями материалов, анализом новых предложений, конструкций и приборов, способствующих усовершенствованиям в области железнодорожного дела.

На научно-корреспондентские пункты ЦНИИ была возложена разработка, налаживание и внедрение мероприятий по следующим основным направлениям [4, с. 34]:

- по развитию в депо, дорожных и линейных мастерских железных дорог местного производства запасных частей, деталей подвижного состава, элементов верхнего строения, оборудования и инструментов на базе местного сырья, отходов производства, местных ресурсов металлолома и изношенных металлоизделий;
- по налаживанию стального и чугунного литья и волочильного производства на паровозоремонтных, вагоноремонтных заводах и в крупнейших депо дорог;

- по изысканию и использованию на базе местных ресурсов заменителей дефицитных материалов;
- по изучению и анализу применяемых на дорогах видов топлива и подбору наиболее рациональных смесей топлива, а также по разработке мероприятий, направленных на экономию топлива на дорогах;
- по изучению применяемых на дорогах средств внутрикотловой водообработки и подбору наиболее рациональных заменителей антинакипинов на базе местного сырья;
- по анализу принимаемых мер и разработке дополнительных предложений, направленных на продление срока службы сооружений железных дорог, элементов верхнего строения пути и деталей подвижного состава.

Созданные корреспондентские пункты ЦНИИ НКПС смогли обеспечить оперативную практическую помощь управлениям дорог по развитию местной производственной базы, а именно:

- изучение и анализ применяемых на дороге видов топлива и подбор более рациональных топливных смесей;
- практическое использование отходов топлива;
- продление срока службы деталей подвижного состава, элементов верхнего строения и изношенного оборудования;
- анализ узких мест в работе дороги и наблюдение за проводимыми мероприятиями по их ликвидации;
- другие вопросы, представляющие практический интерес в конкретных условиях работы данной дороги.

Кроме того, научно-корреспондентские пункты оказали оперативную практическую помощь стройкам по изысканиям заменителей строительных материалов и использованию местных сырьевых ресурсов, по изучению способов организации ремонта строительных машин и механизмов и изготовлению запасных частей, а также в других вопросах.

Наконец, научно-корреспондентские пункты при восстановительных организациях инициировали практическое наблюдение и оказание помощи в изучении организации работ на широком фронте, применении сборных и табельных конструкций, исследовании возможностей малой механизации восстановительных работ, а также в организации систематического наблюдения за работой временно восстановленных сооружений.

Наряду с этим научно-корреспондентские пункты оказали помощь и Научно-исследовательскому институту в накоплении материалов, в их систематизации для тех или иных научных исследований, в проведении на местах наблюдений, во внедрении новых конструкций и разных предложений Института. В частности,

огромную роль в изучении и обобщении опыта восстановительных работ на железных дорогах в условиях военного времени сыграли пункты, созданные при восстановительных организациях.

Все это привело к ускоренной генерации и накоплению научной базы знаний, которую требовалось оперативно тиражировать и распространять. Не случайно именно в январе 1942 г. ЦНИИ НКПС создал научно-технический журнал «Техника железных дорог» (первоначальное название журнала «Вестник ВНИИЖТ»), на который и возлагалась функция научного просвещения.

Журнал с момента своего создания приступил к непосредственной консультационной помощи по вопросам эксплуатации, строительства и восстановления железных дорог (фото 1).

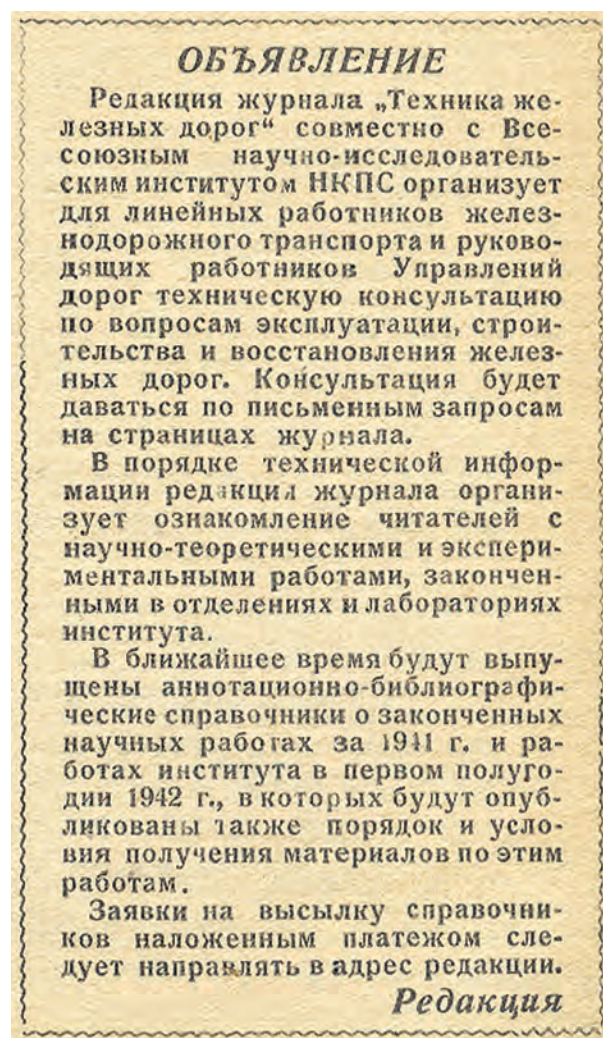


Фото 1. Объявление в номере журнала «Техника железных дорог»¹

Photo 1. Announcement in the Railway Engineering journal

¹ Техника железных дорог. 1942. № 3–4. С. 39.

При создании сети научно-корреспондентских пунктов предполагалось, что в перспективе они могут быть объединены под руководством Института и со временем интегрированы с заводскими, депо-вскими, строительными и прочими лабораториями на железнодорожном транспорте. Более того, следующим этапом предполагалось перерастание наиболее передовых научно-корреспондентских пунктов в филиалы Института на местах с собственной лабораторной базой и постоянным, даже небольшим, штатом научных работников.

Результаты создания сети научно-корреспондентских пунктов. Создание пунктов не могло не сказаться на результативности научной деятельности ЦНИИ. Направленные в 1942 г. на прифронтовые участки специальные бригады научных работников в первую очередь организовали изучение опыта восстановления железных дорог, полученного к тому времени, что позволило Институту за короткий срок разработать ряд новых специальных конструкций сооружений, оборудования и устройств, в частности облегченные типовые сборно-разборные табельные конструкции мостов, труб и зданий, специально приспособленные для условий восстановления. Наряду с этим были разработаны типы и оснащение подвижных стройзаводов, стройдворов и заготовительных баз в районах восстановления железных дорог, а также специальные конструкции, такие как наплавные мосты, оригинальные понтонные переправы, деревянные типовые эстакады и др. Помимо этого для восстановительных целей Институтом совершенствовались и адаптировались существующие механизмы, в частности для сборки табельных мостовых конструкций модернизированным путеукладочным краном Платова. Большое внимание уделено созданию конструкции переносного оборудования связи и СЦБ.

Институтом была проведена и большая работа по изучению мероприятий, повышающих пропускную и провозную способность отдельных железнодорожных направлений без капитального переустройства, мероприятий по повышению грузоподъемности эксплуатируемых мостов и по продлению срока службы постоянных устройств и оборудования железных дорог, усовершенствованию погрузочно-разгрузочных механизмов, ускорению маневровой и сортировочной работы на станциях.

Особый интерес в научном отношении представляла собой разработка резервных и дублирующих устройств на железных дорогах не только прифронтовой, но и тыловой зоны. Заблаговременное оснащение железных дорог такими устройствами связи, СЦБ, экипировочного и прочего тягового хозяйства позволило бы бесперебойно поддерживать нормальную эксплуатацию на тыловых и фронтовых линиях

даже при наличии разрушений отдельных сооружений и устройств.

Сотрудниками научно-исследовательского института выполнялись задачи по установлению методов использования деформированного рельсового и мостового металла и по изучению технических свойств этого металла после его исправления. Уже законченные в значительной степени лабораторные исследования этого вопроса доказали возможность широкого использования металла после правки изогнутых рельсов. Институтом дополнительно были разработаны дефектоскопы специального типа для обследования состояния деформированного металла после его выправления.

В целях обмена опытом по развертыванию и работе отдельных научно-корреспондентских пунктов, редакция журнала «Техника железных дорог» организовала специальную рубрику «По научно-корреспондентским пунктам ЦНИИ», в которой освещалась деятельность работников дорог и научных корреспондентов на местах, например предложения о развитии деятельности научно-корреспондентских пунктов, результаты внедрения научно-технических разработок, привлечение передовых инженерно-технических работников и стахановцев дорог к разработке вопросов новой техники и пр. [5, с. 31].

Так, созданный при Управлении Ташкентской железной дороги научно-корреспондентский пункт ЦНИИ под руководством инженера А. И. Хомякова развернул большую экспериментально-исследовательскую работу по эксплуатационной проверке и внедрению ряда мероприятий, разработанных Институтом. К таким мероприятиям следует отнести, прежде всего, применение ряда заменителей: антинакипинов, свинцовистой бронзы для буксовых подшипников и плавающих втулок, эмульсий гудронов для паровозов, неметаллической кровли товарных вагонов, минеральной шерсти для теплоизоляции паровых котлов и пр. Проводились эксплуатационные испытания аппаратуры для уплотнения стальных проводов, а также испытания автоматического тормозного башмака. В работу пункта были вовлечены также научные работники Ташкентского и Харьковского институтов инженеров железнодорожного транспорта.

В Западной Сибири было проведено объединение научно-корреспондентских пунктов управления Томской железной дороги, треста Сибстройпуть и треста стройматериалов в единый корреспондентский пункт при управлении Томской железной дороги под руководством заместителя начальника дороги инженера Наумова. Этот пункт объединил также научных работников транспортных втузов г. Новосибирска. Объединенный научно-корреспондентский пункт разрабатывал метод анализа эксплуатационной работы

железных дорог, изучал опыт грунтоблочного строительства и применения стройматериалов из местного сырья, а также вел серьезную работу в области СЦБ и электрической тяги. Пункт принял на себя наблюдение за опытными конструкциями верхнего строения пути из 50-килограммовых рельсов. План работ пункта на 1943 г. включал 11 научных тем.

На Кировской железной дороге научно-корреспондентский пункт ЦНИИ начал работать с января 1943 г. под руководством инженера А.И. Гамаюнова. Пункт вел 11 научных тем с преобладанием строительно-путевых вопросов, в том числе разработки проектов искусственных сооружений облегченных железных дорог, техники подъема пролетных строений и опускания их на опоры простейшими средствами, а также обобщения опыта по изготовлению путевых скреплений и инструмента в дистанционных мастерских и разработки таблиц минимальных радиусов кривых для пропуска локомотивов разных серий.

На железной дороге им. Л. М. Кагановича научным корреспондентом ЦНИИ инженером В.Я. Аршанским была выполнена работа на тему «Оздоровление и улучшение рельсовых цепей», в которой были освещены причины неустойчивой работы рельсовых цепей постоянного и переменного тока, даны характеристики цепей в конкретных эксплуатационных условиях, приведен перечень мероприятий, осуществленных на дороге по улучшению действия рельсовых цепей при пониженном сопротивлении балласта и при значительных колебаниях частоты и напряжений.

Научный корреспондент ЦНИИ инженер Демченко, работающий на Томской железной дороге, выполнил по своей инициативе работу «Предварительный анализ работы колесных пар с тонкими бандажами». Помимо этого, он провел исследование влияния разности в высотах рессорного подвешивания на буксовку отдельных осей электровоза и неравномерности нарастания проката в этих условиях, а также наблюдения за работой двухслойных (сталь-бронза) моторно-якорных подшипников и цельнобронзовых моторно-осевых подшипников без баббитовой заливки, за эксплуатацией якорных подшипников с заливкой баббитом центробежным способом и за венцами с трещинами в зубцах, заваренными качественными электродами.

На страницах журнала «Техника железных дорог» были отмечены некоторые особо успешные работы. В частности, в 1943 г. сообщалось об успехах научно-корреспондентского пункта на Кировской железной дороге [6, с. 29]:

1. Кандидат технических наук, доцент, инженер-майор И.П. Граве выполнил исследование на тему «Разработка таблиц минимальных радиусов железнодорожных кривых для пропуска локомотивов серий О, Щ, Э, СО и ВЛ и конструкции верхнего строения

пути». В работе обоснована возможность применения железнодорожных кривых минимальных радиусов специальной конструкции (с двумя или с одним контррельсом) как для нужд восстановления, так и для временного базирования учреждений НКО на фронтовых и прифронтовых железных дорогах. При устройстве минимальных радиусов предполагался пропуск по кривым не только локомотивов, но и железнодорожных составов. Срочность укладки отдельных тупиков, веток или подходов как при восстановлении мостов, так и при восстановлении мест разрушения железнодорожного пути, поврежденного налетами вражеской авиации, в тяжелых топографических условиях и в трудных условиях плана и профиля дороги в большинстве случаев зависит от объема работ, главным образом, по возведению земляного полотна для вновь устраиваемого пути. Применение кривых минимального радиуса позволяет в ряде случаев значительно уменьшить сроки строительных работ и их трудоемкость. При этом предполагается, что как служба пути и военно-восстановительная служба дороги, так и Управление военно-восстановительных работ фронта будут заранее иметь сборные звенья кривых специальной конструкции применительно к обращающемуся на данной дороге паровозу. Укладка такого специального пути в кривых на место и его сборка займут немного времени (не более того, которое необходимо для укладки кривой обыкновенной конструкции — без контррельсов). Конструкции кривых предусматривают возможность (путем введения того или иного числа звеньев кривой) собирать кривые разных центральных узлов, соответствующих требованиям каждого конкретного случая. В работе использован как метод Холла (Hall) для предварительного вписывания, так и точные методы расчетов элементов рельсовой и контррельсовой колеи, необходимые при определении элементов кривых с контррельсами. В работе автора впервые применен метод предварительного вписывания по Холлу для кривых с двумя контррельсами. В этом случае вместо рельсовой колеи автор исходит из ширины желоба контррельсов и максимальной ширины реборды. В работе рассмотрены все этапы расчета и конструирования кривых малых радиусов. Конструкции кривых исключительно просты и почти не требуют изготовления специальных деталей.

2. Инженер Руколайнен ко Дню железнодорожника закончил проект разборного пролетного строения для форсированного восстановления искусственных сооружений и для воронок в земляном полотне железнодорожного пути. Пролетное строение состоит из двутавровых балок № 60а (по одной балке под каждую рельсовую нить), усиленных шпренгелем. По длине пролетное строение состоит из отдельных

блоков, из которых могут монтироваться восемь различных пролетных строений, начиная с 1,4 и до 15,4 м через каждые два метра. Стык шпренгельной балки перекрывается при помощи двух фасонных накладок, приваренных к двутавровым балкам, и скрепляется четырьмя болтами. Шпренгель запроектирован также разборным. Вес металла пролетного строения в два раза меньше обычных пролетных строений. Оно может производиться в собранном и разобранном виде. Для монтажа такого пролетного строения, например при перекрытии им воронки в земляном полотне при расчетном пролете 15,4 м потребуется 1,5 часа. Отличительной особенностью этого пролетного строения является то, что для него не требуется мостовых брусев, а путевые рельсы укладываются непосредственно на полки двутавров и прикрепляются к ним при помощи специальных подкладок.

Не редки были и инициативные работы научных корреспондентов, опубликованные на страницах журнала (фото 2).

Обсуждение. С организационной точки зрения создание сети научно-корреспондентских пунктов фактически означало переход от централизованной и регламентированной научной деятельности мирного времени к менее формализованной и инициативной военного периода, реализуемой максимально оперативно, как говорится, «с колес». Для этого железнодорожная наука по собственной инициативе и на постоянной основе стала действовать на предельно практических и очень важных на тот момент участках: в депо, мастерских, в восстановительных подразделениях.

Институт оперативно организовал ряд научных бригад и направил их непосредственно на железные дороги для оказания помощи восстановительным ор-

ганизациям и для изучения опыта их работы на местах. Эти бригады были обеспечены подвижными лабораториями, мостовыми и путевыми испытательными станциями.

Своеобразным подведением промежуточных итогов создания сети научно-корреспондентских пунктов можно считать совещание научных работников Института и высших технических учебных заведений железнодорожного транспорта, которое состоялось 20–25 ноября 1944 г. в ЦНИИ НКПС. В работе совещания приняли участие также руководители дорожных научно-корреспондентских пунктов Института и представители оперативных управлений НКПС [7, с. 31].

На этом совещании планировалось установить связь и взаимодействие между транспортными вузами и институтом, а также рассмотреть планы научно-исследовательской деятельности вузов на 1945 г. Совещание основывалось на приказе № 527/Ц о повышении организующей роли ЦНИИ в деле усиления и улучшения научно-исследовательской работы во вузах и на железнодорожном транспорте в целом. На совещании заместитель директора ЦНИИ профессор Е. В. Михальцев констатировал, что отсутствие во вузах лабораторной базы во многих случаях может быть восполнено работой в депо, на участке и на дистанции.

По всей вероятности, данное совещание фактически означало, что ЦНИИ выступал координатором всей железнодорожной науки страны. Немаловажную роль в этом сыграли научно-корреспондентские пункты, которые ситуативно объединили научно-исследовательскую работу учебных заведений, план ЦНИИ и исследования дорожных исследовательских организаций.

ИНИЦИАТИВНЫЕ РАБОТЫ НАУЧНЫХ КОРРЕСПОНДЕНТОВ

Ряд научных корреспондентов прислал в институт свои инициативные работы. Наибольшую активность в этом отношении проявили научные корреспонденты Восточно-Сибирской ж. д., которые выполнили следующие работы: т. Буц — «Испытание тиритовых разрядников», т. Голиков — «Использование проводов постанционной связи для дальних переговоров». Тов. Зельманов прислал статью «Получение жидкого топлива из сапропелитовых углей» и т. Пчёлкин — статью об интересном опыте постройки свайно-ледяной переправы.

В своей работе инж. Буц предлагает использовать для испытания тиритовых разрядников кенотронную установку модели ТУ-180 на величину тока утечки и на пробивное напряжение искрового промежутка, с тем чтобы обеспечить выполнение требований, указанных в нормативном листе СЦБ БВ/005. В этом смысле предложение, действительно, достигает поставленной цели достаточно простыми средствами и может быть поэтому рекомендовано для распространения на дорогах сети. Однако вызывает сомнение само требование указанного нормативного листа,

чтобы испытание искрового промежутка производилось именно переменным напряжением. Если те же испытания проводить на постоянном напряжении, то кенотронная установка может быть использована без каких бы то ни было переделок.

В связи с работой инж. Буц институт запросил Центральное управление связи НКПС о возможности дополнения указанного нормативного листа листом по испытанию тиритовых разрядников на постоянном напряжении от кенотронной установки.

Фото 2. Заметка в номере журнала «Техника железных дорог»²

Photo 2. Note in the Railway Engineering journal

² Инициативные работы научных корреспондентов. Техника железных дорог. 1943. № 9. С. 30.

Другими словами, организационное решение о создании сети научно-корреспондентских пунктов косвенно признавалось удачным. Очевидно, этому способствовало несколько факторов:

1. Организационная гибкость ЦНИИ, а также сочетание, с одной стороны, централизации научных ресурсов, и, с другой стороны, поддержка руководством Института научной инициативы исследовательских бригад. Практика показала, что создание сети научно-корреспондентских пунктов было обоснованным и продуманным.

2. Острая потребность железных дорог страны в нестандартных решениях по восстановлению путей, по изысканиям заменителей строительных материалов и т. д. Наблюдалась готовность немедленно применять разработки научных сотрудников Института. Известно, что в стабильных условиях производственный менеджмент среднего звена достаточно индифферентен к новым научным исследованиям и разработкам, так как они способны нарушить налаженный производственный процесс (как минимум на стадии внедрения). Так, профессор С. В. Валдайцев полагал, что эта категория управленцев «почти всегда против радикальных инноваций» [8, с. 22]. Между тем военная обстановка требовала именно радикальных инноваций и менеджмент среднего звена оказался в этом крайне заинтересован.

3. Организационная поддержка со стороны НКПС, командиров дорог, профессорско-преподавательского состава институтов железнодорожного транспорта.

Создание сети научно-корреспондентских пунктов, на наш взгляд, можно рассматривать как очень редкий, а может быть и уникальный случай, когда в максимально разбалансированной ситуации смогли оперативно объединиться академическая наука, вузовский преподавательский корпус и производственники, что принесло значимые для страны результаты. Вряд ли их совместная слаженная работа могла быть возможна в стабильной рутинной ситуации. Опыт функционирования пунктов показывает, что в тех случаях, когда привычные шаблоны производственной деятельности перестают функционировать, возникает объективная потребность в новых, научно обоснованных решениях, что при грамотном государственном управлении может привести к положительной трансформации отрасли.

Тот факт, что централизация железнодорожной науки под оперативным руководством ЦНИИ сочеталась с возможностью инициативных исследований пунктов, говорит о появлении новой формы организации научной деятельности. Основной корпус ученых Института сосредотачивался на выполнении

наиболее сложной, наукоемкой части исследований и разработок, а научные бригады — на прикладных аспектах.

Следующим организационным шагом должна была стать трансформация наиболее передовых научно-корреспондентских пунктов в филиалы Института с собственной лабораторной базой и постоянным штатом научных работников. Этот аспект требует отдельного рассмотрения.

Заключение. Во время Великой Отечественной войны стало ясно, что отсутствие на дорогах и на крупнейших предприятиях железнодорожного транспорта научно-исследовательских ячеек в значительной степени снижало эффект работы научно-исследовательских учреждений, так как даже самые ценные работы институтов не внедрялись на местах из-за отсутствия специальных организаций, которые занимались бы проблемами освоения новой техники, внедрения новых конструкций и предложений с одновременным приспособлением этих конструкций применительно к требованиям производства.

Одновременно с этим тематика научно-исследовательских учреждений имела тенденцию к академичности, отсутствовало единое планирование научной деятельности научно-исследовательских институтов и вузов (попытка такой увязки планов была проведена в 1941 г.), к научным исследованиям не привлекалась сеть дорожных, деповских, заводских и строительных лабораторий.

Создание научно-корреспондентских пунктов в 1942–1945 гг. позволило железнодорожной науке серьезно продвинуться в этих вопросах. Были продуманы и незамедлительно воплощены принципиально новые способы организации науки, что повлекло за собой каскад научных исследований, изобретений, проектов. Даже сегодня, спустя более 80 лет, совершенно актуально звучат слова тех лет: «Научное творчество... должно вызвать к жизни новые решения, отвечающие условиям военного времени. ...Научно-теоретическое обобщение опыта должно быстро претворяться в наиболее четкую документацию для широкого пользования в виде инструкций, указаний, наставлений»³.

Другими словами, на примере научно-корреспондентских пунктов наблюдается организационный прецедент: централизация институтов под эгидой ЦНИИ сочеталась с инициативой на местах, научные исследования — с неотложными задачами дорог, ускоренное накопление новых знаний — с их продвижением через специализированный научный журнал.

Это очень важный опыт отечественной железнодорожной науки, который требует углубленного изучения и популяризации.

³ Техника железных дорог. 1942. № 1. С. 2

Финансирование: автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

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

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Горинов А. В. Развернуть научную работу на железных дорогах // Техника железных дорог. 1942. № 3–4. С. 1–5.
Gorinov A. V. Expand scientific work on railways. *Railway engineering*. 1940;(3–4):1–5.
2. Саранцев П. Л. О работе научно-корреспондентских пунктов ЦНИИ на дорогах СССР // Техника железных дорог. 1944. № 9. С. 30.
Sarantsev P. L. About the work of the scientific correspondent points of the Central Research Institute on the roads of the USSR. *Railway engineering*. 1944;(9):30.
3. Смит Ч. Железные дороги и научная работа // Railway purchases and Stores. 1940. № 14.
Smith Ch. Railways and scientific work. *Railway purchases and Stores*. 1940;14.
4. Создание научно-корреспондентских пунктов на железнодорожном транспорте // Техника железных дорог. 1942. № 1–2. С. 34.
Creation of scientific correspondent points in railway transport. *Railway engineering*. 1942;(1–2):34.
5. По научно-корреспондентским пунктам ЦНИИ // Техника железных дорог. 1943. № 6. С. 31.
Along the scientific correspondent point of the Central Research Institute. *Railway engineering*. 1943;(6):31.
6. Гамаюнов А. Работы пункта на Кировской ж.д. // Техника железных дорог. 1943. № 9. С. 29.
Gamayunov A. The work of the point on the Kirov railway. *Railway engineering*. 1943;(9):29.

7. Левин С. Н. Итоги совещания научных работников ЦНИИ и вузов // Техника железных дорог. 1944. № 12. С. 31–32.

Levin S. N. Results of the meeting of researchers from the Central Research Institute and Higher education institutions. *Railway engineering*. 1944;(12):31–32.

8. Валдайцев С. В. Инновации: асимметрия интересов владельцев и менеджмента фирмы // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2012. Серия 5. Вып. 1. С. 20–29. EDN: <https://www.elibrary.ru/oqsjwz>.

Valdaytsev S. V. Innovations: asymmetries between of shareholders and managers interests. *St. Petersburg University Journal of Economic Studies*. 2012;5(1):20–29. EDN: <https://www.elibrary.ru/oqsjwz>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Игорь Васильевич АНОХОВ,

канд. экон. наук, доцент, начальник научно-издательского отдела, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 260787, <https://orcid.org/0000-0002-5983-2982>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Igor V. ANOKHOV,

Cand. of Sci. (Econ.), Associate Professor, Head of the Scientific Publishing Department, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 260787, <https://orcid.org/0000-0002-5983-2982>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 02.06.2025, рецензия от первого рецензента получена 04.06.2025, рецензия от второго рецензента получена 06.06.2025, принята к публикации 09.06.2025.

The article was submitted 02.06.2025, first review received 04.06.2025, second review received 06.06.2025, accepted for publication 09.06.2025.