



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

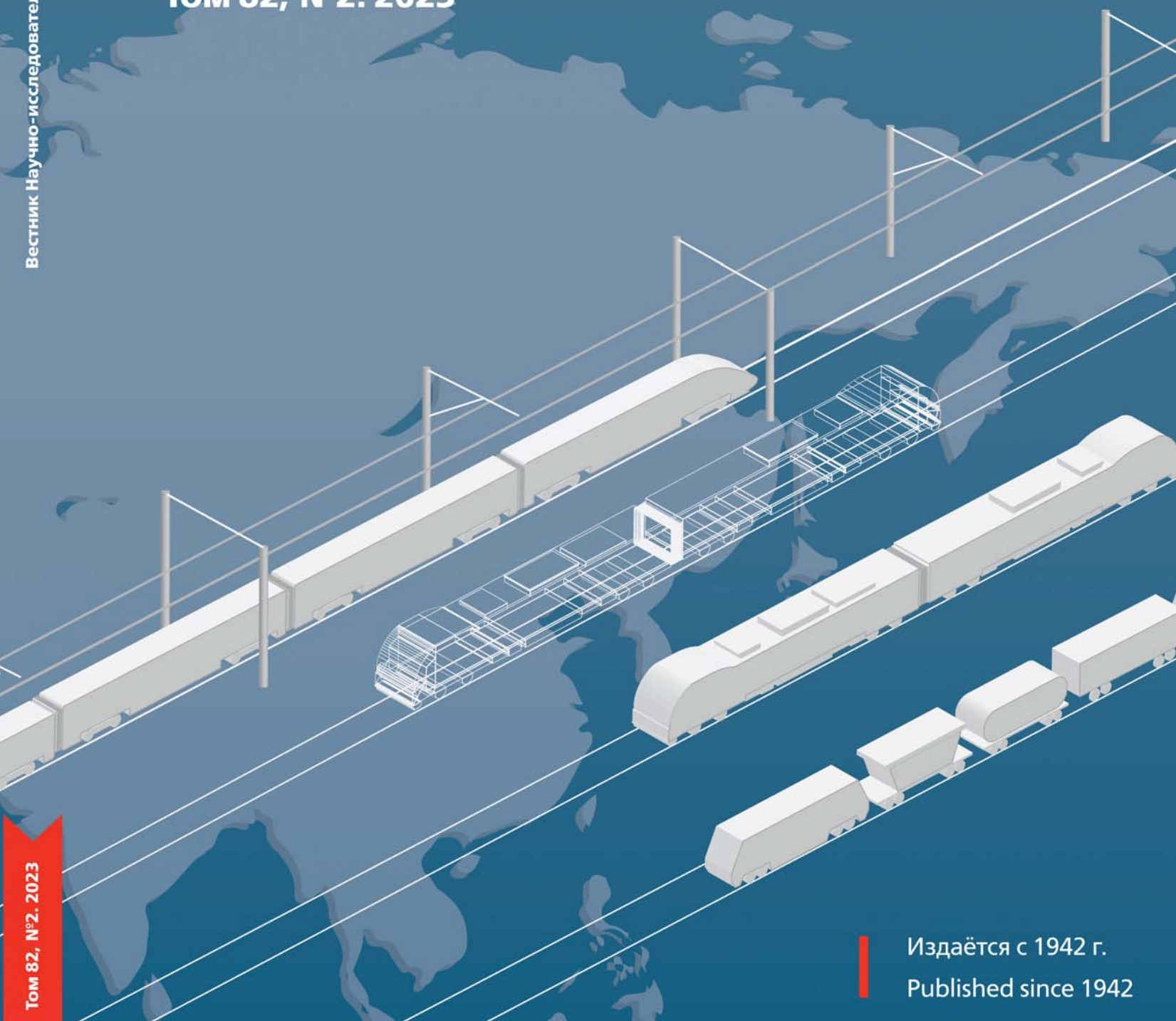


ВЕСТНИК НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL

Том 82, №2. 2023

Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта



Том 82, №2. 2023

Издаётся с 1942 г.
Published since 1942

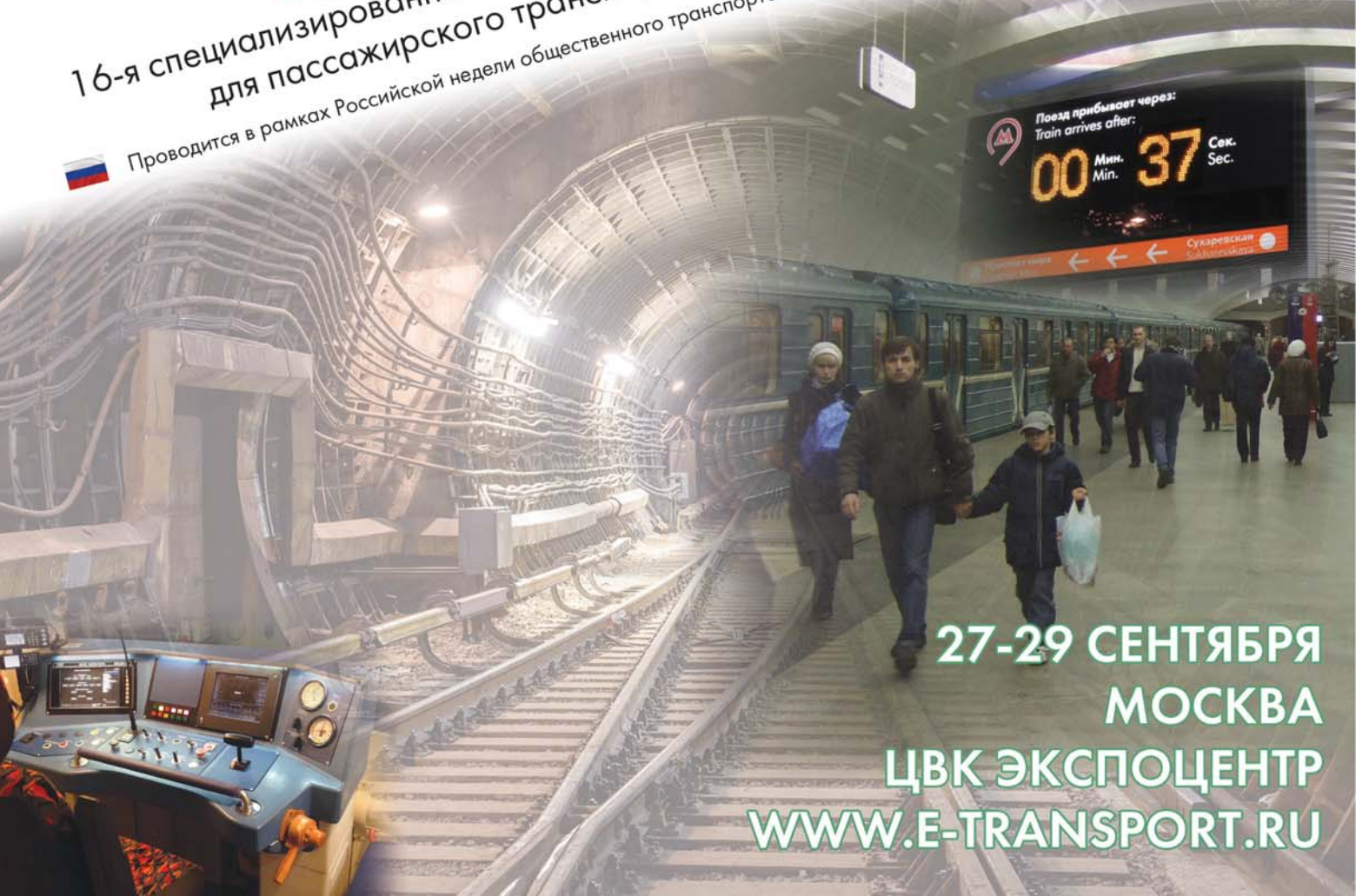


ЭЛЕКТРОНИКА ТРАНСПОРТ 2023

16-я специализированная выставка электроники и информационных технологий
для пассажирского транспорта и транспортной инфраструктуры



Проводится в рамках Российской недели общественного транспорта и городской мобильности www.publictransportweek.ru



27-29 СЕНТЯБРЯ
МОСКВА

ЦВК ЭКСПОЦЕНТР
WWW.E-TRANSPORT.RU

ISSN 2223-9731 (Print)
ISSN 2713-2560 (Online)
DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-2

ВЕСТНИК
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
(ВЕСТНИК ВНИИЖТ)

RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL
(VESTNIK VNIIZHT)

ТОМ 82, № 2. 2023

Учредитель:
АО «Научно-исследовательский
институт железнодорожного транспорта»

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

Издатель:
Издательский дом «ИПП «КУНА»,
125167, Российская Федерация,
Москва, Ленинградский пр., д. 47, стр. 4
Тел. +7 (495) 795-02-97

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

Founder:
Railway Research Institute

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

Publisher:
JSC "IPP "KUNA",
47, bldg. 4, Leningradskiy Ave., Moscow, 125167,
Russian Federation. Tel.: +7 (495) 795 0297

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

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

© АО «ВНИИЖТ», 2023

Цель журнала «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» — 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



ЖУРНАЛ ЯВЛЯЕТСЯ ЧЛЕНОМ

Директории журналов открытого доступа (DOAJ)



Агентства 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

The aim of the Russian Railway Science Journal 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



THE JOURNAL IS A MEMBER OF

the Directory of Open Access Journals (DOAJ)



the 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., первый заместитель генерального директора АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 352781, <https://orcid.org/0000-0001-9684-036X>

Заместитель главного редактора

Римская Ольга Николаевна, канд. экон. наук, доцент, АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 583440, <https://orcid.org/0000-0002-1548-0815>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Гогричиани Георгий Венедиктович, д-р техн. наук, АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 762111, <https://orcid.org/0000-0001-8586-8068>

Дунаев Олег Николаевич, д-р экон. наук, проф., заместитель председателя Комитета РСПП по международному сотрудничеству, 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>

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>

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

Мугинштейн Лев Александрович, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 762110, <https://orcid.org/0000-0002-7894-7435>

Савин Александр Владимирович, д-р техн. наук, доцент, РУТ (МИИТ), 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>

Сювэй Ли, д-р наук, проф., Пекинский объединенный университет, Пекин, КНР

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>

Шимановский Александр Олегович, д-р техн. наук, проф., Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, 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

Лёвин Борис Алексеевич, д-р техн. наук, проф., президент РУТ (МИИТ), 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

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, e-mail: anokhov.igor@vniizht.ru, **Сиротенко Игорь Васильевич**, научный редактор, e-mail: sirotenko.igor@vniizht.ru, **Смирнова Анна Александровна**, выпускающий редактор, e-mail: smirnova.anna@vniizht.ru, **Редина Анна Эдуардовна**, специалист, e-mail: redina.anna@vniizht.ru, **Барашков Владислав Владимирович**, специалист по графическому дизайну, e-mail: barashkov.vladislav@vniizht.ru

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

Подписано к печати 23.06.2023. Формат бумаги 60×90 1/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 11,25. Тираж 300 экз. Заказ 343. Цена свободная

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

Olga N. Rimskaya, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 583440, <https://orcid.org/0000-0002-1548-0815>

EDITORIAL BOARD

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

Georgiy V. Gogrichiani, Dr. Sci. (Eng.), Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 762111, <https://orcid.org/0000-0001-8586-8068>

Oleg N. Dunaev, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Russian Union of Industrialists and Entrepreneurs, Chairman of Subcommittee for Transport and Logistics, Committee for International Cooperation, 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>

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>

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

Lev A. Muginshtein, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 762110, <https://orcid.org/0000-0002-7894-7435>

Alexander V. Savin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector of the Russian Transport University, 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>

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

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

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

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

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

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

Boris A. Levin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President of the Russian University of Transport 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

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, e-mail: anokhov.igor@vniizht.ru,
Igor V. Sirotenko, Scientific Editor, e-mail: sirotenko.igor@vniizht.ru, **Anna A. Smirnova**, Publishing Editor, e-mail: smirnova.anna@vniizht.ru,
Anna E. Redina, Specialist, e-mail: redina.anna@vniizht.ru, **Vladislav V. Barashkov**, Graphic Designer, e-mail: barashkov.vladislav@vniizht.ru

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

Signed to print on 23.06.2023. Format is 60×90 1/8. Offset printing. 11.25 printed sheets. 300 copies. Order No. 343. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Виртуальный стенд для определения тепловых характеристик вакуумных теплоизоляционных панелей А. Н. Балалаев, М. А. Паренюк	99–108
Влияние силовой характеристики поглощающих аппаратов на продольную динамику электропоезда и многоцикловую усталость сцепки В. И. Беляев	109–116
Оценка кососимметричной нагрузки, действующей на раму тележки грузового вагона при сходе колеса с рельса Г. И. Гаджиметов	117–126
О применении численных методов для анализа магнитного поля в тяговых электрических машинах переменного тока А. С. Зуев, М. Д. Глущенко	127–134
Оценка ударной прочности корпуса тягового редуктора высокоскоростного электропоезда с учетом скорости деформации материала Е. К. Рыбников, С. В. Володин, Т. О. Вахромеева	135–145
Проектирование конструкции моноблочных крестовин для тяжелых условий эксплуатации П. В. Трегубчак	146–156
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ	
Нейросетевой подход к изучению функционирования системы курсирования кольцевых маршрутных поездов А. Л. Казаков, Р. Ю. Упырь, А. Д. Доможирова	158–167
Моделирование организации технологических процессов по содержанию геометрии рельсовой колеи А. А. Севостьянов, Д. В. Величко	168–176

CONTENTS

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Virtual test bench for the determination of the thermal properties of vacuum insulation panels

Anatoly N. Balalaev, Maria A. Parenjuk 99–108

Effect of the load-bearing characteristics of the cushions on the longitudinal dynamics of the electric trains and the high-cycle fatigue of coupling

Vladimir I. Belyaev 109–116

Assessment of the axisymmetric load acting on the bogie frame of a wagon during derailment

Gadzhimet I. Gadzhimetov 117–126

Application of numerical methods to the analysis of the magnetic field in AC traction machines

Alexander S. Zuev, Mikhail D. Glushchenko 127–134

Evaluation of the impact strength of the traction gearbox housing for the traction of a high-speed electric train in terms of deformation rate of the material

Evgeniy K. Rybnikov, Sergey V. Volodin, Tatiana O. Vakhromeeva 135–145

Design of monoblock crossing for heavy operating conditions

Pavel V. Tregubchak 146–156

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Neuronal network approach to study the operation of shuttle-service trains

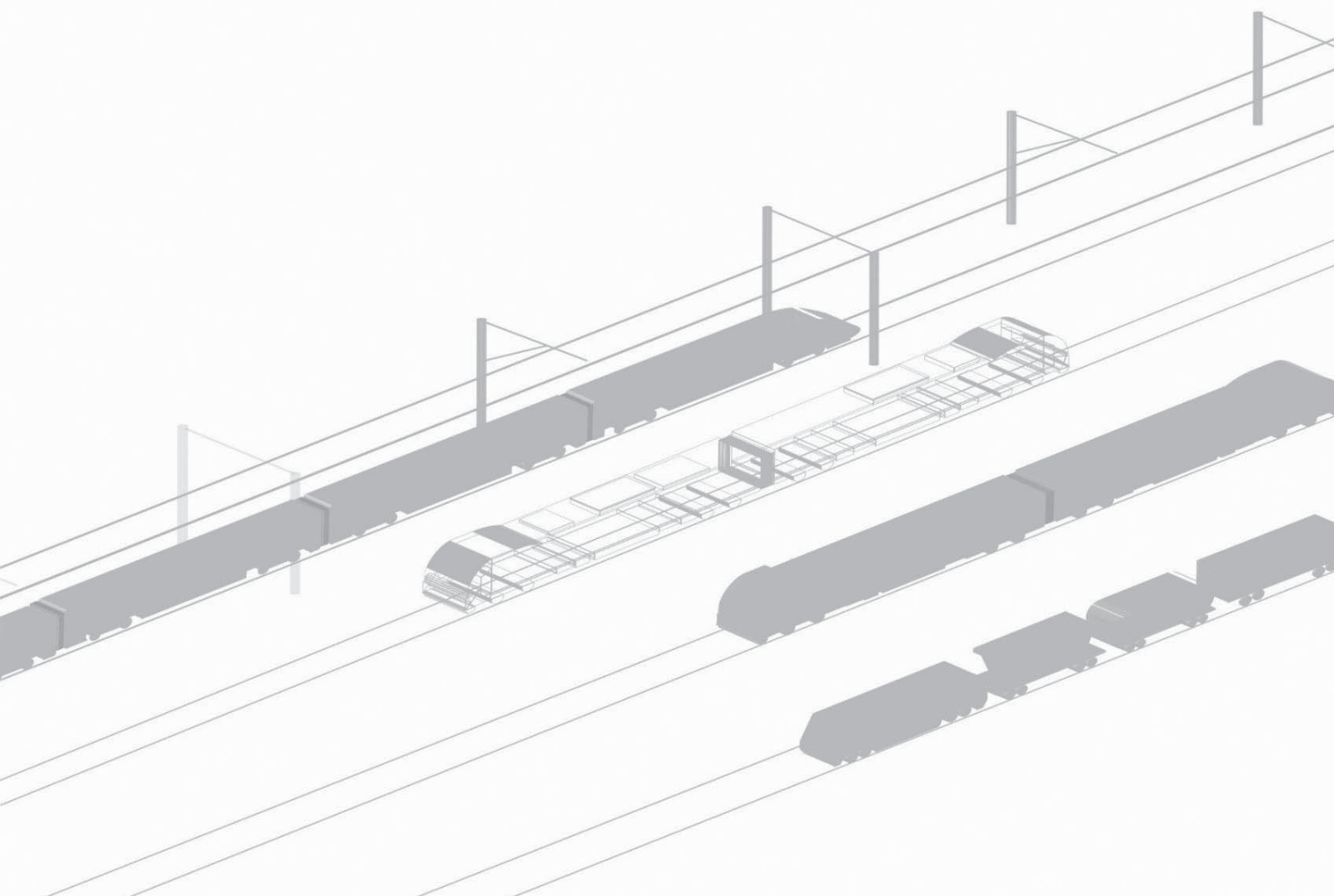
Alexander L. Kazakov, Roman Yu. Upyr, Alena D. Domojirova 158–167

Process organisation modelling for maintaining rail track geometry

Alexander A. Sevostyanov, Dmitriy V. Velichko 168–176

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT



Оригинальная статья

УДК 629.463.12:629.4.016.15

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-99-108>EDN: <https://elibrary.ru/mpvfgh>

Виртуальный стенд для определения тепловых характеристик вакуумных теплоизоляционных панелей

А. Н. Балалаев✉, М. А. Паренюк

Самарский государственный университет путей сообщения,
Самара, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлены результаты экспериментального исследования теплоизоляционных характеристик вакуумных панелей с использованием цифровой копии стенда. Объектом исследования является вакуумная теплоизоляционная панель, образованная в виде герметичного корпуса в форме параллелепипеда с ребрами жесткости внутри. При пониженном давлении воздуха внутри корпуса удельное тепловое сопротивление таких вакуумных теплоизоляционных панелей становится больше удельного теплового сопротивления современных теплоизоляционных материалов. При использовании таких панелей в качестве теплоизоляции наземных транспортных средств, в частности пассажирских и рефрижераторных железнодорожных вагонов, можно достичь значительного снижения затрат энергии на отопление или кондиционирование внутреннего помещения. Экспериментальное определение тепловых характеристик вакуумных теплоизоляционных панелей из-за их существенной неоднородности сопряжено со значительными затратами времени и использованием дорогостоящего оборудования. Цель исследования заключается в разработке способа определения теплового сопротивления теплоизоляционных материалов с внутренней неоднородностью за минимальное время с приемлемой точностью.

Материалы и методы. Методы исследования сочетают физический эксперимент над тремя опытными образцами вакуумной теплоизоляции и численный эксперимент над 3D-моделями этих образцов. В частности, для тарирования экспериментального стенда использовался его цифровой аналог — виртуальный стенд, выполненный в виде 3D-модели в программе SolidWorks.

Результаты. Исследование нестационарного теплового процесса на модели стенда в SolidWorks Simulation позволило сократить время физического эксперимента до 40 мин и установить значения эффективного коэффициента теплопроводности трех опытных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей.

Обсуждение и заключение. Исследование стационарного теплового процесса 3D-моделей опытных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей в программе SolidWorks Simulation показало, что расхождение между опытными и расчетными значениями эффективного коэффициента теплопроводности составляет менее 5 %. Предлагаемый метод определения эффективного коэффициента теплопроводности материалов может использоваться при входном и выходном контроле теплоизоляции пассажирского вагона во время капитального ремонта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пассажирские вагоны, изотермические вагоны, вакуумные теплоизоляционные панели, коэффициент теплопроводности, виртуальный стенд, нестационарный тепловой процесс

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Балалаев А. Н., Паренюк М. А. Виртуальный стенд для определения тепловых характеристик вакуумных теплоизоляционных панелей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 2. С. 99–108. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-99-108>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.463.12:629.4.016.15

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-99-108>

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



Virtual test bench for the determination of the thermal properties of vacuum insulation panels

Anatoly N. Balalaev✉, Maria A. Parenjuk

Samara State Transport University,
Samara, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors present the results of an experimental study of the thermal insulation properties of vacuum panels using a digital copy of the test bench. The subject of the study is a vacuum insulation panel in the form of a sealed parallelepiped with internal stiffeners. When the air pressure inside the body is reduced, the specific thermal resistance of such vacuum insulation panels becomes higher than that of modern insulation materials. The use of such panels as thermal insulation for land means of transport, particularly passenger carriages and refrigerator wagons, significantly reduces energy costs for heating or air conditioning the interior. Experimental determination of the thermal properties of vacuum insulation panels is time consuming and requires expensive equipment due to their considerable heterogeneity. The aim of the study is to develop a method for determining the thermal resistance of insulating materials with internal heterogeneity in the shortest possible time with acceptable accuracy.

Materials and methods. The research methods combine physical experiments on three vacuum insulation panel prototypes and numerical experiments on 3D models of these samples. Specifically, the test stand was calibrated using its digital counterpart — a virtual test bench created as a 3D model using SolidWorks software.

Results. The study of the transient thermal process on the stand model in SolidWorks Simulation allowed us to reduce the time of the physical experiment to 40 minutes and to determine the values of the effective thermal conductivity coefficient of the three vacuum insulation panel prototypes.

Discussion and conclusion. The study of the steady-state thermal process of 3D models of vacuum insulation panel prototypes in SolidWorks Simulation showed that the discrepancy between the experimental and calculated values of the effective thermal conductivity coefficient is less than 5%. The proposed method for determining the effective thermal conductivity coefficient of materials is suitable for use in the incoming and outgoing inspection of car insulation during overhaul.

KEYWORDS: passenger carriage, refrigerator vans, vacuum insulation panels, thermal conductivity coefficient, virtual test bench, transient thermal process

FOR CITATION: Balalaev A. N., Parenjuk M. A. Virtual test bench for the determination of the thermal properties of vacuum insulation panels. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(2):99-108. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-99-108>.

✉ wagon.samgaps@mail.ru (A. N. Balalaev)

Введение. Наземные транспортные средства, например пассажирские или изотермические железнодорожные вагоны, в условиях эксплуатации Российской Федерации должны иметь в конструкции стенок кузова теплоизоляционные материалы с максимально большим тепловым сопротивлением. Современные теплоизоляционные материалы, используемые в конструкции стенок кузовов пассажирских вагонов, обеспечивают величину коэффициента теплопередачи не более $1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [1]. Увеличение удельного теплового сопротивления стенок кузова приводит к снижению затрат энергии на отопление железнодорожного вагона в зимнее время и на кондиционирование в летнее время года. Однако при этом возрастает толщина теплоизоляции, что увеличивает стоимость изготовления кузова железнодорожного вагона и уменьшает его полезный объем.

Для увеличения удельного теплового сопротивления стенок кузова пассажирских и изотермических железнодорожных вагонов в [2] предложено использовать вакуумные теплоизоляционные панели сотовой структуры [3]. Вакуумная теплоизоляционная панель представляет собой герметичную конструкцию из двух пластин, между которыми расположены ребра жесткости сотовой структуры. При создании внутри панели вакуума с остаточным давлением менее 3 кПа, согласно расчетам, удельное тепловое сопротивление таких вакуумных теплоизоляционных панелей становится больше удельного теплового сопротивления современных теплоизоляционных материалов [2]. Однако экспериментальное определение удельного теплового сопротивления таких панелей вызывает значительные трудности из-за длительного времени достижения стационарного теплового режима, на котором проводятся исследования теплоизоляционных свойств материалов с использованием различных методов, рекомендуемых в британских, европейских и американских стандартах определения теплоизоляционных свойств: метода огражденного нагретого ящика [4], метода измерения теплового потока [5], метода калиброванного нагретого ящика [6–10]. В ряде работ показаны недостатки этих методов, заключающиеся в длительности выхода на стационарный режим [11–15]. Более быстрые методы, например обратный метод, требуют использования сложной и дорогостоящей аппаратуры, например инфракрасного термографа [16]. Проблемы определения теплоизоляционных свойств вакуумной теплоизоляции и пути решения этих проблем представлены в работах [17, 18], где использовался метод нагретого ящика и инфракрасный термограф. Согласно [18] выход на стационарный тепловой режим в исследованиях вакуумной теплоизоляции толщиной 15 мм наблюдался через 110–130 мин. При увеличении толщины вакуумной

теплоизоляции можно ожидать увеличения времени выхода на стационарный режим, поэтому более удобным и экономичным по времени проведения эксперимента и типу используемого оборудования является метод регулярного режима, известный с середины прошлого века [19, 20]. Выход на этот режим характеризуется постоянством темпа охлаждения нагретого объекта измерения. Более быстрым методом является экспресс-метод нерегулярного теплового режима, в котором также отмечалось постоянство темпа нагрева [21]. Применение метода эталонов для экспериментального определения удельного теплового сопротивления вакуумной теплоизоляционной панели на режиме постоянного темпа нагрева при постоянной тепловой нагрузке описано в работе [22]. В данном методе от одного источника тепла при постоянной тепловой нагрузке нагревались два эталонных объекта с известной теплопроводностью, один из которых был огражден от атмосферного воздуха слоем теплоизоляции с известными теплоизоляционными свойствами, а другой — исследуемой вакуумной панелью. По разности темпов нагрева двух эталонных объектов определялась величина удельного теплового сопротивления вакуумной панели из экспериментальной зависимости между этими величинами, полученными при замене вакуумной панели на эталонные образцы теплоизоляции с такими же размерами, но разной величиной коэффициента теплопроводности. Недостатком данного метода является сложность подбора эталонных образцов теплоизоляции с нужными свойствами, обеспечивающими подобие тепловых процессов.

Целью настоящего исследования является модернизация метода эталонов [22], заключающаяся в использовании вместо экспериментальной зависимости удельного теплового сопротивления от разности темпов нагрева двух эталонных объектов аналогичной расчетной зависимости, полученной на виртуальном стенде в программе SolidWorks Simulation.

Материалы и методы. Для экспериментального определения удельного теплового сопротивления вакуумной теплоизоляционной панели был разработан стенд, показанный на рис. 1.

Источник постоянного тока 3 служит для передачи электрической мощности нагревателю 1, который нагревает первый 7 и второй 3 эталонные объекты, представляющие собой пластины из алюминиевого сплава 1060 толщиной 3 мм и размещенные с двух сторон нагревателя. В эталонных объектах выполнены пропилы глубиной 2 мм, в которые помещены термодатчики 4 и 6 с толщиной спаев 1 мм. Спаи термодатчиков расположены в геометрических центрах эталонных объектов. Температура эталонных объектов 3 и 7, а также окружающей среды измерялась в экспериментах каждые

2 мин с помощью термопар 4, 6, 8 и регистрировалась с помощью многоканального измерительного прибора 9 (измеритель температуры и влажности фирмы

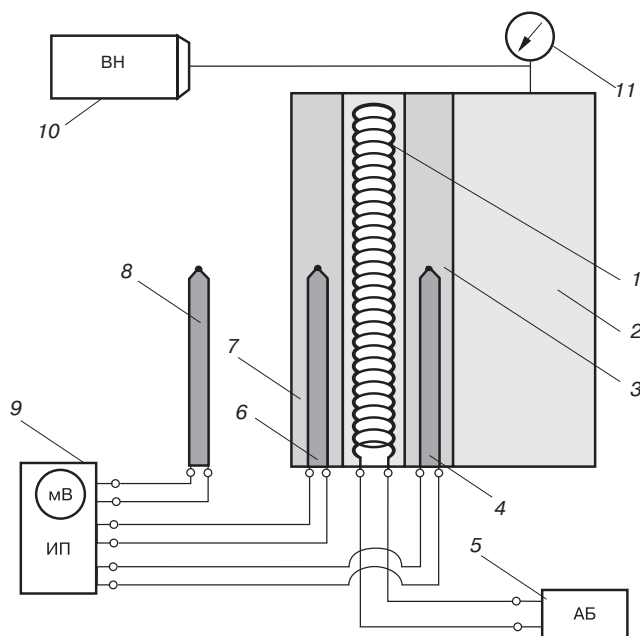


Рис. 1. Стенд для измерения удельного теплового сопротивления теплоизоляционных материалов: 1 — нагреватель; 2 — вакуумная теплоизоляционная панель; 3 — второй эталонный объект; 4, 6, 8 — термопары; 5 — источник электрической энергии (аккумуляторная батарея, 24 В); 7 — первый эталонный объект; 9 — измерительный прибор; 10 — вакуум-насос; 11 — вакуумметр

Fig. 1. Test bench for measuring the thermal resistance of insulating materials: 1 — heater; 2 — vacuum insulation panel; 3 — second prototype; 4, 6, 8 — thermocouples; 5 — electrical energy source (battery, 24 V); 7 — first prototype; 9 — measuring device; 10 — vacuum pump; 11 — vacuum gauge

CENTER). Расположенный с одной стороны нагревателя 1 первый эталонный объект 7 имеет поверхность, охлаждаемую за счет свободной конвекции атмосферным воздухом, а расположенный с другой стороны нагревателя второй эталонный объект 3 защищен от атмосферного воздуха вакуумной теплоизоляционной панелью 2. Вакуум во внутренних полостях вакуумной теплоизоляционной панели создавался с помощью вакуум-насоса 10, давление измерялось вакуумметром 11. Эксперименты показали, что температура первого эталонного объекта 7 растет медленнее, чем температура второго эталонного объекта 3. Сущность способа определения удельного теплового сопротивления вакуумной теплоизоляционной панели заключается в том, что разность скоростей изменения температур первого и второго эталонных объектов зависит от теплового сопротивления вакуумной теплоизоляционной панели.

Для определения удельного теплового сопротивления вакуумной теплоизоляционной панели с использованием стенда, показанного на рис. 1, необходимо получить его тарировочную характеристику. Для ее получения вместо вакуумной теплоизоляционной панели на второй эталонный объект размещалась теплоизоляция с известным коэффициентом теплопроводности и такими же габаритными размерами. На рис. 2 представлены результаты испытания известного теплоизоляционного материала Penoplex, имеющего коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,032 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

По осям ординат зависимостей (рис. 2) отложены величины относительной температуры эталонных объектов, под которой понималась разность между текущими значениями температуры и их первоначальными значениями, с которых начиналась регистрация температуры, $\theta = t_i - t_0$.

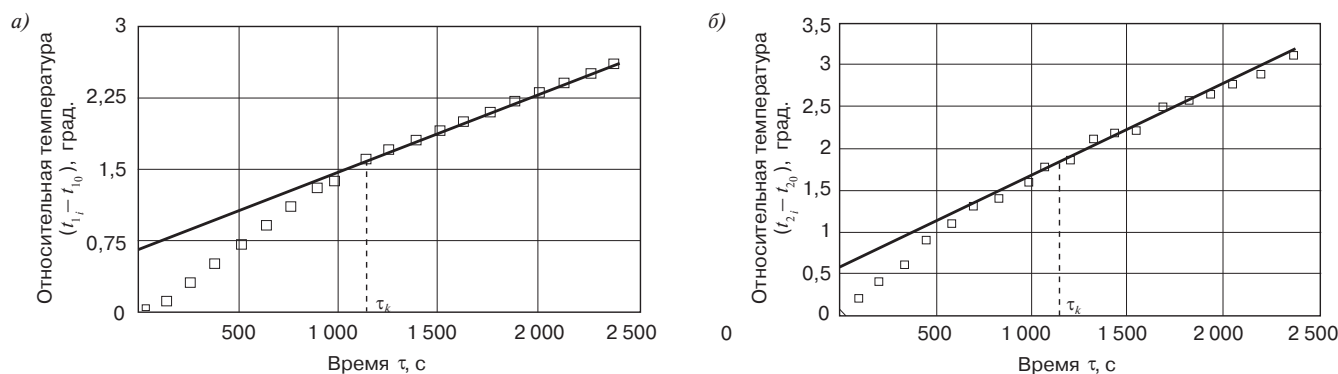


Рис. 2. Регрессионные зависимости относительной температуры первого (а) и второго (б) эталонных объектов от времени в виде полинома первого порядка

Fig. 2. Regression dependences of the relative temperature of the first (a) and second (b) prototypes on time as a first order polynomial

Начиная с некоторого момента времени τ_k , зависимость относительной температуры от времени можно описать полиномами первого порядка. Этот момент времени определялся из условия минимума среднеквадратического отклонения экспериментальных данных от регрессионных зависимостей. Регрессионные зависимости, показанные на рис. 2, были необходимы, чтобы рассчитать величину разности темпов нагрева двух эталонных объектов, сводя к минимуму ошибку измерений температуры, заметную на рис. 2, б в виде некоторого разброса экспериментальных данных относительно регрессионной зависимости. Регрессионные зависимости имеют следующий вид:

$$\theta_1(\tau) = a_0 + a_1\tau; \quad (1)$$

$$\theta_2(\tau) = b_0 + b_1\tau. \quad (2)$$

Если задать некоторый момент времени $\tau_x > \tau_k$ и приращение температуры Δt , например $\Delta t = 1^\circ\text{C}$, то, используя выражения (1) и (2), можно получить следующие выражения для темпов нагрева эталонных объектов:

$$\frac{\tau_1 - \tau_x}{\Delta t} = \frac{1}{a_1}; \quad (3)$$

$$\frac{\tau_2 - \tau_x}{\Delta t} = \frac{1}{b_1} \quad (4)$$

и выражение разности темпов нагрева эталонных объектов:

$$\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t} = \frac{b_1 - a_1}{a_1 b_1}. \quad (5)$$

Обработка экспериментальных данных, полученных при исследовании материала Penoplex, позволила определить значение разности темпов нагрева первого и второго эталонных объектов, равное 243,5 с/град. Это значение, а также известное значение коэффициента теплопроводности материала использовались для получения безразмерной тарифовочной характеристики экспериментального стенда. Для получения этой характеристики был построен виртуальный стенд в SolidWorks, являющийся цифровой копией экспериментального стенда, на котором были получены зависимости относительной температуры эталонных объектов от времени при исследовании материала Penoplex. В программе SolidWorks Simulation проводились тепловые исследования виртуального стенда. Целью первого (стационарного) теплового исследования был подбор значений коэффициента теплоотдачи окружающей среды и мощности тепловыделения, при которых средняя температура первого и второго эталонных объектов принимала такие же значения, какими были начальные значения t_0 в реальном физическом эксперименте. Целью второго

(нестационарного) теплового исследования было получение зависимости температур t_i первого и второго эталонных объектов от времени. При этом осуществлялся подбор значений коэффициента теплоотдачи окружающей среды и мощности тепловыделения, при которых средняя температура первого и второго эталонных объектов принимала такие же значения, какими были конечные значения в реальном эксперименте. Вместо материала Penoplex в исследованиях виртуального стенда использовался гипотетический материал с задаваемыми значениями коэффициента теплопроводности из диапазона 0,01–0,128 Вт/(м·К).

На рис. 3 показаны результаты расчета температур t_i первого (левый график) и второго (правый график) виртуальных эталонных объектов. Как видно из сравнения графиков, температура второго виртуального эталонного объекта, к которому присоединена модель теплоизоляционного гипотетического материала, с течением времени растет быстрее.

Значения температуры t_i первого и второго виртуальных эталонных объектов, показанные на рисунке, обрабатывались по формулам (1)–(5), так же как аналогичные значения реальных эталонных объектов, полученные в физическом эксперименте. В результате была получена зависимость разности темпов нагрева первого и второго виртуальных эталонных объектов от времени.

В исследованиях, выполненных с помощью виртуального стенда, у гипотетического теплоизоляционного материала изменялись не только значения коэффициента теплопроводности, но и значения плотности и удельной теплоемкости. В первом цикле исследований значения плотности и удельной теплоемкости гипотетического теплоизоляционного материала равнялись соответствующим значениям Penoplex, во втором цикле исследований данные значения были приняты равными соответствующим значениям для полиамида марки Ultratan 630, из которого изготавливались опытные образцы вакуумных теплоизоляционных панелей. На рис. 4 представлены результаты расчета разности темпов нагрева первого и второго эталонных объектов, полученные в первом и втором циклах исследования.

Регрессионные зависимости 1 и 2, показанные на рис. 4, могут быть представлены полиномами первого порядка:

$$\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t} \right)_{\text{calc stand}} = c_0 + c_1\lambda; \quad (6)$$

$$\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t} \right)_{\text{calc vac}} = d_0 + d_1\lambda, \quad (7)$$

где индекс *calc stand* относится к результатам расчета данных виртуального стенда первого цикла

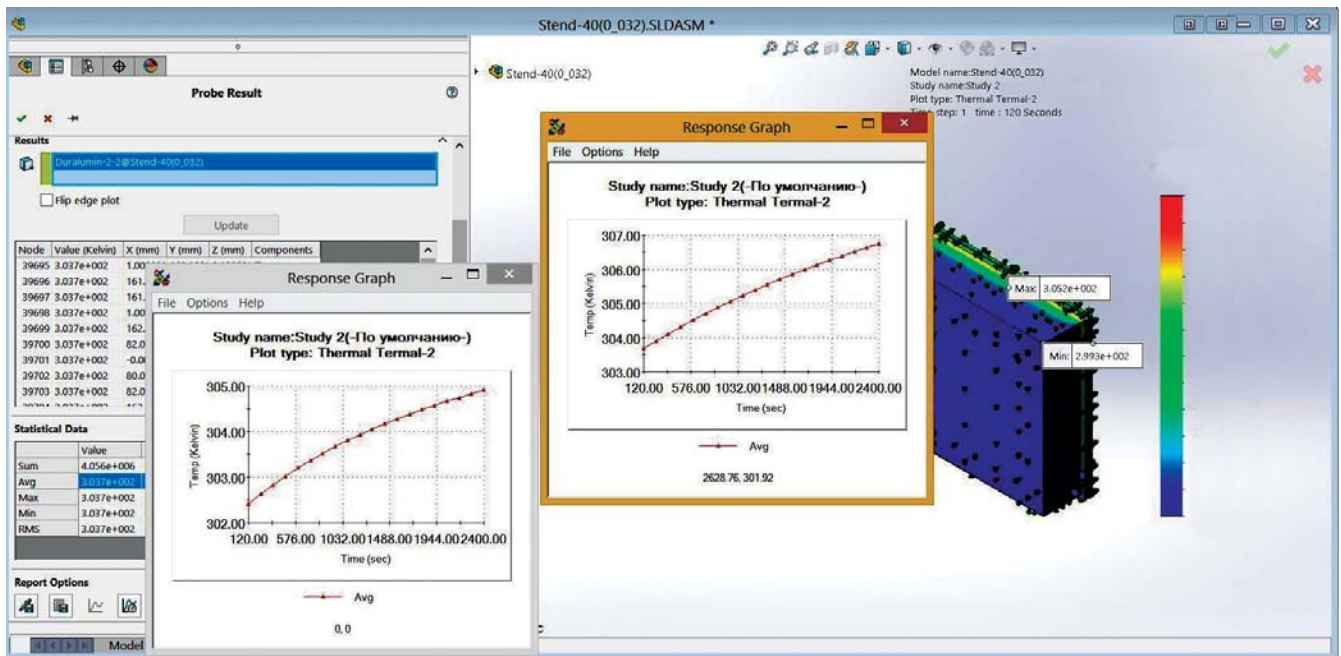


Рис. 3. Результаты нестационарного теплового исследования виртуального стенда при задании значения коэффициента теплопроводности исследуемого теплоизоляционного материала 0,032 Вт/(м · К)

Fig. 3. Results of transient thermal tests on the virtual test bench, given a thermal conductivity coefficient of the insulation material under test of 0.032 W/(m · K)

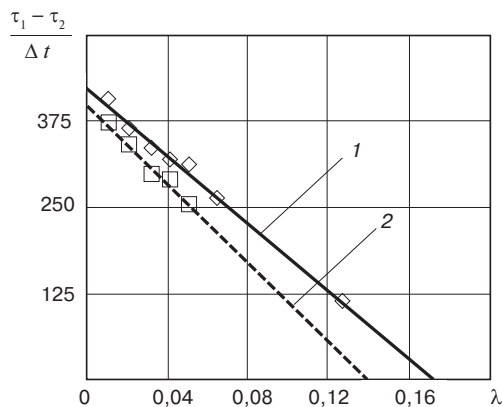


Рис. 4. Зависимости разности темпов нагрева первого и второго эталонных объектов от значений коэффициента теплопроводности λ : \square, \diamond — результаты расчета данных исследований виртуального стенда; 1 — регрессионная зависимость данных первого цикла исследований; 2 — регрессионная зависимость данных второго цикла исследований

Fig. 4. Dependencies of the difference between the heating rates of the first and second prototypes on the values of the thermal conductivity coefficient λ :

\square, \diamond — calculation results of the virtual test bench study data; 1 — regression dependence of the first cycle study data; 2 — regression dependence of the second cycle study data

исследований модели теплоизоляционного материала, а индекс *calc vac* относится к результатам расчета данных виртуального стенда второго цикла исследований.

Для создания тарировочной характеристики стенда, пригодной для обработки данных экспериментального исследования вакуумных теплоизоляционных панелей, предложено использовать зависимость относительной разности темпов нагрева первого и второго эталонных объектов от значений коэффициента теплопроводности в безразмерном виде:

$$\overline{\Delta\tau} = f(\overline{\lambda}); \quad \overline{\Delta\tau} = \frac{\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t}\right)_{calc\ stand}}{\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t}\right)_{exper}}; \quad (8)$$

$$\overline{\lambda} = \frac{\lambda_{calc\ stand}}{\lambda_{exper}},$$

где индекс *exper* относится к данным экспериментальных исследований материала Penoplex. Подставляя обозначения безразмерных величин (8) в уравнение (6), можно получить вид тарировочной характеристики:

$$\overline{\Delta\tau} = \frac{c_0}{\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t}\right)_{exper}} + c_1 \frac{\lambda_{exper}}{\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t}\right)_{exper}} \overline{\lambda}. \quad (9)$$

Для использования этой тарировочной характеристики при обработке данных экспериментальных

исследований вакуумных теплоизоляционных панелей необходимо решить следующее уравнение относительно неизвестной величины $\bar{\lambda}$:

$$\frac{c_0}{\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t}\right)_{\text{exper}}} + c_1 \frac{\lambda_{\text{exper}} \bar{\lambda}}{\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t}\right)_{\text{exper}}} = \frac{d_0}{\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t}\right)_{\text{vac}}} + d_1 \frac{\lambda_{\text{exper}} \bar{\lambda}}{\left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\Delta t}\right)_{\text{vac}}}, \quad (10)$$

где индекс *vac* относится к данным экспериментальных исследований вакуумной теплоизоляционной панели.

Результаты исследования. Для проведения экспериментальных исследований методом 3D-печати были изготовлены три опытных образца вакуумных теплоизоляционных панелей в виде герметичных корпусов с толщиной стенок 1,5 мм и различной толщиной ребер жесткости. Варианты опытных образцов представлены на рис. 5. Ребра жесткости выполнялись с поперечным сечением в форме ромбов (рис. 5, а, б) или шестигранных сот (рис. 5, в).

При испытаниях опытных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей на стенде, показанном на рис. 1, для создания вакуума внутри панелей использовался пластинчато-роторный насос RS-1, для регистрации температуры использовались два прибора CENTER-314 (погрешность по паспорту $\pm 0,2\%$).

Основное назначение экспериментального исследования опытных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей состояло в валидации виртуального стенда для испытаний вакуумных панелей на стационарном режиме.

Для сравнения опытных и расчетных значений эффективного коэффициента теплопроводности вакуумных теплоизоляционных панелей в виртуальном стенде вместо модели теплоизоляционного материала устанавливались 3D-модели опытных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей, показанных на рис. 5.

В стационарном тепловом исследовании виртуального стенда в программе SolidWorks Simulation измерялась средняя температура двух противоположных поверхностей модели вакуумной теплоизоляционной панели и величина среднего результирующего теплового потока через одну из этих поверхностей. Эффективный коэффициент теплопроводности находился как частное от деления среднего результирующего теплового потока на разность средних температур поверхностей, умноженное на толщину панели.

На внутренних поверхностях моделей вакуумных теплоизоляционных панелей задавались значения

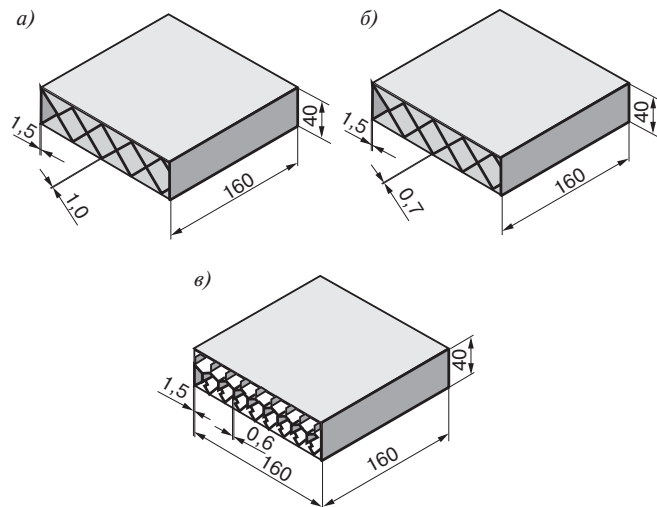


Рис. 5. Варианты вакуумных теплоизоляционных панелей: а — ребра жесткости в виде ромбов толщиной 1 мм; б — ребра жесткости в виде ромбов толщиной 0,7 мм; в — ребра жесткости в виде шестигранных сот толщиной 0,6 мм

Fig. 5. Vacuum insulation panel options: а — stiffeners in the form of lozenges 1 mm thick; б — stiffeners in the form of lozenges 0.7 mm thick; в — stiffeners in the form of hexagonal honeycombs 0.6 mm thick

средних температур их наружных поверхностей и коэффициенты теплоотдачи, определяемые с учетом плотности воздуха и, следовательно, давления по известной формуле для свободной конвекции:

$$\alpha_{\text{free conv}} = 0,18 \frac{\lambda_{\text{air}}}{h} \left[\frac{\rho_{\text{air}}^2 g \beta_i C_p |T_1 - T_2| h^3}{\lambda_{\text{air}} \mu_{\text{air}}} \right]^{0,25}, \quad (11)$$

где λ_{air} — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); h — характерный размер ячейки вакуумных панелей, м; ρ_{air} — плотность воздуха (величина прямо пропорциональная давлению в полостях панелей), кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; β_i — коэффициент температурного расширения воздуха; C_p — удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); T_1 и T_2 — температура противоположных стенок ячеек сот, К; μ_{air} — коэффициент динамической вязкости воздуха, Н·с/м².

Кроме теплопереноса путем теплопроводности и конвективного теплообмена в моделях вакуумных теплоизоляционных панелей учитывался радиационный теплообмен между внутренними поверхностями корпусов панелей.

Обсуждение. На рис. 6 показан пример обработки данных испытаний варианта вакуумной теплоизоляционной панели, изображенной на рис. 5, б, при давлении во внутренних полостях панели 50 кПа.

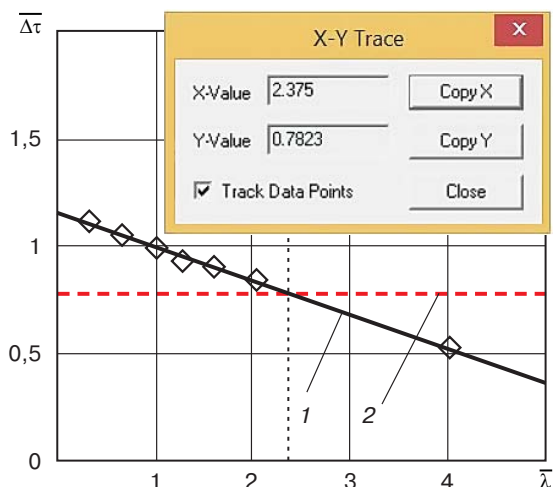


Рис. 6. Обработка данных испытаний вакуумной теплоизоляционной панели с толщиной ребер 1 мм:
1 — тарировочная характеристика стенда; 2 — относительная разность темпов нагрева первого и второго эталонных объектов, найденная из эксперимента, $\Delta\tau = 0,7823$

Fig. 6. Processing of test data for a vacuum insulation panel with a rib thickness of 1 mm:

1 — calibration characteristic of the test bench; 2 — relative difference between the heating rates of the first and second prototypes, obtained from the experiment, $\Delta\tau = 0,7823$

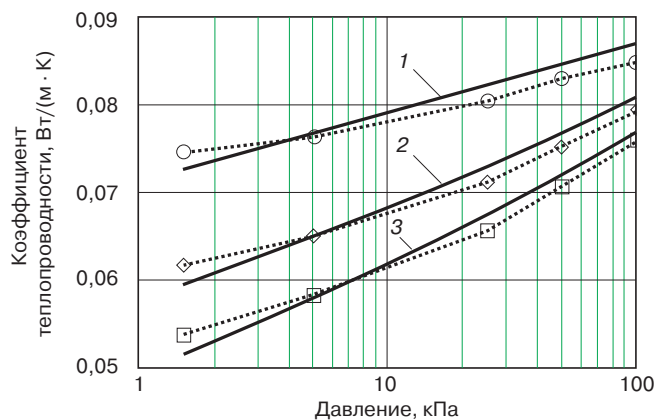


Рис. 7. Сравнение опытных и расчетных значений эффективного коэффициента теплопроводности вакуумных теплоизоляционных панелей:

1 — расчетные значения λ панели с толщиной ребер 1 мм;
2 — расчетные значения λ панели с толщиной ребер 0,7 мм;
3 — расчетные значения λ панели с толщиной ребер 0,6 мм;
пунктирные линии — опытные значения λ соответственно

Fig. 7. Comparison of experimental and calculated values of the effective thermal conductivity coefficient of vacuum insulation panels:

1 — calculated values of the λ panel with a rib thickness of 1 mm;
2 — calculated values of the λ panel with a rib thickness of 0.7 mm;
3 — calculated values of the λ panel with a rib thickness of 0.6 mm;
dotted lines — experimental values of the λ

Как видно из рис. 6, при значении относительной разности темпов нагрева первого и второго эталонных объектов, найденной из эксперимента, $\Delta\tau = 0,7823$

значение коэффициента теплопроводности в безразмерном виде равно $\bar{\lambda} = 2,375$. Значение эффективного коэффициента теплопроводности опытного образца вакуумной теплоизоляционной панели находится как произведение коэффициента теплопроводности в безразмерном виде на коэффициент теплопроводности материала Penoplex, использованного для тарировки стенда, т. е. $\lambda = 2,375 \cdot 0,032 = 0,076$ Вт/(м·К), что более чем в два раза больше, чем у современных теплоизоляционных материалов. Это связано с тем, что толщина опытных образцов была ограничена величиной 40 мм, а эффективность (удельное тепловое сопротивление) вакуумных теплоизоляционных панелей повышается пропорционально квадрату толщины панели, так как эффективный коэффициент теплопроводности обратно пропорционален длине ребер жесткости.

На рис. 7 показано сравнение экспериментальных значений эффективного коэффициента теплопроводности опытных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей, показанных на рис. 5, и их расчетных значений, определенных с помощью стационарного теплового исследования виртуального стенда в SolidWorks Simulation.

Как видно из рис. 7, минимальными значениями эффективного коэффициента теплопроводности обладает вакуумная теплоизоляционная панель с ребрами жесткости в виде шестигранников и толщиной 0,6 мм. Эти значения лежат в диапазоне от 0,076 до 0,054 Вт/(м·К) при давлении внутри панелей от 100 до 0,5 кПа. Получение меньших значений эффективного коэффициента теплопроводности вакуумных теплоизоляционных панелей возможно при увеличении толщины панелей и уменьшении давления воздуха внутри их корпусов.

Сравнение опытных и расчетных значений эффективного коэффициента теплопроводности вакуумных теплоизоляционных панелей показало, что средне-квадратическая погрешность составила не более 5%.

Использование тарировочной характеристики, полученной с помощью виртуального стенда, позволило проводить экспериментальные исследования каждого опытного образца вакуумных теплоизоляционных панелей не более 40 мин, что существенно меньше времени выхода на стационарный тепловой режим в известных методах измерений [4–10].

На основе предлагаемого метода определения эффективного коэффициента теплопроводности материалов может быть изготовлен переносной прибор для оценки качества теплоизоляции пассажирского вагона при входном и выходном контроле во время капитального ремонта. Ожидаемый экономический эффект от использования такого прибора в условиях пассажирского депо образуется от возможного уменьшения объема ремонтных работ по замене теплоизоляции пассажирского вагона при неподтверждении

дефектов, выявленных тепловизором, а также от повышения качества ремонта за счет измерения коэффициента теплопроводности теплоизоляции после ее замены.

Заключение. В работе представлены результаты экспериментального определения эффективного коэффициента теплопроводности трех опытных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей, выполненного на специально разработанном экспериментальном стенде.

Для тарирования экспериментального стенда использовались данные испытаний теплоизоляционного материала Penoplex с известными свойствами и цифровой аналог экспериментального стенда — виртуальный стенд, выполненный в виде 3D-модели в программе SolidWorks. Исследование нестационарного теплового процесса 3D-модели стенда в SolidWorks Simulation позволило построить тарировочную характеристику, что существенно сэкономило время и ресурсы при экспериментальном определении эффективного коэффициента теплопроводности вакуумных теплоизоляционных панелей.

Для сравнения опытных и расчетных значений эффективного коэффициента теплопроводности вакуумных теплоизоляционных панелей в виртуальном стенде вместо модели теплоизоляционного материала устанавливались 3D-модели опытных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей. Исследование стационарного теплового процесса 3D-моделей вакуумных теплоизоляционных панелей в программе SolidWorks Simulation проводилось при учете теплопереноса путем теплопроводности, конвективного и радиационного теплообмена. Коэффициент теплоотдачи конвективного теплообмена рассчитывался для свободной конвекции с учетом величины давления во внутренних полостях вакуумных теплоизоляционных панелей. Сравнение опытных и расчетных значений эффективного коэффициента теплопроводности исследованных образцов вакуумных теплоизоляционных панелей показало, что расхождение составляет менее 5 %.

Переносной прибор для оценки качества теплоизоляции пассажирского вагона, изготовленный на основе предлагаемого метода определения эффективного коэффициента теплопроводности материалов, может использоваться при входном и выходном контроле теплоизоляции пассажирского вагона во время капитального ремонта.

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 ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. ГОСТ 34681—2020. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Общие технические требования: дата введения 2021-03-01. М.: Стандартинформ, 2020, 36 с. [GOST 34681—2020. *Passenger cars on locomotive traction. General technical requirements*. Introduction date 2021-03-01. Moscow: Standartinform; 2020, 36 p. (In Russ.).]
2. Balalaev A., Parenjuk M., Arslanov I., Ziyatdinov A. Mass and heat-insulation properties of the bodies of passenger and insulated railway cars made of vacuum honeycomb panels. *Journal of Applied Engineering Science*. 2018;16(1):50-59. <https://doi.org/10.5937/jaes16-13888>.
3. Патент №2571834 C2 Российская Федерация, МПК B61D 17/18, B60P 3/20, F16L 59/065. Вакуумное теплоизоляционное изделие (варианты): №2013157470/11: заявл. 24.12.2013: опубл. 20.12.2015 / Балалаев А. Н., Мокшанов А. С., Попов Д. А. 13 с. [Balalaev A. N., Mokshanov A. S., Popov D. A. *Patent No. 2571834 (C2). B60P3/20, B61D17/18, E04B1/80. Vacuum thermal insulation product (versions): No. 2013157470/11: appl. 24.12.2013, publ. 20.12.2015*. 13 p. (In Russ.).]
4. British Standard BS 874. *British standard methods for determining thermal insulating properties. Part 3: Tests for thermal transmittance and conductance. Section 3.1: Guarded hot-box method*. Released 1986-11-28. London: British Standards Institution; 1987. 26 p.
5. British Standards BS EN 675:2011. *Glass in building. Determination of thermal transmittance (U value). Heat flow meter method*. Released 2011-06-30. London: British Standards Institution; 2011. 18 p.
6. British Standards BS EN ISO 8990:1996. *Thermal insulation. Determination of steady state thermal transmission properties. Calibrated and guarded hot box*. Released 1996-12-15. London: British Standards Institution; 1996. 26 p.
7. ISO 9869-1-2014. *Thermal insulation — Building elements — In-situ measurements of thermal resistance and thermal transmittance*. Released 2014-08-01. Geneva: ISO; 2014. 36 p.
8. BS EN ISO 8990:1996. *Thermal insulation. Determination of steady-state thermal transmission properties. Calibrated and guarded hot box*. Released 1996-12-15. London: British Standards Institution; 1998. 26 p.
9. ASTM C1046-95. *Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components*. West Conshohocken: ASTM; 2021. 10 p. <https://doi.org/10.1520/C1046-95R21>.
10. ASTM C1155-95. *Standard practice for determining thermal resistance of building envelope components from the in-situ data*. West Conshohocken: ASTM; 2021. 8 p. <https://doi.org/10.1520/C1155-95R21>.
11. Atsonios I. A., Mandilaras I. D., Kontogeorgos D. A., Founti M. A. A comparative assessment of the standardized methods for the in-situ measurement of the thermal resistance of building walls. *Energy and Building*. 2017;154:198-206. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.064>.
12. Baldinelli G. A methodology for experimental evaluations of low-e barriers thermal properties: field tests and comparison with theoretical models. *Building and Environment*. 2010;45(4):1016-1024. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.10.009>.
13. Gaspar K., Casals M., Gangoles M. A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of façades U-value. *Energy and Buildings*. 2016;130:592-599. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.072>.
14. Deconinck A.-H., Roels S. Comparison of characterisation methods determining the thermal resistance of building components from onsite measurements. *Energy and Buildings*. 2016;130:309-320. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.061>.
15. Desogus G., Mura S., Ricciu R. Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance. *Energy and Buildings*. 2011;43(10):2613-2620. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.025>.

16. Chaffar K., Chauchois A., Defer D., Zalewski L. Thermal characterization of homogeneous walls using inverse method. *Energy and Buildings*. 2014;78:248–255. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.038>.

17. Arya F., Moss R., Hyde T., Shire S., Henshall P., Eames P. Vacuum enclosures for solar thermal panels. Part 1: Fabrication and hot-box testing. *Solar Energy*. 2018;174:1212–1223. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.064>.

18. Arya F., Moss R., Hyde T., Shire S., Henshall P., Eames P. Vacuum enclosures for solar thermal panels. Part 2: Transient testing with an uncooled absorber plate. *Solar Energy*. 2018;174:1224–1236. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.063>.

19. Dulnev G. N. The theory of thermal regular regime and its application to the determination of thermal characteristics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1960;1(2-3):152–160. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(60\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(60)90019-3).

20. Nekhendzi E. J. Method of a regular regime for the determination of variable thermal coefficients. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1961;3(4):311–320. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(61\)90046-1](https://doi.org/10.1016/0017-9310(61)90046-1).

21. Голубин А. А., Белова Н. В., Науменко С. Н. Влияние погрешностей измерения при определении коэффициента теплопередачи ограждающих конструкций изотермического вагона // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2019. Т. 78, № 2. С. 100–104 [Golubin A. A., Belova N. V., Naumenko S. N. Effect of measurement errors in determining the heat transfer coefficient of the enclosing structures of an isothermal car. *Russian Railway Science Journal*. 2019;78(2):100–104. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-2-100-104>.

22. Балалаев А. Н., Тимкин Д. М. Теоретические и экспериментальные исследования вакуумной панели ячеистой структуры // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 8 (110). С. 39–47 [Balalaev A. N., Timkin D. M. Theoretical and experimental studies of a vacuum panel with a cellular structure. *International Research Journal*. 2021;(8):39–47 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.110.8.006>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Анатолий Николаевич БАЛАЛАЕВ,
д-р техн. наук, профессор, кафедра вагонов, Самарский государственный университет путей сообщения (443066, г. Самара, ул. Свободы, 2В), Author ID: 267860, <https://orcid.org/0000-0003-0839-6858>

Мария Анатольевна ПАРЕНЮК,
канд. техн. наук, доцент, кафедра вагонов, Самарский государственный университет путей сообщения (443066,

г. Самара, ул. Свободы, 2В), Author ID: 404616, <https://orcid.org/0000-0001-9965-1310>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoly N. BALALAEV,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Wagons, Samara State Transport University (443066, Samara, 2v, Freedom St.), Author ID: 267860, <https://orcid.org/0000-0003-0839-6858>

Maria A. PARENYYUK,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Wagons, Samara State Transport University (443066, Samara, 2v, Freedom St.), Author ID: 404616, <https://orcid.org/0000-0001-9965-1310>

ВКЛАД АВТОРОВ

Анатолий Николаевич БАЛАЛАЕВ. Обоснование методики проведения эксперимента на стенде, редактирование и подготовка текста рукописи (50%).

Мария Анатольевна ПАРЕНЮК. Методика обработки данных реального и виртуального экспериментов, методика использования цифрового двойника экспериментального стенда (50%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Anatoly N. BALALAEV. Justification of the methodology of the test bench experiment, editing and preparation of the paper (50%).

Maria A. PARENYYUK. Methodology for processing data from real and virtual experiments, methodology for using a digital twin of the test bench (50%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 16.03.2023, рецензия от первого рецензента получена 14.04.2023, рецензия от второго рецензента получена 18.04.2023, принята к публикации 25.04.2023.

The article was submitted 16.03.2023, first review received 14.04.2023, second review received 18.04.2023, accepted for publication 25.04.2023.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

На сайте www.elibrary.ru открыт доступ к электронным версиям статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта».

Для работы с фондами библиотеки пользователю необходимо самостоятельно зарегистрироваться, заполнив регистрационную форму на главной странице eLibrary.ru. Доступ возможен по Вашему логину и паролю с любого компьютера, имеющего выход в интернет.

Материалы журнала, размещенные на сайте Научной электронной библиотеки для свободного использования, допускается использовать, копировать, цитировать исключительно в некоммерческих целях с соблюдением соответствующих положений действующего авторского законодательства (Гражданский кодекс РФ от 18.12.2006 № 230-ФЗ, Часть IV; Глава 70 «Авторское право») с обязательным указанием имени автора/ов произведения и источника заимствования.

На сайте журнала www.journal-vniizht.ru контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.4.028.86

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-109-116>EDN: <https://elibrary.ru/nacfay>

Влияние силовой характеристики поглощающих аппаратов на продольную динамику электропоезда и многоцикловую усталость сцепки

В. И. Беляев✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Измерение сил, действующих в сцепках при эксплуатации электропоездов различных категорий и типов (в том числе с разными способами установки сцепных устройств), показало, что уровень сил в сцепках пригородных электропоездов выше, чем в городском экспрессе, несмотря на меньшее количество троганий и остановок, а также наличие на пригородных электропоездах буферов, воспринимающих часть продольных сил. Также на пригородных электропоездах отмечена и большая частота (статистическая вероятность) возникновения этих сил, что определяет большую нагруженность автосцепок на пригородных электропоездах с установкой автосцепки в соответствии с ГОСТ 3475–81, чем на городских электропоездах ЭС2Г, поглощающие аппараты у которых объединены с корпусом сцепки. Основной целью исследования являлось определение нагруженности сцепок электропоездов различных категорий и типов, а также определение параметров поглощающих аппаратов сцепок, в наибольшей степени оказывающих влияние на их нагруженность.

Материалы и методы. Методами исследований являлось опытное измерение продольных сил в межвагонных сцепках электропоездов в условиях эксплуатации со статистической обработкой результатов, анализом влияния показателей поглощающих аппаратов на продольную динамику поезда.

Результаты. Выполнен анализ влияния усилия начальной затяжки на изменение уровня действующих сил и нагруженности сцепных устройств при эксплуатации электропоездов. Установлено наиболее значимое воздействие величины этого усилия на продольную динамику поезда и нагруженность сцепок.

Обсуждение и заключение. Результаты испытаний по измерению уровней сил в сцепках показали, что снижение усилия начальной затяжки положительно влияет на продольную динамику моторвагонного подвижного состава. Достигнутые результаты дают основание для продолжения исследований в различных условиях эксплуатации и проведения поездных испытаний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электропоезда, сцепные устройства, нагруженность сцепок, установка сцепок на подвижном составе, поглощающие аппараты, усилие начальной затяжки

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Беляев В. И. Влияние силовой характеристики поглощающих аппаратов на продольную динамику электропоезда и многоцикловую усталость сцепки // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 2. С. 109–116. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-109-116>.

✉ belyaev.vladimir@vniizht.ru (В. И. Беляев)

© Беляев В. И., 2023



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.4.028.86

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-109-116>

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



Effect of the load-bearing characteristics of the cushions on the longitudinal dynamics of the electric trains and the high-cycle fatigue of coupling

Vladimir I. Belyaev✉

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Measurements of forces in couplings on electric trains of different categories and types (including different types of drawbars) showed that the level of forces in couplings on suburban electric trains is higher than on urban express trains, despite the lower number of starts and stops and the presence of buffers on suburban electric trains to absorb some of the longitudinal forces. In addition, a higher frequency (statistical probability) of occurrence of these forces was observed in suburban electric trains, which determines a higher load on automatic couplers in suburban electric trains with an automatic coupler installed in accordance with GOST 3475–81 than in ES2G city electric trains, where the cushions are combined with the coupling body. The main objective of the study was to determine the load on the couplers of electric trains of different categories and types, as well as to determine the parameters of the cushions of the couplers that have the greatest influence on their load.

Materials and methods. The research methods include experimental measurement of longitudinal forces in inter-car couplings of electric trains under operating conditions with statistical processing of the results, and analysis of the effect of cushions indicators on the longitudinal dynamics of the train.

Results. The authors analyse the effect of the initial tightening force on the changes in the level of acting forces and the loading of drawbars during electric train operation. The most significant effect of this force is found to be on the longitudinal dynamics of the train and on the load on the couplings.

Discussion and conclusion. Reducing the initial tightening force has a positive effect on the longitudinal dynamics of railcars, according to the results of tests measuring the force levels in couplings. The results obtained would form the basis for further research under varying conditions and for conducting train tests.

KEYWORDS: electric trains, drawbars, coupler loading, installation of couplings on rolling stock, cushions, initial tightening force

FOR CITATION: Belyaev V.I. Effect of the load-bearing characteristics of the cushions on the longitudinal dynamics of the electric trains and the high-cycle fatigue of coupling. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(2):109-116. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-109-116>.

✉ belyaev.vladimir@vniizht.ru (V.I. Belyaev)

© Belyaev V.I., 2023

Введение. Наличие зависимости между силовой характеристикой поглощающих аппаратов сцепных/автосцепных устройств и продольной динамикой поезда (как грузового, так и пассажирского) известно давно. С другой стороны, количественная оценка такого влияния редко становилась целью специальных исследований. В последние годы большая часть работ по исследованию влияния характеристик межвагонных связей на нагруженность подвижного состава относится к грузовому подвижному составу, где реализуются силы высокого уровня (см., например, [1]). Влияние их характеристик на уровень сил в пассажирском подвижном составе касается преимущественно нештатных и аварийных режимов в эксплуатации, при которых срабатывают крэш-элементы, т. е. усилия значительно превышают уровень при штатной эксплуатации [2]. Поэтому характер повреждений сцепных устройств не может быть отнесен к усталостной прочности. В [3], где рассматривается продольная динамика электропоезда, также основное внимание посвящается нештатным и аварийным режимам движения, причем практически все исследования выполнялись путем математического моделирования.

Результаты проведенных не так давно натурных испытаний [4], показавших более чем двукратное снижение уровня продольных сил при движении одинаковых грузовых поездов на тех же участках пути только вследствие замены поглощающих аппаратов на модели более высоких классов (с большей энергоемкостью), также невозможно распространить на пассажирский подвижной состав. При движении пассажирских поездов локомотивной тяги, и особенно моторвагонного подвижного состава, уровень продольных сил является значительно более низким, обрывов автосцепок на пассажирских вагонах практически не происходит. Поэтому требования к характеристикам поглощающих аппаратов пассажирских вагонов определяются исходя из выполнения двух главных функций — поглощения энергии при соударении вагонов в процессе формирования поездов, а также обеспечения приемлемого уровня продольных ускорений, действующих на пассажиров при движении поезда.

Для выполнения первого из упомянутых требований (поглощения энергии, возникающей при формировании и эксплуатации поезда) принята классификация поглощающих аппаратов, в которой установлены конкретные значения их энергоемкости. Эти требования дают возможность подтвердить правильность применения модели поглощающего аппарата для конкретного вида и категории поезда. В настоящее время действует ГОСТ 32913–2014 [5], в котором содержится классификация поглощающих аппаратов (в зависимости от типов подвижного

состава, для которых они предназначены), а также основные показатели, соответствующие конкретному классу. В числе этих показателей установлены требования к энергоемкости поглощающих аппаратов различных классов.

Однако по поводу оценки комфорта пассажиров при действии ускорений и вибрации в продольном направлении никогда не существовало общепризнанных нормативов и требований (показатель плавности хода дает такую оценку только для поперечной горизонтальной и вертикальной вибрации). В то же время именно неприемлемо высокие продольные ускорения при срывах сил, заключающиеся в схватывании поверхностей металла при их относительном перемещении в отсутствие смазки и последующем проскальзывании в пружинно-фрикционных поглощающих аппаратах Ш-1-Т во времена перехода железных дорог колеи 1524 мм на автосцепку, явились причиной создания поглощающего аппарата ЦНИИ-Н6. В этом аппарате при движении поезда и малых уровнях сил работала только пружинная часть без фрикционного узла с сухим трением, что исключило упомянутые срывы сил и вызванные этим скачки ускорений. И все последующие конструкции поглощающих аппаратов пассажирского подвижного состава содержали упругие резинометаллические элементы, полимерные или из кольцевых пружин.

В последние годы интерес к нормированию параметров поглощающих аппаратов сцепных устройств, влияющих на комфорт пассажиров, снизился с появлением разных моделей безззорных сцепных устройств, исключивших самые заметные недостатки автосцепки СА-3 на пассажирском подвижном составе — шум от ударов хвостовика автосцепки о центрирующую балочку и интенсивный износ по контуру зацепления автосцепки. Однако опыт последних лет эксплуатации на российских железных дорогах специализированных безззорных пассажирских сцепных устройств (требования к прочности которых значительно ниже, чем для автосцепки модели СА-3, эксплуатируемой на всех видах железнодорожного подвижного состава, включая грузовой) показал возможность разрушения их деталей вследствие недостаточной усталостной прочности.

С подобными проблемами уже встречались на электропоездах европейских дорог колеи 1435 мм, где опыт использования таких облегченных сцепок больше, чем на российских железных дорогах. Так, на немецких железных дорогах к 2000 г. было выведено из эксплуатации 13 из 59 электропоездов ICE 1 (с двумя моторными головными вагонами) производства фирмы «Сименс» (Siemens AG) из-за обнаруженных трещин в сцепках [6, 7]. На польских железных дорогах к 2019 г. было выведено из эксплуатации 7 составов

электропоездов DART производства «ПЕСА» (PESA Bydgoszcz SA) вследствие появления трещин на обшивке кузова [8]. В последней публикации причины появления трещин установлены еще не были, однако в [9] в качестве вероятной причины указана вибрация, вызываемая действием в электропоезде продольных сил, возникающих при тяге и торможении. Все эти факты уже не позволяют считать силы, передающиеся через сцепки электропоездов, пренебрежительно малыми и не влияющими на усталостную прочность.

Для предупреждения и решения отмеченной проблемы на сети российских железных дорог, а также разработки нормативной базы по усталостной прочности сцепок электропоездов были проведены исследования нагруженности сцепок в эксплуатации, основные результаты которых приведены в [10]. В указанной статье показано определение нагруженности сцепок путем схематизации зарегистрированных в эксплуатации продольных сил методом «дождя», предусмотренного ГОСТ 25.101–83 [11]. Также в [10] были построены гистограммы распределения размахов (двойных амплитуд) сил в сцепках и их количества в каждой поездке на единицу пробега электропоездов различных категорий и типов на весь срок службы, принятый равным 40 годам (что позволило визуально оценить различия в нагруженности различных категорий и типов электропоездов). Вместе с тем целью исследования [10] являлось как определение нагруженности сцепок электропоездов различных категорий и типов, так и определение параметров поглощающих аппаратов сцепок, в наибольшей степени оказывающих влияние на их нагруженность.

Анализ результатов исследований сцепок электропоездов в эксплуатации при многоцикловых режимах нагружения. Как показали результаты работы [10], межвагонные сцепные устройства с автосцепкой СА-3 пригородных электропоездов с конструкционной скоростью 120 км/ч и средним годовым пробегом 130 тыс. км оказались более нагружены силами переменного знака и уровня, чем сцепные устройства городских электропоездов с конструкционной скоростью 160 км/ч и большим средним годовым пробегом (170 тыс. км).

Предварительная оценка показала, что условия работы сцепки городского поезда ЭС2Г при эксплуатации на Московском центральном кольце (МЦК) должны быть более тяжелыми, чем при эксплуатации пригородного электропоезда ЭТ2М со сцепкой СА-3 по следующим причинам:

- режимы трогания и остановочного торможения (при которых зарегистрированы силы наиболее высокого уровня) у городского электропоезда возникают чаще;
- расположение трех прицепных вагонов между головными моторными вагонами у поезда ЭС2Г является менее благоприятным, чем у пригородных

электропоездов, где моторные и немоторные вагоны преимущественно чередуются между собой;

- при наличии на вагонах пригородных электропоездов буферов силы, передаваемые через сцепку, снижаются на значения силы, воспринимаемой буферами (до 20 кН), что оказывает пусть малозначительный, но положительный эффект в части нагруженности сцепки и ее усталостной прочности;

- средний пробег за срок службы поезда ЭС2Г вследствие более высокой конструктивной скорости достигает 6800 тыс. км, что на 30 % превышает средний пробег пригородного электропоезда, равный 5200 тыс. км (это самый весомый аргумент!).

Прочие параметры, способные оказать влияние на возникающие силы в эксплуатации, оказались менее значимыми:

- тяговые усилия моторных вагонов этих электропоездов весьма близки (130–140 кН);
- количество секций в электропоезде с распределенной тягой практически не влияет на его продольную динамику.

Однако, несмотря на указанные факторы, усталостная нагруженность сцепок в пригородных электропоездах оказалась выше (подробнее см. [10]). Это вызвано большими амплитудами и частотой возникновения размахов продольных сил более 50 кН при переходных режимах движения. Для иллюстрации на рис. 1, а и 1, б показаны реализации продольных сил в межвагонных сцепках (между моторным и немоторным вагонами) на участке трогания и тяги пригородного электропоезда ЭТ2М и городского ЭС2Г длительностью 20 с каждый (регистрация сил выполнялась с частотой 50 Гц, по оси абсцисс указаны порядковые номера точек). Электропоезда за это время достигли скоростей 29 и 60 км/ч и прошли путь 57 и 145 м соответственно. Здесь и далее силы в сцепках регистрировались сцепками-динамометрами при штатной эксплуатации электропоездов с пассажирами.

Из приведенных диаграмм видно, что за меньший пройденный путь в сцепке пригородного электропоезда ЭТ2М зарегистрировано значительно больше размахов сил величиной более 50 кН по сравнению со сцепкой городского электропоезда ЭС2Г. В диапазоне размахов сил 10–50 кН разница в их количестве еще более заметна.

На рис. 2, а и 2, б приведены реализации сил в тех же сцепках поездов ЭТ2М и ЭС2Г на участках тяги при скорости движения в диапазоне 70–80 км/ч. Здесь соотношение размахов сил ближе к режиму трогания.

В режимах выбега и торможения размахи сил в межвагонных сцепках обоих поездов значительно ниже, и их различия менее заметны. Но даже одни лишь часто повторяющиеся режимы тяги создают намного большую усталостную нагруженность

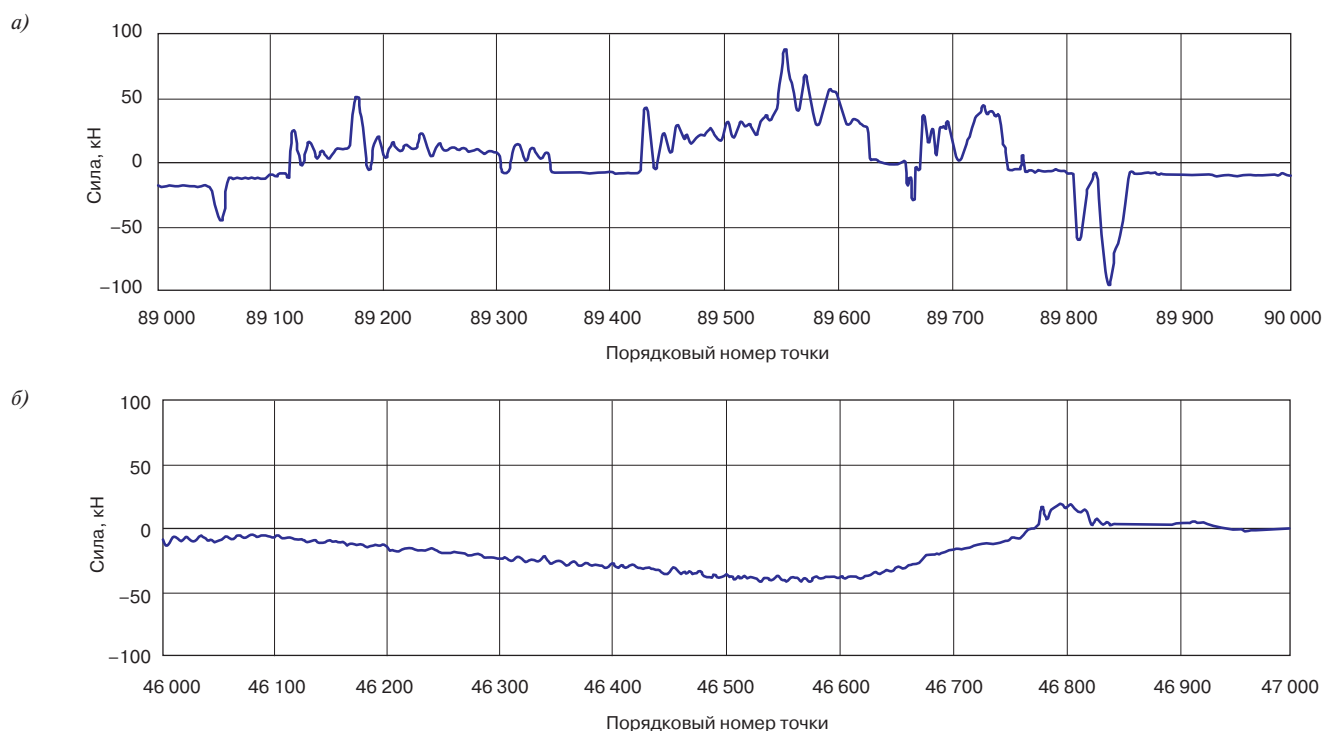


Рис. 1. Реализация продольных сил в межвагонных сцепках электропоезда при трогании и тяге:
a — пригородный электропоезд ЭТ2М; *б* — городской электропоезд ЭС2Г

Fig. 1. Longitudinal forces in the inter-car couplings of an electric train during the starting and traction phases:
a — suburban electric train ET2M; *б* — city electric train ES2G

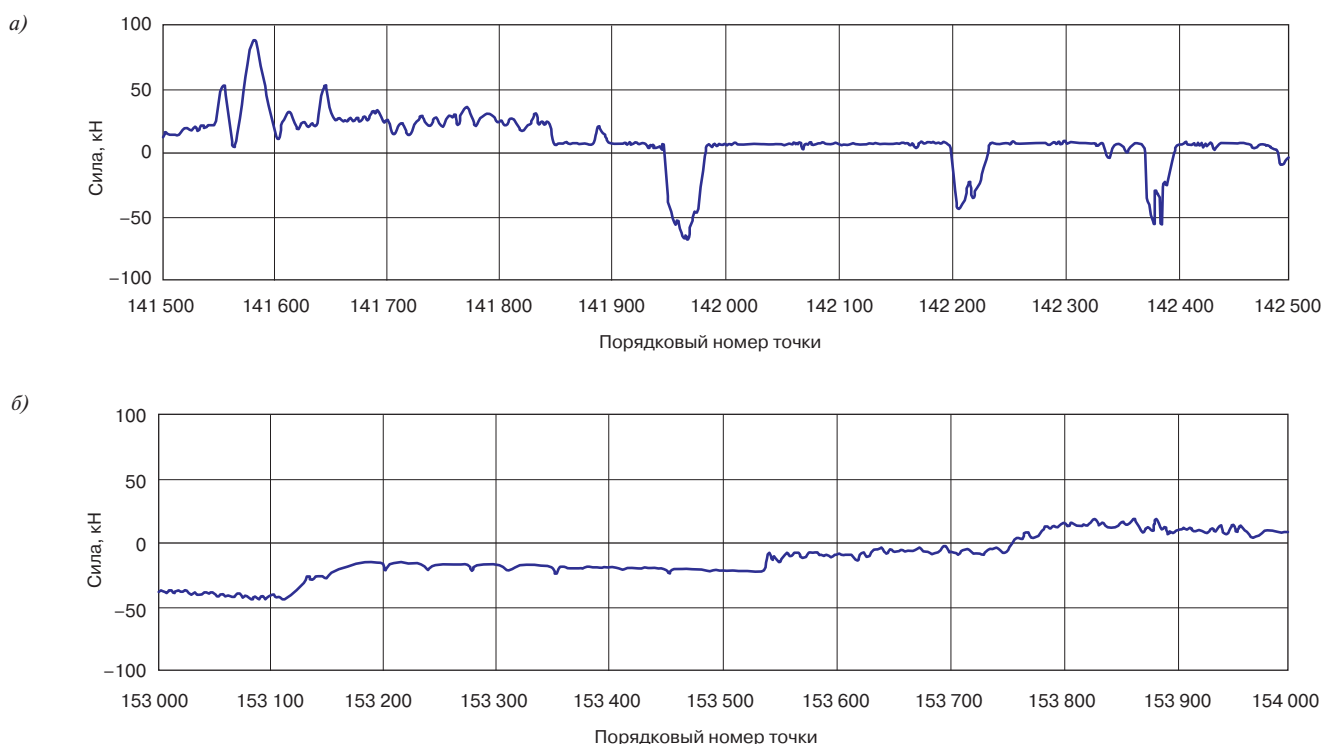


Рис. 2. Реализация продольных сил в межвагонных сцепках электропоезда в режиме тяги при скорости 70–80 км/ч:
a — пригородный электропоезд ЭТ2М; *б* — городской электропоезд ЭС2Г

Fig. 2. Longitudinal forces in the inter-car couplings of an electric train in traction mode at speeds of 70–80 km/h:
a — suburban electric train ET2M; *б* — city electric train ES2G

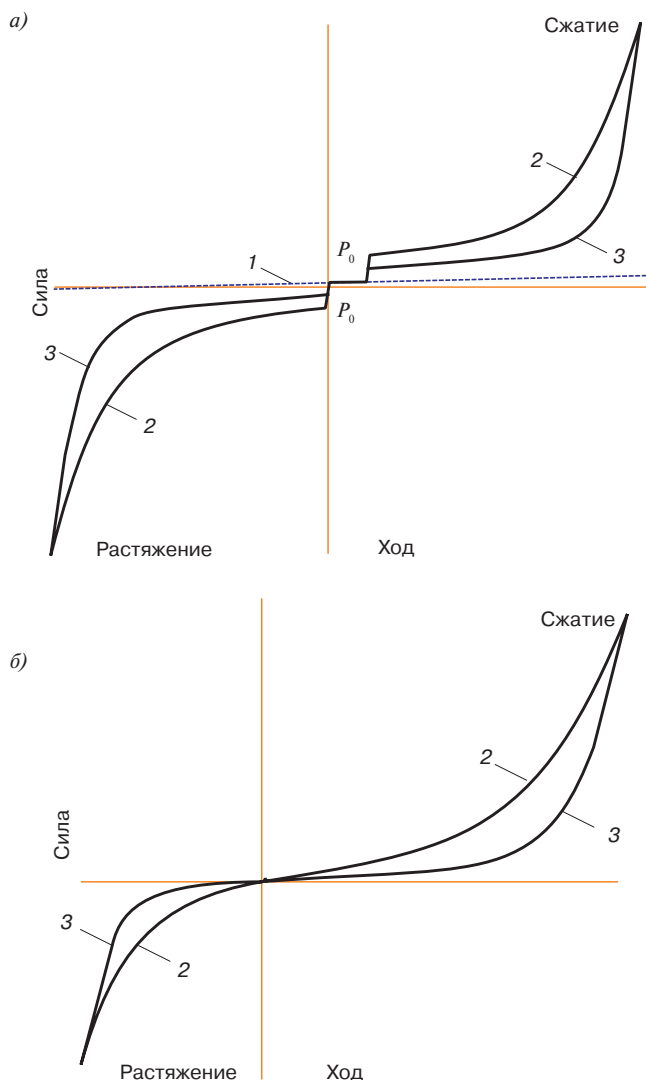


Рис. 3. Силовые характеристики межвагонных связей на подвижном составе:

а — с поглощающими аппаратами, установленными по ГОСТ 3475–81; б — с поглощающими аппаратами, объединенными со сцепкой: 1 — линия нагружения и разгрузки буферов; 2 — линия нагружения поглощающих аппаратов; 3 — линия разгрузки поглощающих аппаратов

Fig. 3. Load-bearing characteristics of intercar links on trains:

а — with cushions installed in accordance with GOST 3475–81; б — with cushions combined with a coupling: 1 — line of loading and unloading buffers; 2 — loading line of cushions; 3 — unloading line of cushions

сцепки пригородных электропоездов по сравнению с городскими. Причиной этого могут являться различия в характеристиках поглощающих аппаратов сцепных устройств. Однако не все параметры поглощающих аппаратов из числа установленных действующим ГОСТ 32913–2014 [5] могут оказывать влияние на отмеченное различие:

- значение энергоемкости аппарата такого влияния оказать не может, так как уровень сил, при котором оно реализуется (1000 кН), никогда не возникает при движении электропоездов — за весь пробег электропоездов с регистрацией сил, составивший в данной работе более 9600 км, максимальные силы не превышали уровня +117/–128 кН при сжатии/растяжении;

- коэффициент необратимого поглощения энергии всех эксплуатируемых моделей пассажирских поглощающих аппаратов с резиновыми или полимерными упругими элементами составляет 0,35–0,45, т. е. различается весьма незначительно;

- конструкционный ход, ресурс и температурные характеристики всех моделей поглощающих аппаратов весьма близки и также не могут оказывать влияния на увеличение амплитуды и частоты возникновения продольных сил.

Таким образом, из всех нормируемых параметров поглощающих аппаратов единственным значимым показателем, варьирующимся в широком диапазоне и способным оказать влияние на продольную динамику поезда при штатной эксплуатации, может быть только усилие начальной затяжки.

Наличие буферов, безусловно, влияет на динамику поезда с автосцепками СА-3, имеющими значительные конструкционные зазоры, и является для этого случая обязательным с целью исключения зазоров вдоль оси пути, негативно влияющих на продольные ускорения, т. е. комфорт и безопасность пассажиров. Однако для беззазорных сцепных устройств применение буферов неактуально — их установка заметно увеличит массу вагонов, незначительно влияя на другие параметры: увеличение объема техобслуживания, ухудшение условий прохождения сцепом вагонов по кривым малого радиуса, снижение относительных колебаний смежных вагонов при движении. Их установка не окажет влияния на продольную динамику поезда из-за несоизмеримо меньшей жесткости буферов по сравнению с поглощающими аппаратами (см. линии 1 и 2 на рис. 3, а).

Возвращаясь к усилию начальной затяжки, необходимо отметить различия в понимании данного термина. В соответствии с определением, приведенным в ГОСТ 32913–2014 [5], усилие начальной затяжки — это минимальная сила, которую нужно приложить к поглощающему аппарату при статическом нагружении, чтобы он начал сжиматься. Это однозначно для традиционной конструкции с размещением поглощающего аппарата в соответствии с ГОСТ 3475–81 [12], когда аппарат, установленный в тяговом хомуте между передним и задним упорами, всегда работает на сжатие — при действии как сжимающих, так и растягивающих сил. В поглощающем аппарате 2 модели Т-8П, объединенном с межвагонной сцепкой 1 модели БСУ-ТМ122 (рис. 4), используемом на электропоездах ЭС2Г и ЭС2ГП, как и в некоторых зарубежных

моделях аппаратов, реализована иная схема (рис. 5): одна группа (поз. 2) упругих элементов воспринимает только сжимающую нагрузку, другая группа (поз. 1) — только растягивающую. Обе эти группы в аппарате предварительно поджаты, а точка приложения нагрузки к аппарату находится между этими группами (где усилия поджатия с каждой стороны равны), т. е. любая малая сила приводит к деформации аппарата (независимо от силы предварительного поджатия упругих элементов). То есть формально это не соответствует стандартизированному определению усилия начальной затяжки, несмотря на наличие предварительного поджатия упругих элементов.

Вместе с тем основанием необходимости наличия ненулевого значения усилия начальной затяжки является снижение энергоемкости при его отсутствии, так как без начальной затяжки часть рабочего хода аппарата будет происходить с малой силой сопротивления, при которой поглощение энергии незначительно. Это видно из сравнения силовых характеристик для двух вариантов, приведенных на рис. 3, а и 3, б, — энергоемкость соответствует площади под линией нагружения. Усилие начальной затяжки обозначено P_0 . Вместе с тем требуемую ГОСТ 32913–2014 [5] энергоемкость применяемых на электропоездах аппаратов классов П0 и П1 (7 и 20 кДж соответственно) возможно обеспечить даже при низких усилиях начальной затяжки.

Однако, как отмечено выше, низкий уровень усилия начальной затяжки обеспечивает возможность сжатия аппарата уже при малых силах и их демпфирование. При большом усилии начальной затяжки, напротив, даже минимальное внешнее воздействие приводит к кратковременному скачкообразному увеличению силы (так как жесткость в этом случае равна жесткости рамы вагона), что видно на рис. 1, а и 2, а и практически отсутствует на рис. 1, б и 2, б.

Несимметричность силовой характеристики, приведенной на рис. 3, б, объясняется тем, что к группе упругих элементов, работающих при действии сжимающих сил, предъявляются требования демпфирования сил более высокого уровня, возникающих при маневровых соударениях. Указанная конструкция поглощающего аппарата с двумя группами упругих элементов (работающих только при сжимающих или только при растягивающих силах) имеет и другие положительные и отрицательные стороны: с одной стороны, возможность регулирования поджатия упругих элементов при изготовлении и техническом обслуживании (после их просадки в течение жизненного цикла); с другой стороны, увеличение габаритов поглощающего аппарата вследствие наличия второй группы упругих элементов. Но к настоящему времени применение таких аппаратов на железных дорогах колеи 1520 мм еще очень ограничено, и опыт их эксплуатации пока незначителен.

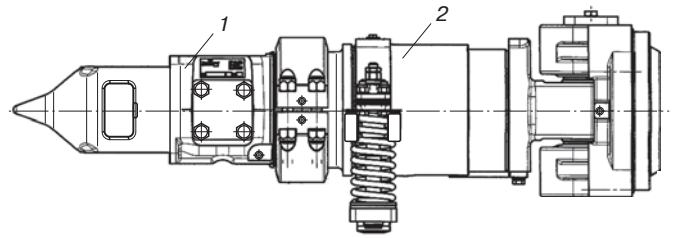


Рис. 4. Общий вид сцепного устройства БСУ-ТМ122:
1 — межвагонная сцепка; 2 — поглощающий аппарат

Fig. 4. General view of the BSU-TM122 drawbar:
1 — inter-car coupling; 2 — cushion

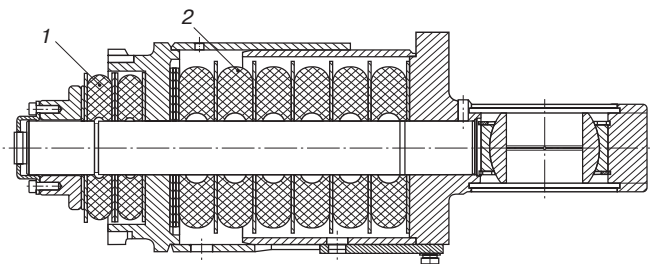


Рис. 5. Общий вид поглощающего аппарата Т-8П:
1 — группа упругих элементов для восприятия растягивающей нагрузки; 2 — группа упругих элементов для восприятия сжимающей нагрузки

Fig. 5. General view of the T-8P cushion:
1 — group of elastic elements for tensile loads;
2 — group of elastic elements for compressive loads

Заключение. Результаты экспериментальных исследований показали, что наибольшей нагруженности силами переменного знака и уровня, способными вызывать усталостные повреждения сцепок электропоезда, подвергаются автосцепки, установленные в соответствии с ГОСТ 3475–81 с обязательным поджатием поглощающих аппаратов между упорами.

Меньшая нагруженность сцепных устройств была зарегистрирована в электропоездах с поглощающими аппаратами, объединенными со сцепкой, позволяющими обеспечивать демпфирование сколь угодно малых продольных сил. Такая схема реализована в конструкции аппарата с двумя группами упругих элементов, одна из которых воспринимает только сжимающую нагрузку, другая — только растягивающую. Несмотря на предварительное поджатие обеих групп упругих элементов любая малая сила приводит к деформации аппарата и снижению уровня действующих сил во всех режимах движения поезда.

Для широкой реализации изложенных результатов исследований, показывающих положительное влияние снижения усилия начальной затяжки на продольную динамику моторвагонного подвижного состава,

и внесения соответствующих изменений в нормативную базу необходимо подтверждение выявленных преимуществ в различных условиях эксплуатации с проведением поездных испытаний.

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 и не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Продольная динамика подвижного состава железных дорог / А. П. Болдырев [и др.]. Курск: Университетская книга, 2022. 149 с. [Boldyrev A. P., Zhirov P. D., Bondarenko D. A., Kravtsov S. A. *Longitudinal dynamics of railway multiple units*. Kursk: Universitetskaya kniga; 2022. 149 p. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/gqexfw>.
2. Науменко Н. Е., Хижа И. Ю. Оценка влияния работы устройств системы пассивной безопасности пассажирского локомотива на его динамическую нагруженность при аварийном столкновении с препятствием на железной дороге // Наука та прогрес транспорту = Наука и прогресс транспорта: вісник Дніпропетровського нац. ун-ту залізн. тр-ту ім. акад. В. Лазаряна. 2013. Вип. 1 (43). С. 154–161 [Naumenko N. E., Hizha I. Yu. Influence assessment of the passive restraint system devices of the passenger locomotive in its dynamic loading during accident on the railroad. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*. 2013;(1):154-161. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/rbgduh>.
3. Shan W., Wei L., Chen K. Longitudinal train dynamics of electric multiple units under rescue. *Journal of Modern Transportation*. 2017;25(8):250-260. <https://doi.org/10.1007/s40534-017-0142-x>.
4. Ступин Д. А., Беляев В. И. Исследование влияния энергоемкости поглощающих аппаратов на продольные усилия в наливном поезде // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2016. Т. 75, № 3. С. 154–160 [Stupin D. A., Belyaev V. I. Research of influence of energy consumption of draft gears on longitudinal forces in the tank car train. *Russian Railway Science Journal*. 2016;75(3):154-160. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-3-154-160>.
5. ГОСТ 32913–2014. Аппараты поглощающие сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Технические требования и правила приемки: дата введения 2015-06-01. М.: Стандартинформ, 2015. 12 с. [GOST 32913–2014. *Draft gears of coupler and automatic coupler devices of railway rolling stock. Technical specifications and acceptance rules*. Introduction date 2015-06-01. Moscow: Standartinform; 2015. 12 p. (In Russ.)].
6. ICE T derail, ICE1 develops cracks. *Modern Railways*. 2000;57(620):53.
7. Зайцева Т. Н. Аварии с пассажирскими поездами на железных дорогах Германии // Железнодорожный транспорт. Серия: Безопасность движения: обзорная информация. М.: ЦНИИТЭИ МПС, 2001. Вып. 2. С. 36 [Zaytseva T. N. Passenger train accidents in Germany. In: *Railway transport. Series: Traffic safety, overview information*. Moscow:

Central Research Institute of Information and Technical and Economic Research of Railway Transport of the Ministry of Railways; 2001. Issue 2. 36 p. (In Russ.)].

8. Śmietana K. Coraz wi kszy problem z p kni ciami w poci gach Dart. *PKP Intercity wstrzymuje sprzeda biletów*. 4 April 2019. (In Polish). URL: <https://forsal.pl/artykuly/1406692,pekniecia-w-pociagach-dart-pkp-intercity-wstrzymuje-sprzedaz-biletow-na-niektore-polaczenia.html> (accessed: 01.03.2023).

9. Jackiewicz J. Coupler force reduction method for multiple-unit trains using a new hierarchical control system. *Railway Engineering Science*. 2021;29(2):163-182. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00239-w>.

10. Определение нагруженности сцепных устройств электропоездов / В. И. Беляев [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 4. С. 297–305 [Belyaev V. I., Gorskiy D. V., Stupin D. A., Konyshkov A. N. Evaluation of prevailing draft loads in the couplings of the electric trains. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(4):297-305. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-297-305>.

11. ГОСТ 25.101–83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов: дата введения 1984-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1983. 21 с. [GOST 25.101–83. *Strength calculation and testing. Representation of random loading of machine elements and structures and statistical evaluation of results*. Introduction date 1984-07-01. Moscow: Publishing House of Standards; 1983. 21 p. (In Russ.)].

12. ГОСТ 3475–81. Устройство автосцепное подвижного состава железных дорог колеи 1520 (1524) мм. Установочные размеры: дата введения 1982-01-01. Переиздание с изменениями № 1, 2, утв. в августе 1986 г., феврале 1991 г. (ИУС 11–86, 5–91). М.: Изд-во стандартов, 1998. 6 с. [GOST 3475–81. *Automatic coupling device for rolling stock of 1520 (1524) mm gauge railways. Installation dimensions*. Introduction date 1982-01-01. Reissue. Moscow: Publishing House of Standards; 1998. 6 p. (In Russ.)].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Владимир Игоревич БЕЛЯЕВ, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Центр испытаний и моделирования, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 273129, <https://orcid.org/0000-0003-1020-6865>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir I. BELYAEV, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Centre for Testing and Modelling, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 273129, <https://orcid.org/0000-0003-1020-6865>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The author has read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 17.03.2023, рецензия от первого рецензента получена 12.04.2023, рецензия от второго рецензента получена 21.04.2023, принята к публикации 02.05.2023.

The article was submitted 17.03.2023, first review received 12.04.2023, second review received 21.04.2023, accepted for publication 02.05.2023.

Оригинальная статья

УДК 629.4.027.2(045)

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-117-126>EDN: <https://elibrary.ru/npjjfa>

Оценка кососимметричной нагрузки, действующей на раму тележки грузового вагона при сходе колеса с рельса

Г. И. Гаджиметов✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена практика проведения проверок вновь создаваемой конструкции вагона с целью оценки прочности с учетом предельных эксплуатационных нагрузок и схем их приложения, оговоренных в нормативных документах. При оценке статической прочности рамы тележки нормативными документами не предусмотрено рассмотрение ее кососимметричного нагружения. При этом наличие остаточной кососимметричной деформации рамы по условиям механической безопасности подвижного состава не допускается. Особенно восприимчивы к кососимметричным нагрузкам цельносварные рамы тележек. Это говорит в пользу необходимости уточнения расчетных режимов для обеспечения надежности и безопасности использования вагонов в эксплуатации.

Материалы и методы. Для определения схемы нагружения и величины кососимметричной нагрузки применялись расчетно-аналитический метод, методы компьютерного моделирования, выполнена экспериментальная работа на пассажирском вагоне с двухосными тележками с цельносварной рамой, где боковые балки жестко соединены между собой поперечными балками.

Результаты. Обоснован дополнительный расчетный режим «Сход», актуальный при эксплуатации грузовых вагонов с цельносварной рамой тележки. Определены схема нагружения рамы тележки и величины нагрузок, действующих на раму для этого режима, при котором необходимо производить оценку ее статической прочности.

Обсуждение и выводы. При сходе колеса рама тележки цельносварной конструкции подвергается воздействию максимальных кососимметричных нагрузок, что может привести к ее кососимметричной деформации и выходу из строя. Раму тележки цельносварной конструкции необходимо оценивать на статическую прочность в режиме «Сход». Обоснованы коэффициенты перегрузки. Разработка, расчет и оценка конструкции с учетом указанного выше дополнительного режима позволит повысить надежность рамы тележки в эксплуатации и безопасность движения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грузовой вагон, рама тележки, цельносварная рама, расчетный режим, кососимметричная нагрузка, сход, статическая прочность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гаджиметов Г. И. Оценка кососимметричной нагрузки, действующей на раму тележки грузового вагона при сходе колеса с рельса // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 2. С. 117–126. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-117-126>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.4.027.2(045)

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-117-126>

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



Assessment of the axisymmetric load acting on the bogie frame of a wagon during derailment

Gadzhimet I. Gadzhimetov✉

Research and Design Technological Institute of Rolling Stock,
Kolomna, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors describe the practice of checking newly built cars to assess their durability, taking into account the ultimate operating loads and their application schemes stipulated in the regulatory documents. Axisymmetric loads are not part of the bogie frame static strength assessment rules. For mechanical safety reasons, the presence of residual frame deformation asymmetry is not permitted. All-welded bogie frames are particularly prone to axisymmetric loads. It confirms the need for refinement of design methods to ensure reliability and safety of cars in service.

Materials and methods. Methods of computational analysis and computer modelling were used to determine the loading scheme and the magnitude of the axisymmetric load; experimental work was carried out on a passenger carriage with two-axle bogies and an all-welded frame in which the side beams are rigidly connected by cross beams.

Results. An additional type of derailment is justified, which is relevant for the operation of wagons with all-welded bogie frames. The load pattern of the bogie frame and the magnitudes of the load applied to the frame for the mode of operation in which the static strength of the frame is to be assessed are determined.

Discussion and conclusions. In the event of a wheel derailment, the all-welded bogie frame is subjected to maximum axisymmetric loads, which could lead to axisymmetric deformation and frame failure. The all-welded bogie frame should be assessed for static strength in derailment mode. The overload coefficients are justified. The reliability of the bogie frame in service and the safety of the traffic could be improved by developing, calculating and evaluating the design with the additional mode mentioned above.

KEYWORDS: wagon, bogie frame, all-welded frame, design mode, axisymmetric load, derailment, static strength

FOR CITATION: Gadzhimetov G.I. Assessment of the axisymmetric load acting on the bogie frame of a wagon during derailment. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(2):117-126. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-117-126>.

✉ gadzhimetovgi@vnikti.com (G. I. Gadzhimetov)

© Gadzhimetov G. I., 2023

Введение. При проектировании вагона проводится комплекс расчетно-экспериментальных проверок его несущих конструкций для оценки прочности. Эти проверки проводят с учетом воздействия предельных по величине и направленности эксплуатационных нагрузок, регламентированных ГОСТ 33211–2014 [1] с целью обеспечения механической безопасности подвижного состава при предельных режимах нагружения и воздействиях.

По условиям, оговоренным в [2], при эксплуатации не должно возникнуть пластических деформаций несущих конструкций вагона. Например, наличие остаточной кососимметричной деформации рамы тележки сварной конструкции может приводить к перераспределению нагрузок на шейки осей колесных пар, снижению коэффициента запаса устойчивости колесной пары от схода с рельсов, сравнимому по влиянию с боковой качкой вагона, выводу дефектной рамы из эксплуатации [3].

Нормативный документ [1] предусматривает проверку рамы тележки на статическую прочность от сочетания сил, действующих на вагон при выполнении операций на сортировочной горке и при торможении состава, движущегося по кривому участку пути. Нормативными документами [1, 4–6] при оценке прочности рамы тележки предусмотрен учет кососимметричной нагрузки, возникающей при наезде на неровность пути, в сочетании с другими нагрузками. При этом не предусматривается оценка статической прочности по допускаемым напряжениям от максимальных кососимметричных сил, при действии которых возможно появление остаточных деформаций рамы тележки.

Эксплуатируемые в составе грузовых вагонов трехэлементные тележки по ГОСТ 9246–2013 [7] не восприимчивы к кососимметричным нагрузкам в отличие от тележек с жесткой рамой цельносварной конструкции, используемых в составе грузовых вагонов с конструкционной скоростью 140 км/ч [8, 9]. Наглядно это состояние показано на рис. 1. Вместе с тем в эксплуатации фиксируются случаи проваливания (схода) колеса грузовых вагонов внутрь колеи (рис. 2) [10]. Во многом такие случаи являются следствием технического состояния путей, которые не соответствуют элементарным требованиям [11], и нарушений при проведении маневровых работ.

При таком сходе на раму тележки цельносварной конструкции, восприимчивой к кососимметричным нагрузкам, воздействуют максимальные кососимметричные нагрузки. В европейском стандарте [12] предусмотрен режим, воспроизводящий эффект схода колеса с рельса, в действующем российском стандарте [1] такого режима нет.

В связи с восприимчивостью рамы тележки цельносварной конструкции к кососимметричным

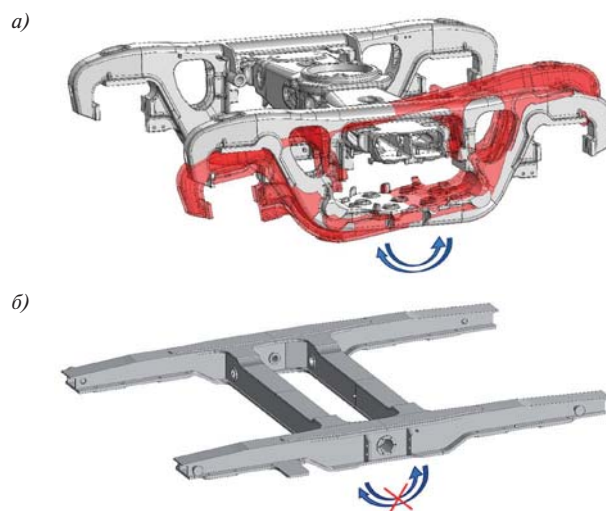


Рис. 1. Схематизированное представление восприимчивости несущих конструкций тележек к кососимметричным нагрузкам: а — сочленение несущих конструкций тележки модели 18-100; б — рама тележки жесткой сварной конструкции

Fig. 1. Schematic illustration of the susceptibility of the load-bearing structure of the bogie to an axisymmetric load: а — joint of the load-bearing structures of the 18-100 bogie; б — rigid welded bogie frame



Рис. 2. Случаи проваливания колеса внутрь колеи
Фото из открытых источников

Fig. 2. Cases of wheels slipping into the track
Open source photos

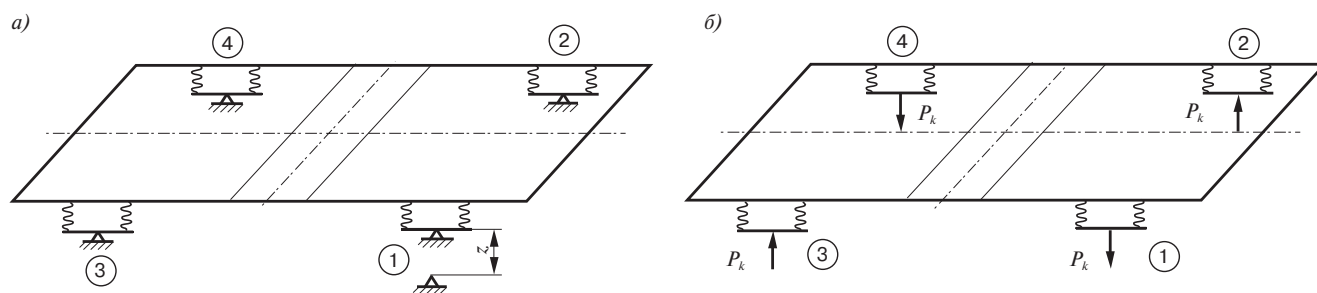


Рис. 3. Схема действия кососимметричных сил при сходе колеса с рельса: *a* — перемещение колеса z при сходе с рельса; *b* — система взаимно уравновешенных вертикальных кососимметричных сил P_k , возникающих в раме при сходе: 1, 2, 3, 4 — условный номер колеса

Fig. 3. Diagram of axisymmetric forces during wheel derailment: *a* — movement of the wheel z during the derailment; *b* — system of mutually balanced vertical axisymmetric forces P_k that occur in the frame during the derailment: 1, 2, 3, 4 — conditional wheel number

нагрузкам при сходе колеса с рельса является актуальным проведение исследований по определению этих нагрузок для использования при оценке ее статической прочности. Данный режим обозначим как режим «Сход».

Определение кососимметричных нагрузок расчетно-аналитическим способом. Кососимметричная нагрузка, воспринимаемая рамой тележки при сходе колеса с

рельса, представляет собой систему уравновешенных вертикальных сил. Для двухосной тележки данная нагрузка состоит из четырех равных сил, приложенных к буксовым проемам. Две из этих сил, расположенные по диагонали, действуют вверх, а две другие — вниз (рис. 3).

Кососимметричную силу P_k , действующую на раму тележки от вертикального перемещения одного колеса тележки при его сходе с рельса, определим по формуле (1) [13, 14]:

$$P_k = \frac{z}{4} \frac{2b}{2S} \frac{C_6 C_p}{C_6 + C_p}, \quad (1)$$

где z — вертикальное перемещение одного колеса тележки при сходе колеса с рельса, м; $2b$ — расстояние между центрами буксовых опор рамы, м; $2S$ — расстояние между кругами катания колес колесной пары, м; C_6 — жесткость рессорного подвешивания (на один буксовый узел), кН/м; C_p — жесткость рамы тележки при кососимметричной нагрузке, кН/м, определяемая по формуле

$$C_p = \frac{1}{\delta_k}, \quad (2)$$

где δ_k — перемещение четверти рамы от кососимметричной силы, м, при $P_k = 1$ кН (рис. 4).

На рис. 5 наглядно представлено изменение величин сил, действующих на буксовые проемы рамы тележки при вертикальном перемещении колеса вниз на 190 мм (высота рельса Р75). Силы рассчитаны по формуле (1) на примере двухосной тележки с характеристиками, приведенными в таблице.

Распределение имеет кососимметричный характер.

Поскольку в формуле (1) не предусмотрено предельное условие, связанное со статическим прогибом рессорного подвешивания, и, учитывая, что при больших

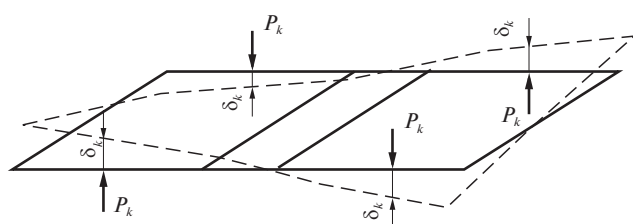


Рис. 4. Схема действия кососимметричных сил для определения жесткости рамы тележки C_p

Fig. 4. Diagram of axisymmetric forces for determination of bogie frame stiffness C_p

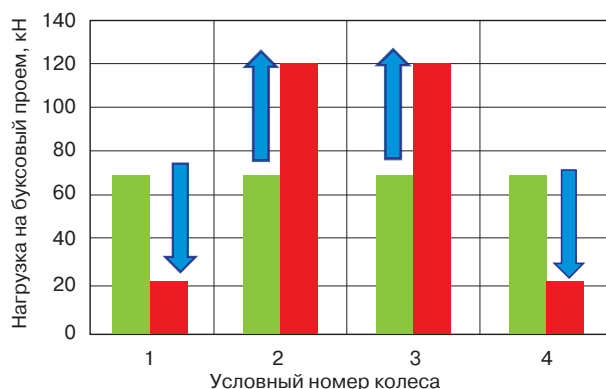


Рис. 5. Изменение нагрузок на буксовые проемы рамы тележки при сходе первого колеса с рельса

Fig. 5. Change in the loads acting on the pedestal jaw openings of the bogie frame during the derailment of the first wheel

вертикальных перемещениях колеса вниз возможно его провисание, проведено моделирование схода колеса с использованием программного пакета «Универсальный механизм».

Определение распределения нагрузок от колес тележки на рельсы при моделировании. Для исследования влияния схода колеса с рельса на распределение нагрузок по колесам в тележке с цельносварной рамой в сравнении с трехэлементной тележкой в программном комплексе «Универсальный механизм» были разработаны компьютерные модели вагонов в твердотельной постановке. Моделирование схода производилось путем проезда неровности, имитирующей сход колеса с рельса (рис. 6). Моделирование проводилось с тележками модели 18-100, имитирующими тележку с рамой, способной упруго деформироваться под весом кузова, и тележками с цельносварной жесткой рамой.

По результатам моделирования выявлено, что при сходе колеса с рельса происходит перераспределение нагрузки от колес на рельсы (рис. 7).

Распределение нагрузки от тележки (колес) на рельсы имеет кососимметричный характер (рис. 7).

При этом у вагона с рамой тележки цельносварной конструкции кососимметричная нагрузка от колес на рельсы выражена ярко.

При сходе колеса с рельса картина передачи нагрузки от кузова вагона на тележку модели 18-100 меняется. В этом случае нагрузка от кузова вагона на тележку передается через подпятник и один боковой скользящий (рис. 8), что приводит к перегрузке одной боковины рамы тележки.

Полученные в ходе моделирования результаты подтверждают кососимметричный характер воздействия сил на раму тележки цельносварной конструкции при сходе колеса с рельса.

Натурный эксперимент для определения распределения нагрузок от колес на рельсы. Поскольку при моделировании элементы тележки принимались твердотельными, а рама тележки цельносварной конструкции обладает некоторой гибкостью, для подтверждения распределения нагрузок на буксовые проемы рамы тележки при сходе колеса с рельса, определенных в ходе теоретических исследований, проведен натурный эксперимент на пассажирском

Характеристики тележки

Таблица

Bogie specifications

Table

Параметр	Значение
Жесткость рессорного подвешивания (на один буксовый узел), кН/м	950
Жесткость рамы тележки при кососимметричной нагрузке, кН/м	5364,8
Расстояние между центрами буксовых опор рамы, м	2,036
Расстояние между кругами катания колес колесной пары, м	1,58
Вес обрессоренных частей, приходящийся на шейку оси колесной пары, кН	77

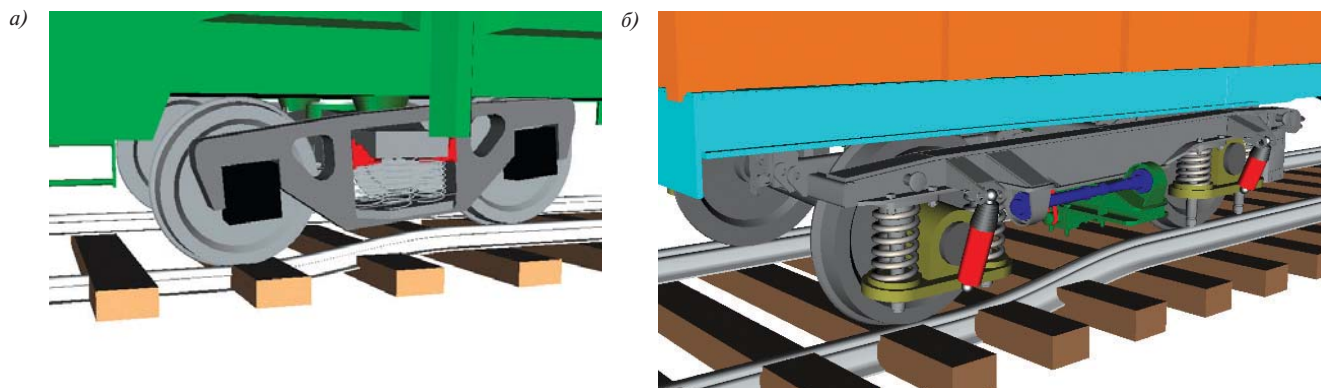


Рис. 6. Моделирование схода колеса с рельса тележки модели:
а — 18-100; б — 18-6981

Fig. 6. Simulation of a wheel derailment of a model bogie:
а — 18-100; б — 18-6981

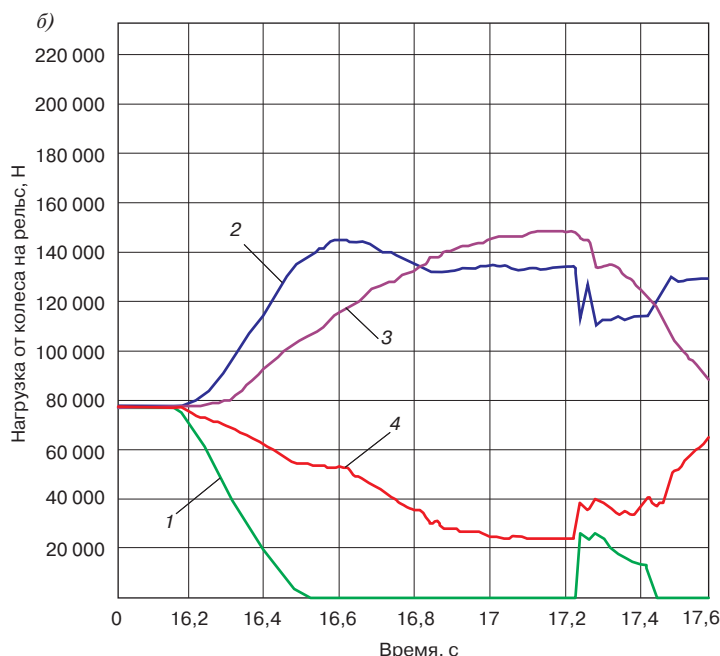
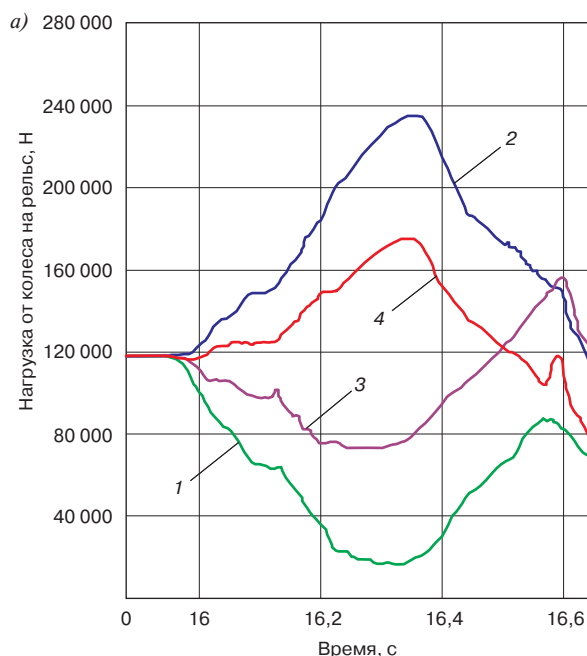


Рис. 7. Распределение нагрузок на рельсы от колес в процессе схода с рельсов вагона с тележками модели 18-100 (а) и цельносварной рамой (б):

1 — первое колесо; 2 — второе колесо; 3 — третье колесо; 4 — четвертое колесо

Fig. 7. Distribution of wheel loads on the rails during car derailment with bogies model 18-100 (a) and with an all-welded frame (b):

1 — first wheel; 2 — second wheel; 3 — third wheel; 4 — fourth wheel

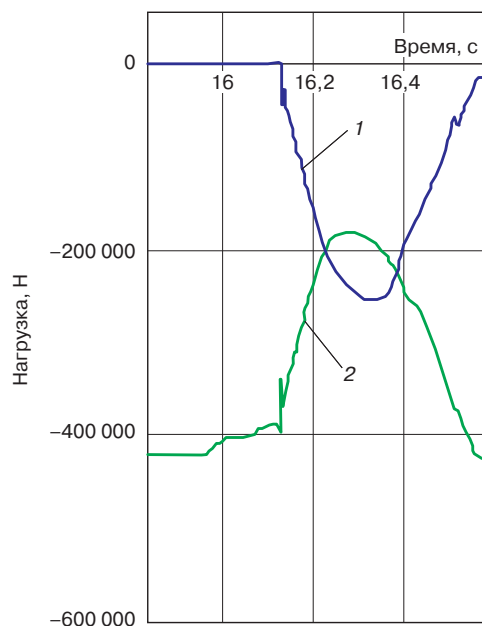


Рис. 8. Распределение нагрузок от кузова на опоры тележки в процессе схода:

1 — скользян со стороны второго и четвертого колеса; 2 — подпятник

Fig. 8. Distribution of the load from the bogie body to the bogie supports during derailment:

1 — second and fourth wheel side bearer; 2 — centre plate

вагоне. Пассажирский вагон имел в своем составе двухосные тележки с цельносварной рамой, где боковые балки жестко соединены между собой поперечными балками.

Нагрузки на буксовые проемы по механическим напряжениям при деформации рамы от кососимметричных сил фиксировались тензорезисторами 15, 25, 35, 45, наклеенными на раме тележки по схеме, представленной на рис. 9.

При проведении натурного эксперимента имитация схода колеса с рельса (рис. 10) производилась опусканием кузова вагона с тележкой на опоры, которые устанавливались под три колеса (рис. 10, б).

Распределение нагрузок на буксовые проемы рамы тележки, полученное в ходе эксперимента, представлено на рис. 11.

На этапе 1 нагрузка от веса вагона полностью передавалась от колес на рельс. В эксперименте уровень нагрузки, передаваемой на раму тележки от каждого колеса, определялся по разности напряжений на этапах 1 и 3 относительно напряжения этапа 2, принимаемого за ноль. На этапе 2 вагон с тележкой был поднят на домкратах, нагрузка через колеса на рельс не передавалась. На этапе 3 имитировался сход с провалом первого по ходу движения колеса на высоту рельса.

Анализ осциллограмм (рис. 11) показывает, что при сходе одного колеса почти вся нагрузка на рельсы передается через другие три колеса. Поскольку кузов вагона имеет крутильную жесткость, в большей степени перегружается противоположная по отношению к сошедшему колесу боковина. В этом случае нагрузка от кузова на тележку передается через скользящий. Проведенный эксперимент подтверждает результаты моделирования, приведенные в предыдущем разделе.

Промежуточные результаты. Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований показал, что величина кососимметричных нагрузок, действующих на раму тележки грузового вагона при сходе колеса с рельса, зависит от жесткости цельносварной рамы. В связи с влиянием жесткости рамы тележки на ее нагруженность (рис. 7) и на основании проведенных исследований (рис. 7 и рис. 11) предлагается предусматривать два расчетных случая воздействия нагрузок. Это позволит оценить прочность рамы тележки без проведения дополнительных исследований по нахождению распределения нагрузок на раму конкретной конструкции при сходе колеса с рельса.

Для первого случая нагрузки следует прикладывать к двум диагонально расположенным буксовым проемам рамы тележки. Тогда максимально нагружаются поперечные балки, соединяющие боковые балки, что связано с деформацией от кручения при кососимметричном нагружении рамы.

Для второго случая нагрузки прикладываются к трем буксовым проемам рамы тележки. Схемы нагружения и величины нагрузок, равных произведению статической нагрузки на буксовый проем при максимальной расчетной нагрузке от колесной

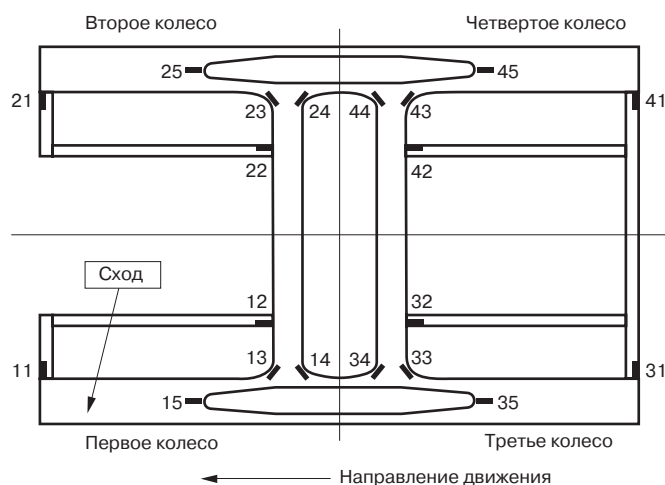


Рис. 9. Схема размещения тензорезисторов на раме тележки пассажирского вагона

Fig. 9. Arrangement of strain gauges on the bogie frame of a passenger carriage

пары на рельсы $P_{ст}$ с коэффициентом перегрузки, для обоих случаев приведены на рис. 12. Принятые коэффициенты перегрузки обеспечат проектирование конструкции рамы тележки, обладающей запасом по прочности от воздействия кососимметричных сил.

Обсуждение практического применения результатов. Выполним расчет статической прочности рамы тележки от воздействия кососимметричной нагрузки и сравним с напряженным состоянием от действия статических и инерционных сил при соударениях (режим Ia по [1]). Оценка прочности производится по допускаемым напряжениям по отношению к пределу



Рис. 10. Имитация схода с провалом первого по ходу движения колеса:
а — обезгруживание первого колеса; б — опускание кузова вагона с тележкой на опоры, установленные под три колеса

Fig. 10. Simulated derailment with first wheel failure in driving direction:
а — unloading of the first wheel; б — lowering of the car body with the bogie on the supports that are mounted under the three wheels

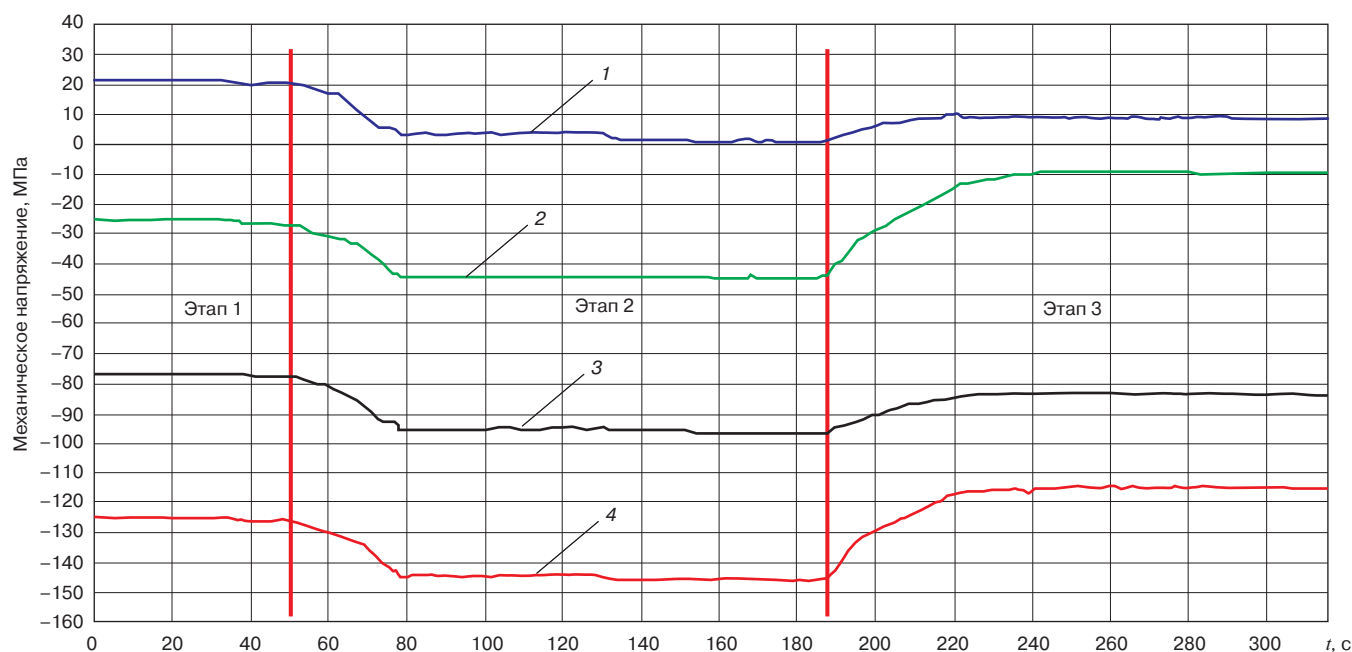


Рис. 11. Осциллограмма перераспределения нагрузок на раму тележки при сходе колеса:
1 — точка 15; 2 — точка 25; 3 — точка 35; 4 — точка 45

Fig. 11. Oscillogram of the redistribution of the load on the bogie frame during derailment:
1 — point 15; 2 — point 25; 3 — point 35; 4 — point 45

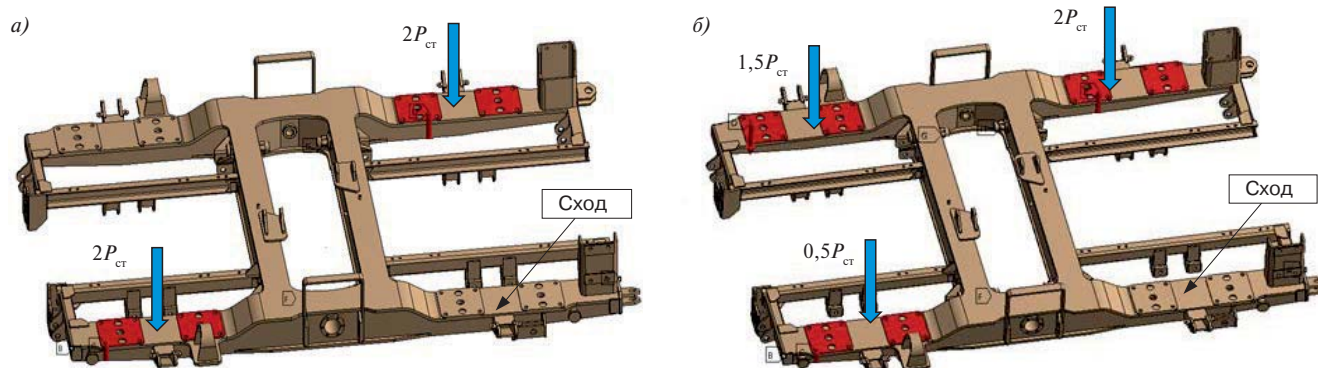


Рис. 12. Расчетные случаи нагружения рамы тележки
для оценки ее прочности от воздействия кососимметричных нагрузок:
а — нагружение по диагонали; б — нагружение по трем буксовым проемам

Fig. 12. Calculation of load cases for the bogie frame to assess its strength against axisymmetric loads:
а — diagonal loading; б — loading on three pedestal jaw openings

текучести материала. Результаты расчета представлены на рис. 13.

В рассчитанной конструкции рамы тележки максимальные напряжения от воздействия кососимметричных нагрузок не превышают напряжений от воздействия статической и инерционной сил,

предусмотренных режимом Ia [1], и ниже предела текучести применяемого материала — конструкционной стали 09Г2С. В поперечных балках, соединяющих боковые, несколько увеличиваются механические напряжения, что связано с деформацией от кручения при кососимметричном нагружении рамы.

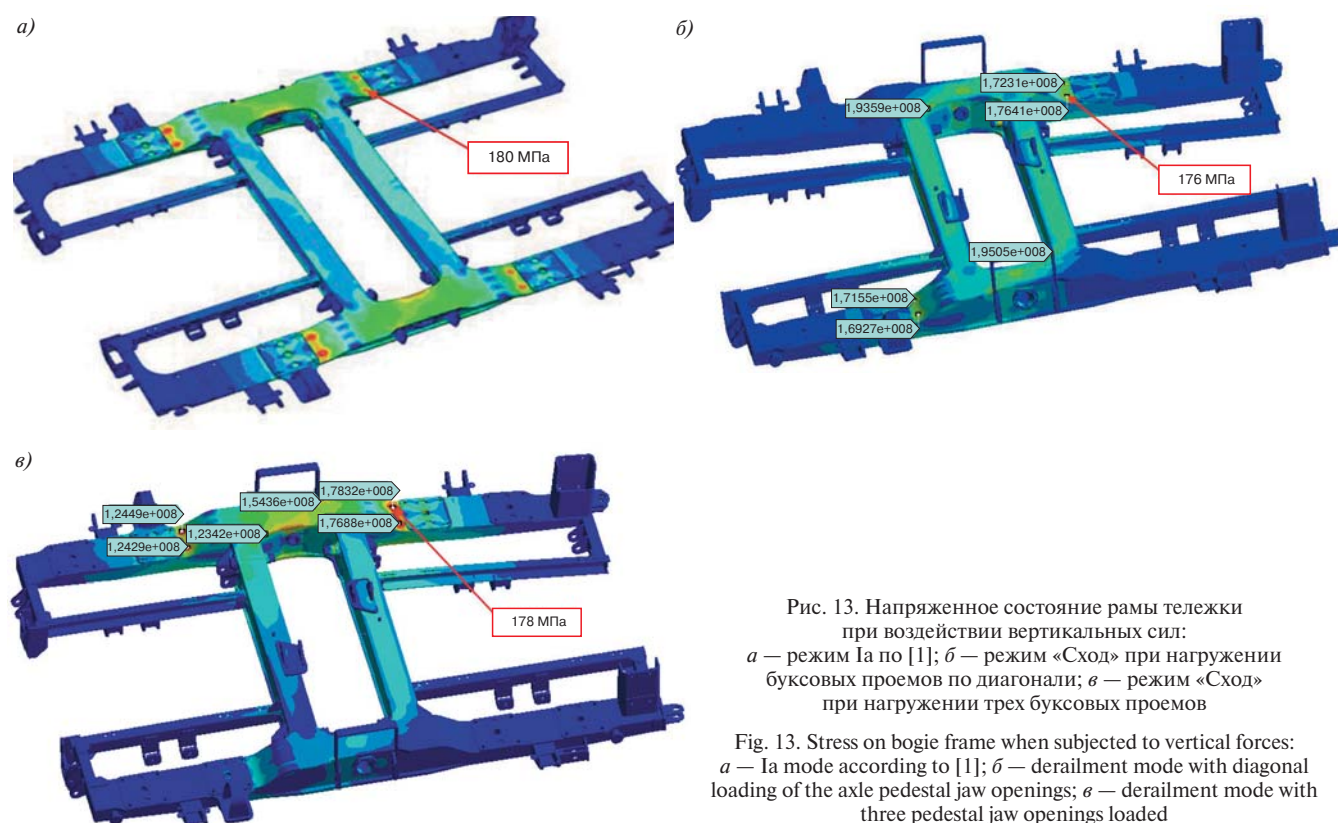


Рис. 13. Напряженное состояние рамы тележки при воздействии вертикальных сил:
 а — режим Ia по [1]; б — режим «Сход» при нагружении буксовых проемов по диагонали; в — режим «Сход» при нагружении трех буксовых проемов

Fig. 13. Stress on bogie frame when subjected to vertical forces:
 а — Ia mode according to [1]; б — derailment mode with diagonal loading of the axle pedestal jaw openings; в — derailment mode with three pedestal jaw openings loaded

Закключение. Выполненные исследования показали следующее:

- при сходе колеса рама тележки цельносварной конструкции подвергается воздействию максимальных кососимметричных нагрузок, что может привести к ее кососимметричной деформации;
- наличие остаточной кососимметричной деформации рамы тележки может приводить к снижению коэффициента запаса устойчивости колесной пары от схода с рельсов и выводу дефектной рамы из эксплуатации;
- для предупреждения остаточных деформаций и вывода из эксплуатации раму тележки цельносварной конструкции необходимо оценивать на статическую прочность в режиме «Сход»;
- для оценки прочности в режиме «Сход» необходимо учитывать два расчетных случая, предусматривающих нагружение рамы тележки по диагонали двух буксовых проемов и нагружение по трем буксовым проемам. В первом случае максимально нагружаются поперечные балки, соединяющие боковые, коэффициент перегрузки принимается равным двум величинам $P_{ст}$, соответствующим статической нагрузке на буксовый проем при максимальной расчетной нагрузке от колесной пары на рельсы. Во втором случае нагрузки прикладываются к трем буксовым проемам

рамы тележки, коэффициент перегрузки принимается равным 1,5, 2,0 и 0,5 от величины $P_{ст}$.

Благодарности: автор выражает благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the author expresses his gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

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 и не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам: дата введения 2016-07-01. М.: Стандартинформ, 2016. 58 с. [GOST 33211–2014. Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities. Introduction date 2016-07-01. Moscow: Standartinform; 2016. 58 p. (In Russ.).]

2. О безопасности железнодорожного подвижного состава: технический регламент ТС (ТР ТС 001/2011) [Электронный ресурс]: утв. решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_118006/f3b02e9d79030e4642ef1b1d270eb2fa97db50/ (дата обращения: 03.04.2022) [Technical Regulation of the Customs Union "On Safety of Railway Rolling Stock" (TR CU 001/2011). Approved by the Decision of the Commission of the Customs Union dated July 15, 2011 No. 710. (In Russ.). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_118006/f3b02e9d79030e4642ef1b1d270eb2fa97db50/ (accessed: 03.04.2022)].

3. Гаджиметов Г. И. О влиянии кососимметричной остаточной деформации рамы тележки вагона на безопасность движения // Известия Транссиба. 2022. № 1 (49). С. 22–32 [Gadzhimetov G. I. About the influence of antisymmetric permanent strain of the wagon bogie frame on traffic safety. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2022;(1):22-32. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/hkkoxx>.

4. ГОСТ 33796–2016. Моторвагонный подвижной состав. Требования к прочности и динамическим качествам: дата введения 2017-04-01. М.: Стандартинформ, 2016. 41 с. [ГОСТ 33796–2016. *Railway multiple units. Durability and dynamics requirements*. Introduction date 2017-04-01. Moscow: Standartinform; 2016. 41 p. (In Russ.)].

5. ГОСТ Р 55513–2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам: дата введения 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 46 с. [ГОСТ Р 55513–2013. *Locomotives. Requirements for strength and dynamic properties*. Introduction date 2014-07-01. Moscow: Standartinform; 2014. 46 p. (In Russ.)].

6. ГОСТ 34093–2017. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Требования к прочности и динамическим качествам: дата введения 2018-01-01. М.: Стандартинформ, 2017. 45 с. [ГОСТ 34093–2017. *Passenger cars on locomotive traction. Requirements for structural strength and dynamic qualities*. Introduction date 2018-01-01. Moscow: Standartinform; 2017. 45 p. (In Russ.)].

7. ГОСТ 9246–2013. Тележки двухосные трехэлементные грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия: дата введения 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 37 с. [ГОСТ 9246–2013. *Bogies two-axle three-piece for freight wagons of 1520 mm gauge railways. General technical specifications*. Introduction date 2014-07-01. Moscow: Standartinform; 2014. 37 p. (In Russ.)].

8. Скоростной вагон-платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров модели 13-6704: особенности конструкции и перспективы применения / В. С. Коссов [и др.] // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2021. № 3 (55). С. 30–35 [Kossov V. S., Nikonov V. A., Shevtsov A. M., Romanov S. A., Epshteyn K. K., Savchenkov V. V. High-speed platform car for the transport of gross weight freight containers model 13-6704: design features and possible applications. *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznykh dorog*. 2021;(3):30-35. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/evjihj>.

9. К вопросу выбора вертикальных и горизонтальных связей в тележке для грузовых вагонов скоростных поездов / Г. И. Гаджиметов [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79, № 6. С. 351–359 [Gadzhimetov G. I., Petrov G. I., Panin Yu. A., Il'in I. E. On the issue of choosing vertical and horizontal connections in a bogie for freight cars of high-speed trains. *Russian Railway Science Journal*. 2020;79(6):351-359. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-351-359>.

10. Ночью на станции Дербышки с путей сошли два грузовых вагона [Электронный ресурс] // Реальное время: интернет-газета:

[сайт]. 2017. 22 апреля. URL: <https://realnoevremya.ru/news/63310-nochyu-na-stancii-derbyshki-s-putey-soshli-dva-gruzovyh-vagona> (дата обращения: 01.04.2022) [Two freight cars went off the tracks at Derbyshki railway station during the night. *Real'noe vremya: Internet newspaper: website*. 22 April 2017 (In Russ.). URL: <https://realnoevremya.ru/news/63310-nochyu-na-stancii-derbyshki-s-putey-soshli-dva-gruzovyh-vagona> (accessed: 01.04.2022)].

11. Дудкин Е. П., Рыбачок В. М. Проблемы устройства и содержания железнодорожных путей необщего пользования // Транспорт Российской Федерации. 2008. № 2 (15). С. 16–17 [Dudkin E. P., Rybachok V. M. Problems with the design and maintenance of railway tracks that are not open to the public. *Transport Rossiyskoy Federatsii*. 2008;(2):16-17. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/hkkoxx>.

12. DIN EN 13749–2021. *Railway applications – Wheelsets and bogies – Method of specifying the structural requirements of bogie frames. German version EN 13749:2021*. Publication date 2021-05. 59 p. <https://dx.doi.org/10.31030/3205224>.

13. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 317 с. [Norms for the calculation and design of railway carriages of the Ministry of Railways of the 1520 mm gauge (non-self-propelled). Moscow: GosNIIV-VNIIZhT; 1996. 317 p. (In Russ.)].

14. ГОСТ 31846–2012. Специальный подвижной состав. Требования к прочности несущих конструкций и динамическим качествам: дата введения 2014-01-01. М.: Стандартинформ, 2013. 71 с. [ГОСТ 31846–2012. *Special rolling stock. Requirements for bearing structure strength and for dynamic properties*. Introduction date 2014-01-01. Moscow: Standartinform; 2013. 71 p. (In Russ.)].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гаджимет Исамединович ГАДЖИМЕТОВ,
руководитель Испытательного центра подвижного состава,
Научно-исследовательский и конструкторско-технологический
институт подвижного состава (ВНИКИ, 140402, г. Коломна,
ул. Октябрьской революции, д. 410),
<https://orcid.org/0009-0006-1616-4765>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gadzhimet I. GADZHIMETOV,
Head of the Rolling Stock Testing Center, Research and Design
Technological Institute of Rolling Stock (140402, Kolomna, 410,
Oktyabrskoy Revolyutsii St.), <https://orcid.org/0009-0006-1616-4765>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The author has read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 06.07.2022, рецензия от первого рецензента получена 17.10.2022, рецензия от второго рецензента получена 23.11.2022, рецензия от третьего рецензента получена 09.03.2023, принята к публикации 25.04.2023.

The article was submitted 06.07.2022, first review received 17.10.2022, second review received 23.11.2022, third review received 09.03.2023, accepted for publication 25.04.2023.



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 621.313.333.2

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-127-134>EDN: <https://elibrary.ru/fwcqxe>

О применении численных методов для анализа магнитного поля в тяговых электрических машинах переменного тока

А. С. Зуев✉, М. Д. Глущенко

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Настоящая статья посвящена изучению современного подхода к проектированию вращающихся электрических машин. Приведен обзор существующих программных пакетов для моделирования электромагнитных и тепловых процессов, использующих численные конечно-элементные методы, призванные прийти на смену анализу сосредоточенных параметров электрических схем замещения. Описан спектр задач, решаемых современными российскими исследователями электрических машин: исследование тягово-энергетических характеристик, анализ электромагнитных помех, шума и вибрации, моделирование и диагностика отказов. Цель исследования — изучить особенности применения современного программного пакета, подходящего для моделирования и визуализации магнитного поля в асинхронном тяговом электродвигателе ДТА-1200А электровоза ЭП20.

Материалы и методы. В исследовании применен численный конечно-элементный метод расчета с помощью прикладного программного пакета, в котором на основе данных из технической литературы, результатов испытаний и справочных материалов была синтезирована двухмерная компьютерная модель тягового двигателя для расчета магнитного поля, и формализован расчет выходных параметров.

Результаты. В результате исследования был успешно апробирован один из существующих программных пакетов. Рассмотрены этапы геометрического построения сечения тягового электродвигателя, принципы задания и измерения физических явлений и возможности программы. Изложены особенности моделирования асинхронных электродвигателей. Исследованы возможности практического применения результатов моделирования магнитного поля для оценки магнитного потока, потокоцепления и потерь электроэнергии в тяговом двигателе. После синтеза компьютерной модели и проведения вычислений результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов соотнеслись с теоретическими расчетными и экспериментальными данными.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты будут полезны разработчикам электрических машин и исследователям, занимающимся компьютерным моделированием асинхронных электрических машин. На основе представленной и верифицированной расчетной компьютерной модели могут быть выполнены исследования, направленные на улучшение характеристик тяговых электродвигателей, совершенствование и оптимизацию их конструкции, а также создание цифровых двойников электрических машин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электровоз, асинхронный тяговый электродвигатель, ДТА-1200А, магнитное поле, моделирование, визуализация поля

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зуев А. С., Глущенко М. Д. О применении численных методов для анализа магнитного поля в тяговых электрических машинах переменного тока // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 2. С. 127–134. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-127-134>.

✉ aleksandr-zuev-1987@mail.ru (А. С. Зуев)

© Зуев А. С., Глущенко М. Д., 2023



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 621.313.333.2

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-127-134>

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



Application of numerical methods to the analysis of the magnetic field in AC traction machines

Alexander S. Zuev✉, Mikhail D. Glushchenko

Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This article examines the current approach to the design of rotating electrical machines. An overview is given of existing software packages for modelling electromagnetic and thermal processes using numerical finite element methods, designed to replace concentrated parameter analysis of electrical equivalent circuits. It describes how modern Russian researchers solve a wide range of problems, from studying traction performance, to analysing electromagnetic disturbances, noise and vibration, to modelling and diagnosing faults. The aim of the study is to investigate the features of a modern software package suitable for modelling and visualising the magnetic field in the induction traction motor DTA-1200A of the electric locomotive EP20.

Materials and methods. The study applies a numerical finite element calculation method using an application software package that synthesises a two-dimensional computer model of the traction motor to calculate the magnetic field and formalises the calculation of output parameters based on data from technical literature, test results and reference materials.

Results. One of the existing software packages is successfully piloted as a result of the study. The steps involved in the geometric construction of a traction motor cross section, the principles of setting and measuring physical phenomena, and the capabilities of the software are reviewed. The modelling characteristics of asynchronous electric motors are described. The practical application of magnetic field modelling results to estimate magnetic flux, flux linkage and power loss in a traction motor is studied. After synthesis of the computer model and calculations, the results of the finite element computer modelling are correlated with theoretical design and experimental test data.

Discussion and conclusion. The results of the study are expected to be useful to electrical machine designers and researchers involved in computer modelling of induction electric machines. On the basis of the computer model presented and verified, research could be carried out to improve the performance of traction motors, to improve and optimise their design and to create digital twins of electric machines.

KEYWORDS: electric locomotive, induction traction motor, DTA-1200A, magnetic field, simulation, field visualisation

FOR CITATION: Zuev A. S., Glushchenko M. D. Application of numerical methods to the analysis of the magnetic field in AC traction machines. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(2):127-134. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-127-134>.

✉ aleksandr-zuev-1987@mail.ru (A. S. Zuev)

© Zuev A. S., Glushchenko M. D., 2023

Введение. Решение задач совершенствования и оптимизации конструкции электрических машин на современном, уже довольно высоком уровне их развития, создания их цифровых двойников в системах управления и диагностики требует новых углубленных методов расчета и исследования. По мнению авторов, на смену исследованию сосредоточенных параметров эквивалентной электрической схемы замещения электрических машин сегодня должно прийти изучение распределенного магнитного поля, позволяющее более точно и корректно моделировать физические процессы. Возможности для этого предоставляет конечно-элементный метод расчета [1, 2], используемый во многих областях компьютерного проектирования.

Анализ научных публикаций свидетельствует о высоком интересе к моделированию электромагнитного поля у ученых различных отраслей, включающих промышленное оборудование [3–6], автомобилестроение [7, 8], при исследовании различных типов электродвигателей — постоянного тока [8, 9], синхронных с постоянными магнитами [7], вентильно-индукторных [10], шаговых [11]. Анализ магнитного поля необходим при исследовании тягово-энергетических характеристик автомобиля [7], электромагнитных помех, шума и вибрации [12, 13], а также при моделировании и диагностике отказов асинхронных электродвигателей [4, 5]. Моделирование электромагнитных процессов осуществимо во многих программных пакетах. Например, пакет ANSYS Maxwell использован в работах [12, 13, 10], ELCUT в [9, 8], ELMEC, COMSOL Multiphysics в [3, 7, 14], FEATool, FEMM в [15], JMAG Designer в [11], кроме этого применяются пакет ANSYS Motor-CAD или продукты компании Siemens (Simcenter MAGNET, Simcenter Motorsolve). Некоторые исследователи используют программы собственной разработки [9]. Тем не менее задачи настоящего исследования построения конечно-элементных моделей геометрии и физических процессов асинхронных тяговых электродвигателей при исследовании энергосберегающих характеристик являются новыми для асинхронных двигателей, применяемых на локомотивах и электропоездах. В отличие от упомянутых публикаций в статье будут также рассмотрены этапы построения модели, принципы задания и измерения физических явлений.

Постановка задач исследования. В настоящем исследовании поставлены следующие задачи:

- 1) оценить применимость современного программного пакета для моделирования токораспределения и магнитного поля асинхронных тяговых электрических машин;
- 2) рассчитать методом конечных элементов магнитное поле тягового двигателя и сравнить полученное

потокосцепление обмотки статора с расчетными данными для оценки точности расчета программного пакета;

- 3) реализовать расчет потерь энергии в асинхронном тяговом электродвигателе электровоза и сравнить полученные результаты с экспериментальными данными [16] для оценки точности расчета программного пакета.

В настоящем исследовании задача расчета методом конечных элементов будет решаться с точки зрения скольжения ротора относительно магнитного поля статора. Смоделированное скольжение после запуска расчета будет вызывать индукцию токов в медных и стальных элементах ротора. Применение инструмента «преобразование Лоренца» для учета скольжения ротора позволяет использовать стационарный решатель. При стационарном подходе будет возможно рассмотреть установившиеся режимы работы от источника синусоидального питания. Расчет потерь в стали статора будет реализован в модели по данному распределению магнитного поля.

Математическое моделирование. Для решения поставленных задач применим программный пакет COMSOL Multiphysics, широко используемый Национальным исследовательским университетом «МЭИ». Рабочее окно программы представлено на рис. 1.

Запуск расчета сложной трехмерной модели электродвигателя не увенчался успехом, и задача решалась в двухмерной постановке.

Основные размеры расчетной модели соответствуют тяговому электродвигателю ДТА-1200А отечественного пассажирского электровоза ЭП20 [16]. Это трехфазная асинхронная машина с двухслойной распределенной обмоткой статора. Двигатель имеет короткозамкнутую клетку на роторе и шихтованную магнитную систему.

При моделировании использованы следующие исходные данные для продолжительного режима работы (см. таблицу).

Разработан следующий алгоритм создания модели асинхронного тягового электродвигателя:

- 1) ввод исходных данных;
- 2) геометрическое построение сечения тягового электродвигателя;
- 3) моделирование скольжения ротора;
- 4) моделирование измерения электромагнитного момента;
- 5) моделирование физических свойств и характеристик материалов;
- 6) моделирование обмотки статора;
- 7) расчет электромагнитных процессов методом конечных элементов;
- 8) моделирование механических потерь;
- 9) расчет вращающего момента на валу;

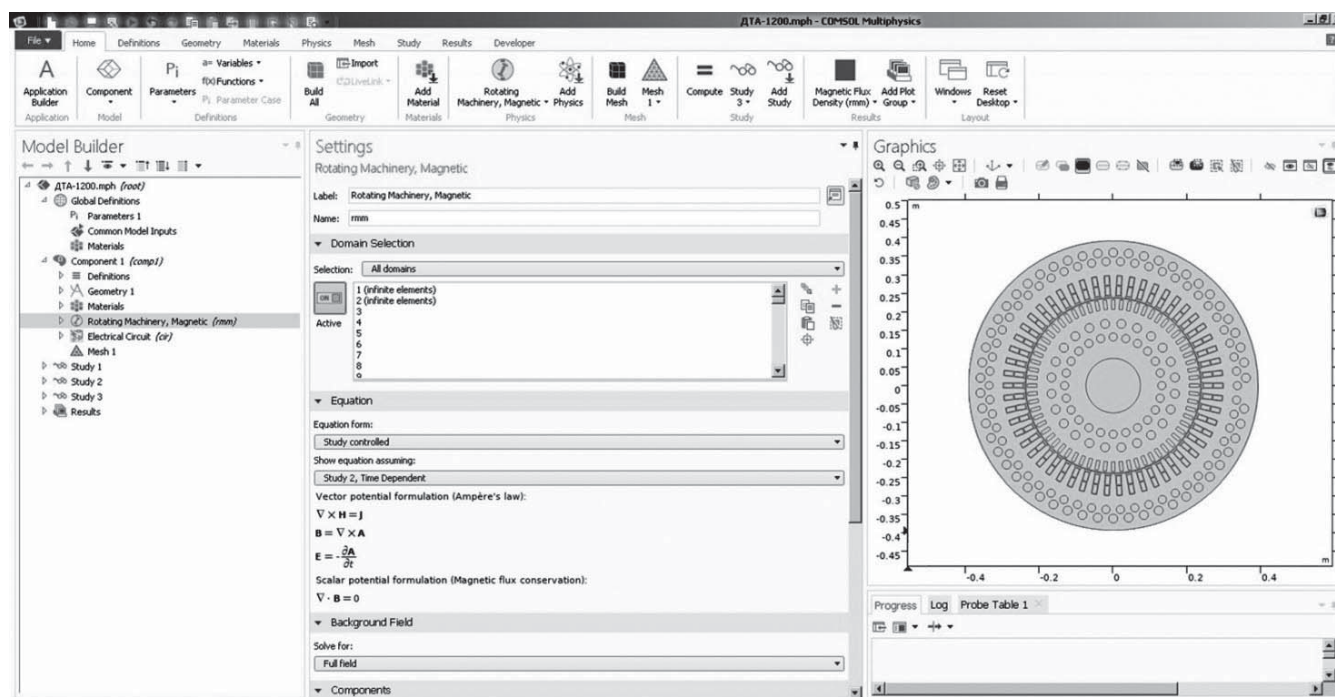


Рис. 1. Рабочее окно COMSOL Multiphysics

Fig. 1. COMSOL Multiphysics Desktop

Таблица

Исходные данные для моделирования тягового электродвигателя

Table

Input data for modelling a traction motor

Показатель, размерность	Значение
Число эффективных проводников в секции обмотки статора, ед.	3
Линейное напряжение, В	2183
Фазный ток, А	360
Число зубцов статора, ед.	54
Число зубцов ротора, ед.	64
Число фаз статора, ед.	3
Абсолютная частота скольжения, Гц	0,69
Частота тока статора, Гц	89
Частота вращения, об/мин	1766
Вращающий момент, Н·м	5948
Число пар полюсов, ед.	3
Диаметр двигателя, мм	786
Диаметр ротора, мм	474
Внутренний диаметр статора, мм	478
Воздушный зазор, мм	2
Длина пакета статора, мм	400
Толщина листа электротехнической стали, мм	0,5

- 10) моделирование расчета потерь электроэнергии;
- 11) расчет потерь электроэнергии;
- 12) работа с полученной моделью.

На первом этапе происходит обозначение используемых переменных и присвоение им значений исходных данных.

На втором этапе проводится геометрическое построение сечения тягового электродвигателя. Размеры и количество конструктивных элементов можно задавать в виде переменных, что помогает легко изменять или переконфигурировать конструкцию. Создание геометрии завершается объединением элементов.

В программном пакете имеется возможность задания скорости вращения. На третьем этапе при моделировании скольжения с помощью этой функции была задана угловая частота первой гармоники тока ротора:

$$\omega_2 = 2\pi \left(f_1 - \frac{np}{60} \right), \quad (1)$$

где f_1 — частота тока статора, Гц; n — частота вращения ротора, об/мин; p — число пар полюсов, ед.

Так как имеется возможность измерения электромагнитного момента, то на четвертом этапе устанавливается его область измерения $M_{\text{изм}}$.

На пятом этапе необходимо выбрать и распределить материалы, задать их характеристики, а также

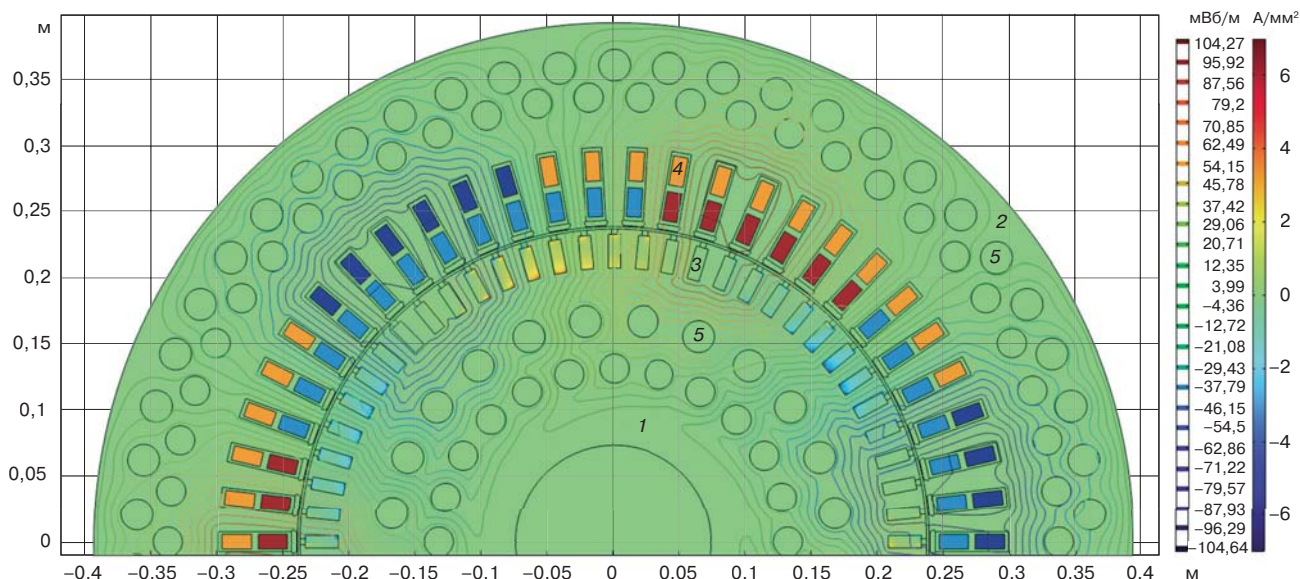


Рис. 2. Результаты расчета модели тягового электродвигателя ДТА-1200А, распределение токов и эквипотенциальных линий векторного магнитного потенциала магнитного поля в поперечном сечении: 1 — ротор; 2 — статор; 3 — пазы ротора; 4 — пазы статора; 5 — продольные вентиляционные каналы

Fig. 2. Calculation results of the DTA-1200A traction motor model, current distribution and equipotential lines of the magnetic field vector potential in the cross section: 1 — rotor; 2 — stator; 3 — rotor slots; 4 — stator slots; 5 — longitudinal ventilation ducts

их линейные и нелинейные магнитные свойства по элементам конструкции. Электропроводность корректируется с учетом длины лобовых частей. Расчет проводился при задании нелинейной кривой намагничивания электротехнической стали марки 2212. Ее характеристики намагничивания и потерь приведены в справочных изданиях [17, 18]. Кривая была задана в табличном виде, но она также может быть задана аналитически с помощью формулы, аппроксимирующей кривую прямой взаимозависимости, и формулы, аппроксимирующей кривую обратной взаимозависимости магнитной индукции и напряженности магнитного поля. Эквивалентная электропроводность шихтованного пакета ротора была подобрана исходя из приближения получаемого значения вращающего момента к его экспериментальному значению по данным испытаний ВЭЛНИИ [16]. Полученная зависимость эквивалентной электропроводности шихтованного пакета ротора $\sigma_{\text{экр}}$, мСм/м, от частоты тока ротора f_2 , Гц, интерполирована следующим выражением:

$$\sigma_{\text{экр}} = 4e^{-6,2f_2^2}. \quad (2)$$

На шестом этапе указывается расположение обмоток статора, в обмотках статора задаются значения токов с учетом их фаз. Нет необходимости вручную задавать значение тока в короткозамкнутой клетке ротора. Токораспределение в стержнях клетки ротора

рассчитывается автоматически программным пакетом при смоделированном скольжении ротора и заданной удельной электропроводности медной короткозамкнутой клетки ротора, скорректированной с учетом сопротивления участков короткозамыкающих колец.

На внешней окружности статора модели установлено граничное условие

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (3)$$

где \mathbf{n} — единичный вектор нормали к границе; \mathbf{B} — вектор магнитной индукции.

На седьмом этапе производится запуск и проведение расчета электромагнитных процессов методом конечных элементов.

В результате моделирования получена картина магнитного поля в тяговом асинхронном электродвигателе ДТА-1200А электроваза ЭП20 (рис. 2). Видно искажение магнитного поля в тангенциальном направлении, вызванное скольжением. При этом большинство эквипотенциальных линий векторного магнитного потенциала электромагнитного поля пересекает воздушный зазор под углом в том же направлении, что и поле в стали сердечника ротора, и вызывает вращающий момент. Границы магнитного потока каждого полюса характеризуются наибольшими по модулю значениями векторного магнитного потенциала (красные и синие линии).

На практике полученная картина магнитного поля может быть использована для расчета магнитного потока двигателя, а также потокосцепления распределенной по пазам статорной обмотки при известном числе ее витков. По результатам анализа магнитного поля потокосцепление фазы обмотки статора составило 3,53 Вб, что очень близко к теоретически рассчитанному значению — 3,48 Вб (отклонение 1,4 %).

На восьмом этапе для моделирования механических потерь рассчитывается КПД комплекта подшипников $\eta_{\text{кподш}}$ на основе значений КПД шарикового и роликового подшипников.

На девятом этапе проводится расчет вращающего момента на валу:

$$M = m M_{\text{изм}} \eta_{\text{кподш}}, \quad (4)$$

где m — число фаз обмотки статора.

На десятом этапе моделируется расчет потерь электроэнергии в тяговом двигателе ΔP . Полученные в результате моделирования токораспределение и магнитное поле позволяют рассчитать потери в тяговом двигателе с помощью опций программного пакета, интегрирующих квадрат плотности тока или заданную функцию магнитной индукции с учетом характеристик материалов по необходимым геометрическим областям. Необходимо учесть потери в шариковом и роликовом подшипниках:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{c1}} + \Delta P_{\text{c2}} + \Delta P_{\text{м1}} + \Delta P_{\text{м2}} + \Delta P_{\text{мех}}, \quad (5)$$

где ΔP_{c1} — потери в стали статора; ΔP_{c2} — потери в стали ротора; $\Delta P_{\text{м1}}$ — потери в меди статора; $\Delta P_{\text{м2}}$ — потери в меди ротора; $\Delta P_{\text{мех}}$ — потери в подшипниках.

На одиннадцатом этапе запускается и выполняется расчет потерь электроэнергии. В итоге возможна оценка КПД двигателя.

На двенадцатом этапе синтезированная модель используется в работах по оптимизации конструктивных размеров элементов, подбору материалов, построению характеристик, разработке энергосберегающих алгоритмов управления, схем замещения для цифровых двойников и в других возможных сферах применения.

Верификация модели. В связи с отсутствием в распоряжении авторов данных прямых измерений магнитного поля внутри асинхронных тяговых двигателей и сложностью их проведения верификация модели магнитного поля осуществлялась косвенным методом — на основании величины, на которую влияет магнитное поле тягового двигателя. Для оценки достоверности результатов математического моделирования допустимо сравнить полученную в процессе моделирования величину КПД электрической машины

в рассматриваемом режиме работы с экспериментальным значением. Стоит отметить, что экспериментальное значение КПД не использовалось ранее, в отличие от экспериментального значения вращающего момента, при оценке эквивалентной электропроводности шихтованного пакета ротора и может быть использовано для верификации модели, а полученное при моделировании значение КПД не является «подогнанным» под данные эксперимента. По данным ВЭЛНИИ [16], тяговый двигатель ДТА-1200А в процессе испытаний от синусоидального источника питания в продолжительном режиме имеет КПД 0,96300. Полученное в результате моделирования значение КПД 0,96319 свидетельствует об отличии потерь на 5 %, что говорит об адекватности разработанной модели, достаточной точности моделирования с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics и применимости его возможностей для проектирования тяговых электрических машин.

Обсуждение. Исследование показало, что с помощью метода конечных элементов возможно построение адекватной модели магнитного поля асинхронных тяговых электрических машин и использование ее для расчета потерь электроэнергии в тяговой электрической машине. В случае отсутствия экспериментальных данных с использованием предлагаемого подхода появляется возможность качественного представления электромагнитных процессов и оценки потерь, а количественная оценка требует проведения отдельных исследований и использования результатов испытаний.

Современный программный пакет COMSOL Multiphysics вполне применим для моделирования токораспределения и магнитного поля асинхронных тяговых электрических машин. С его помощью были исследованы особенности моделирования асинхронного тягового электродвигателя.

Эквивалентная электропроводность модели шихтованного пакета ротора зависит от частоты тока ротора. Визуализация магнитного поля показала его направленное искажение в области ротора, что дает возможность применить эту информацию на практике при разработке новых конструкций электрических машин.

По результатам анализа магнитного поля величина потокосцепления фазы обмотки статора оказалась очень близкой к теоретическому расчетному значению, что подтверждает адекватность разработанной модели и приемлемую точность расчета при использовании программного пакета. Реализован расчет потерь энергии в тяговом двигателе. Соответствие результатов моделирования экспериментальным данным также подтверждает адекватность разработанной модели и достаточную точность моделирования с помощью программного пакета.

Важной областью применения расчетов с использованием метода конечных элементов является проектирование нестандартных инновационных электрических машин со сложной или асимметричной геометрией магнитной системы, которые не описываются типовой теоретической расчетной методикой.

Заключение. В ходе исследования апробирован программный пакет, подходящий для компьютерного моделирования магнитного поля асинхронных тяговых электрических машин. Рассмотрены особенности и разработаны практически значимые рекомендации по построению компьютерной модели двигателя, исследованы возможности применения программы для расчета потерь электроэнергии в тяговом двигателе. Освоение изложенного метода позволит исследователям и разработчикам электрических машин совершенствовать свои навыки компьютерного моделирования асинхронных электрических машин, найти и предложить верные технические решения, направленные на улучшение характеристик тяговых электродвигателей, совершенствование и оптимизацию их конструкции.

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 ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

- Гнутов С. К., Раецкая О. В. Подход к численному моделированию физических полей в стартерных электродвигателях // Вопросы электротехнологии. 2019. №2 (23). С. 46–50 [Gnutov S. K., Raetskaya O. V. An approach to numerical modeling of physical fields in starter electric motors. *Journal of Electrotechnics*. 2019;(2):46-50. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/zkwkyr>.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019662303 Российская Федерация. Построение сетки граничных элементов для метода граничных интегральных уравнений (pFields: геометрия): №2019661086: заявл. 10.09.2019; опубл. 20.09.2019 / Денисов П. А. 1 с. [Denisov P. A. *Certificate of State Registration of Computer Program No. 2019662303 Russian Federation. Constructing a Boundary Element Mesh for the Boundary Integral Equation Method (pFields: Geometry): No. 2019661086: appl. 10.09.2019: publ. 20.09.2019*. 1 p. (In Russ.)].
- Автайкин И. Н., Квон А. М. Сравнительный анализ эффективности использования активных материалов радиальных и аксиальных асинхронных машин электропривода технологических установок // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2019. №1 (367). С. 70–72 [Avtaykin I. N., Kvon A. M. Comparative analysis of the efficiency of the use of active materials of radial and axial asynchronous machines of the electric drive of technological installations. *Izvestiya vuzov. Food Technology*. 2019;(1):70-72 (In Russ.)]. <http://doi.org/10.26297/0579-3009.2019.1.17>.
- Бельский И. О. Численное моделирование параметров магнитного поля при обрыве стержней асинхронных электродвигателей машиностроительного производства // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. Т. 57, № 1. С. 60–70 [Belskiy I. O. Numerical modeling of magnetic field parameters of the asynchronous electric motors with broken bars in machine-building production. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2018;57(1):60-70 (In Russ.)]. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.1\(57\).60-70](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2018.1(57).60-70).
- Бельский И. О., Лукьянов А. В. Математическое, численное и натурное моделирование параметров магнитного поля при несимметрии тока в фазах асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С. 44–53 [Belskiy I. O., Lukyanov A. V. Mathematical, numerical and full-scale modeling of magnetic field parameters in the asynchronous electric motors with nonsymmetrical current phases. *Systems. Methods. Technologies*. 2018;(2):44-53 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-44-53>.
- Повышение удельных характеристик асинхронных двигателей / К. Е. Кононенко [и др.] // Электричество. 2020. №9. С. 34–39 [Kononenko K. E., Kononenko A. V., Krutskikh S. V., Manukovskiy S. M. Improving the Specific Characteristics of Induction Motors. *Electrichestvo*. 2020;(9):34-39 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-9-34-39>.
- Разработка и исследование тягового синхронного электродвигателя с инкорпорированными в ротор магнитами для электромотоцикла / Ю. Б. Казаков [и др.] // Вопросы электротехнологии. 2022. № 2 (35). С. 89–97 [Kazakov Yu. B., Stulov A. V., Nikiforov M. I., Kiselev M. A. Development and research of a traction synchronous electric motor with magnets incorporated in the rotor for an electric vehicle. *Journal of Electrotechnics*. 2022;(2):89-97. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/vrbtem>.
- Симаков А. В., Огневский А. С. Моделирование режимов работы тягового электродвигателя методом конечных элементов // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы науч. конф., посвященной Дню российской науки, Омск, 8 февраля 2019 г. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск: ОмГУПС, 2019. С. 196–201 [Simakov A. V., Ognevskiy A. S. The traction motor operating modes modelling with the finite element method. In: *Innovative projects and technologies in education, industry and transport: Proceedings of scientific conference devoted to the Day of Russian Science, Omsk, 8 February 2019*. Omsk: OmGUPS; 2019. p. 196–201. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/uzoskz>.
- Глушенко М. Д., Горюнов И. О. Особенности расчета магнитного поля электрических машин // Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. №6. С. 5–8 [Glushchenko M. D., Goryunov I. O. Characteristics of the calculation of electric machine's magnetic field. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*. 2018;(6):5-8 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/yuiwqh>.
- Применение специализированного программного обеспечения для расчета распределения магнитного поля в витках обмотки статора вентильно-индукторных электродвигателей / В. В. Сироткин [и др.] // Инновационные транспортные системы и технологии. 2022. Т. 8, № 4. С. 58–73 [Sirotkin V. V., Pigalev D. A., Bol'shikh I. V., Chernyayev S. S. Application of specialized software for calculation of magnetic field in the turns of switched reluctance motors stator windings. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):58-73. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17816/transsyst20228458-73>.
- Расчет параметров математической модели электрического шагового двигателя гибридного типа на основе анализа картины магнитостатического поля / С. В. Волков [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 8. С. 482–489

[Volkov S. V., Goryachev O. V., Efromeev A. G., Stepochkin A. O. Calculation of the Parameters of a Mathematical Model of an Electric Hybrid Stepper Motor Based on the Analysis of the Magneto Static Field Pattern. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2019;20(8):482-489. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.17587/mau.20.482-489>.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669927 Российская Федерация. Программа для исследования магнитного шума и вибрации асинхронного электродвигателя: № 2022669399: заявл. 21.10.2022: опубл. 26.10.2022 / Ермолаев А. И., Гордеев Б. А., Охулков С. Н., Титов Д. Ю. 1 с. [Ermolaev A. I., Gordeev B. A., Okhulkov S. N., Titov D. Yu. *Certificate of State Registration of Computer Program No. 2022669927 Russian Federation. Programme for the investigation of magnetic noise and vibration of an asynchronous drive: No. 2022669399: appl. 21.10.2022: publ. 26.10.2022. 1 p.* (In Russ.)].

13. Исследование магнитной вибрации асинхронного электродвигателя посредством мкэ-моделирования / А. И. Ермолаев [и др.] // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 3 (15). С. 37–56 [Ermolaev A. I., Erofeev V. I., Plekhov A. S., Titov D. Yu. Study of magnetic vibration occurring in induction motor using FEM simulation. *Smart Electrical Engineering*. 2021;(3):37-56 (In Russ.)]. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2021_3_37.

14. Сравнение методов расчета электромагнитных процессов на примере цилиндрического линейного вентильного двигателя / Д. А. Чирков [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 4 (28). С. 76–91 [Chirkov D. A., Klyuchnikov A. T., Korotaev A. D., Timashev E. O. Comparison of electromagnetic processes calculation methods on the example of a cylindrical linear electronic motor. *PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems*. 2018;(4):76-91. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/vqadwu>.

15. Авдеев А. И. Автоматизация расчета магнитного поля асинхронного электродвигателя в программе FEMM // Информационные технологии, энергетика и экономика (электроэнергетика, электротехника и теплоэнергетика, математическое моделирование и информационные технологии в производстве): сб. тр. XVIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Смоленск, 22–23 апреля 2021 г.: в 3 т. Смоленск: Универсум, 2021. Т. 1. С. 121–126 [Avdeev A. I. Automation of calculation of magnetic field of asynchronous electric drive in the programme FEMM. In: *Information technologies, power engineering and economy (power engineering, electrical engineering and thermal power engineering, mathematical modelling and information technologies in production): Proceedings of XVIII International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates, Smolensk, 22–23 April 2021: in 3 vol.* Smolensk: Universum; 2021. Vol. 1. p. 121–126 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/jxydoe>.

16. Захаров В. И. Параметры, характеристики и конструктивные особенности асинхронного тягового двигателя ДТА-1200А электровоза ЭП20 // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2009. № 2. С. 55–66 [Zakharov V. I. Parameters, characteristics and design features of the DTA-1200A asynchronous traction engine of the EP20 electric locomotive. *Journal of the All-Russian research and development institute of electric locomotives*. 2009;(2):55-66 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/kxotud>.

17. Молотилов Б. В., Миронов Л. В., Петренко А. Г. Холоднокатаные электротехнические стали: справ. изд. / под ред. Б. В. Молотилова. М.: Металлургия, 1989. 168 с. [Molotilov B. V., Mironov L. V., Petrenko A. G. *Cold-rolled Electrotechnical Steels: Reference Manual*. Moscow: Metallurgiya; 1989. 168 p. (In Russ.)].

18. Новиков Н. Н., Родионов И. Е., Шутько В. Ф. Синхронные двигатели: справ. для студентов электротехнических и электро-энергетических специальностей. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. 36 с. [Novikov N. N., Rodionov I. E., Shut'ko V. F. *Synchronous engines: Handbook for students of electrical engineering and power engineering*. Ekaterinburg: UGTU-UPI; 2005. 36 p. (In Russ.)].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Сергеевич ЗУЕВ,

аспирант, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 836869, <https://orcid.org/0000-0001-8873-9800>

Михаил Дмитриевич ГЛУЩЕНКО,

д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра электропоездов и локомотивов, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 298452, <https://orcid.org/0000-0002-8847-0204>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander S. ZUEV,

Postgraduate, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 836869, <https://orcid.org/0000-0001-8873-9800>

Mikhail D. GLUSHCHENKO,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of Electric trains and locomotives, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 298452, <https://orcid.org/0000-0002-8847-0204>

ВКЛАД АВТОРОВ

Александр Сергеевич ЗУЕВ. Проведение исследования, поиск информации, расчеты, моделирование, подготовка публикации (75 %).

Михаил Дмитриевич ГЛУЩЕНКО. Постановка цели и задач исследования, консультирование и научное руководство (25 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexander S. ZUEV. Carrying out research, finding information, calculations, modelling, preparing a publication (75 %).

Mikhail D. GLUSHCHENKO. Formulating research objectives, advising and providing scientific guidance (25 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 02.02.2023, рецензия от первого рецензента получена 13.03.2023, рецензия от второго рецензента получена 22.03.2023, принята к публикации 22.05.2023.

The article was submitted 02.02.2023, first review received 13.03.2023, second review received 22.03.2023, accepted for publication 22.05.2023.

Оригинальная статья

УДК 629.423.25:62-214.6

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-135-145>EDN: <https://elibrary.ru/lhcfuk>

Оценка ударной прочности корпуса тягового редуктора высокоскоростного электропоезда с учетом скорости деформации материала

Е. К. Рыбников, С. В. Володин, Т. О. Вахромеева✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен актуальный для высокоскоростного железнодорожного сообщения вопрос решения широкого спектра задач по сохранению прочности элементов экипажной части поезда под ударным воздействием частиц балласта, например кусков льда в холодный период года. Твердые предметы поднимаются с поверхности пути в результате аэродинамического взаимодействия с турбулентным воздушным потоком от поезда, следующего с высокой скоростью. Возникают механические повреждения ходовых частей и узлов в их подвагонном пространстве, которые могут оказаться значительными и создать угрозу безопасности движения. Цель данного исследования — оценка вероятности существенных разрушений корпуса редуктора от сторонних предметов, находящихся на пути, и разработка способа защиты.

Материалы и методы. Возможность разрушения корпуса рассчитывается методом численного моделирования в среде MSC.Nastran_SOL700, позволяющей выполнять анализ динамических событий короткой продолжительности с серьезными геометрическими и материальными нелинейностями. Описана методика оценки прочности конструкции корпуса редуктора при динамическом воздействии на него стороннего объекта.

Результаты. Выполнена отработка расчетной методики на упрощенной модели корпуса редуктора; методика применена на моделях, близких к реальному корпусу редуктора. Для этого были рассмотрены две модели задания свойств материала: обычная (General) и модель Купера — Саймондса (Cowper — Simonds), учитывающая зависимость динамических деформаций материала от скорости деформации. Проведена оценка влияния сторонних предметов с разной массой и относительной скоростью на вероятность возникновения повреждения стенок редуктора при разных значениях их толщины.

Обсуждение и заключение. Расчеты подтверждают вероятность разрушения корпусов тяговых редукторов высокоскоростных и скоростных электропоездов при динамическом воздействии на корпус сторонних предметов. Проанализированы конструктивные решения для защиты корпусов тяговых редукторов высокоскоростных поездов от воздействий сторонних предметов и выбран наиболее рациональный вариант. Статья написана на основе доклада авторов, представленного на Московском форуме «XXII Российской конференции MSC Software (HxGN Live Design & Engineering Russia 2021)», прошедшего 16–19 ноября 2021 г.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высокоскоростной электропоезд, тяговый редуктор, динамическое воздействие, численное моделирование, разрушение, модель Cowper — Simonds

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рыбников Е. К., Володин С. В., Вахромеева Т. О. Оценка ударной прочности корпуса тягового редуктора высокоскоростного электропоезда с учетом скорости деформации материала // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 2. С. 135–145. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-135-145>.

✉ vakhromeeva.tatiana@yandex.ru (Т. О. Вахромеева)

© Рыбников Е. К., Володин С. В., Вахромеева Т. О., 2023

Original article

UDK 629.423.25:62-214.6

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-135-145>

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



Evaluation of the impact strength of the traction gearbox housing for the traction of a high-speed electric train in terms of deformation rate of the material

Evgeniy K. Rybnikov, Sergey V. Volodin, Tatiana O. Vakhromeeva✉

Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Solving a wide range of problems to maintain the strength of train undercarriage under the impact of ballast particles, such as ice chunks, during the cold season is considered a topical issue for high-speed railways. Solid objects are lifted off the track surface as a result of aerodynamic interaction with the turbulent airflow of a high-speed train. This causes mechanical damage to the bogie and its components, which could be significant and endanger road safety. The aim of this study is to assess the probability of significant damage to the traction gearbox housing from foreign objects on the way and to develop a method of protection.

Materials and methods. Housing failure potential is calculated using numerical simulation in MSC.Nastran SOL700 environment, allowing analysis of short duration dynamic events with severe geometry and material non-linearity. The method of assessment of the structural strength of a traction gearbox housing under the dynamic action of a foreign object is described.

Results. The calculation methodology is tested on a simplified traction gearbox housing model. The methodology is then applied to models that are close to the real traction gearbox housing. The General model and the Cowper—Simonds model, which incorporates the strain rate dependence of the dynamic deformation of the material, are considered for specifying the material properties. The effect of foreign objects of different masses and relative speed on the probability of damage to the traction gearbox walls at different thicknesses is assessed.

Discussion and conclusion. Calculations confirm the probability of destruction of housings of traction gearboxes of high-speed and high-speed electric trains under the dynamic impact on the body of third-party objects. Structural solutions for protecting housings of traction gearboxes of high-speed trains from the effects of foreign objects are analysed and the most rational option is chosen. This article was written based on the authors' paper presented at the XXII Russian MSC Software Conference (HxGN Live Design & Engineering Russia 2021), November 16–19, 2021.

KEYWORDS: high-speed electric train, traction gearbox, dynamic action, numerical simulation, destruction, Cowper — Simonds model

FOR CITATION: Rybnikov E. K., Volodin S. V., Vakhromeeva T. O. Evaluation of the impact strength of the traction gearbox housing for the traction of a high-speed electric train in terms of deformation rate of the material. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(2):135-145. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-135-145>.

✉ vakhromeeva.tatiana@yandex.ru (T. O. Vakhromeeva)

© Rybnikov E. K., Volodin S. V., Vakhromeeva T. O., 2023

Введение. На российских железных дорогах в настоящее время эксплуатируются скоростные электропоезда серий ЭС1П, ЭС2Г, ЭС2ГП и высокоскоростные электропоезда ЭВС1/ЭВС2 с конструкционной скоростью 250 км/ч. Проектируется электропоезд для высокоскоростной линии Москва – Санкт-Петербург на 380–400 км/ч.

Эксплуатация высокоскоростного электропоезда «Сапсан» показала, что при большой скорости движения возникают воздушные потоки, которые способны поднимать камни щебеночного покрытия железнодорожного пути, и эти камни повреждают окраску частей тягового привода, находящихся под вагоном и на оси колесной пары [1–4]. Также имеются случаи разрушения нижней части рамы кузова вагона и окраски корпуса тягового редуктора на оси колесной пары (рис. 1).

Однако в такой случайной по своей структуре системе, каким является железнодорожный путь и изменяющаяся окружающая среда, по закону редких событий могут возникнуть условия, при которых происходят значительные разрушения неопределенных частей электропоезда, и эти разрушения могут угрожать безопасности движения на железных дорогах.

На рис. 2 показан результат совпадения неблагоприятных условий (по закону Э.А. Мэрфи) при движении электропоезда зимой, когда произошло значительное разрушение корпуса редуктора с образованием отверстия в картере (выделено на рисунке). При этом произошло вытекание смазки, разрушение подшипников и дальнейшее разрушение зубчатой муфты.

Такое разрушение могло привести к тяжелым последствиям. Точно определить предмет воздействия на конструкцию не представлялось возможным, особенно если учесть, что от момента воздействия до остановки поезд проходит порядка 2600 м. Можно предположить, что воздействие на корпус редуктора оказал кусок льда значительной массы, движущийся с большой скоростью, или металлический предмет от разрушения элементов рельсового пути или ходовых частей тележки, например тормозных дисков.

Разработка эффективной защиты от подобных разрушений предполагает понимание механики разрушения конструкционных материалов корпуса редуктора, условий его эксплуатации. Для решения данной задачи были смоделированы процессы динамического воздействия твердых предметов на корпус редуктора с помощью расчетного метода.

Разработка методики оценки прочности корпуса редуктора при динамическом воздействии. В технических требованиях на разработку нового электропоезда [5] предусмотрена расчетная проверка прочности



Рис. 1. Разрушения окраски корпуса редуктора из-за ударного воздействия щебня

Fig. 1. Damage to the paintwork on the traction gearbox housing caused by the impact of crushed stone



Рис. 2. Разрушение картера корпуса редуктора с образованием отверстия (выделено кружком) и последующим разрушением узлов тяговой передачи

Fig. 2. Destruction of the traction gearbox housing crankcase with the formation of a hole (circled) and subsequent destruction of the traction components

неопределенных ходовых частей (колесные пары, тяговые редукторы, тормозное оборудование). При этом прочность должна оцениваться при динамическом воздействии куска льда массой 5 кг. Это условие и было принято при моделировании динамического

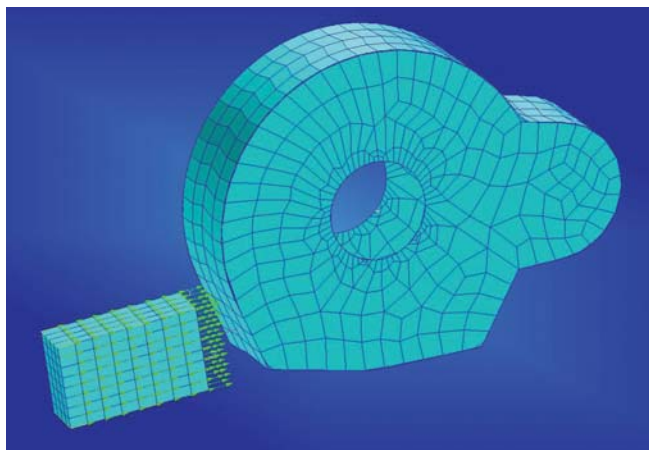


Рис. 3. Конечно-элементные модели куска льда и корпуса редуктора

Fig. 3. Finite element models of the ice chunk and the traction gearbox housing

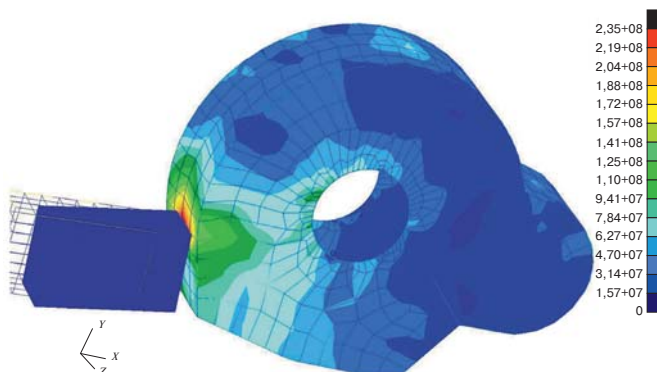


Рис. 4. Эффективные напряжения в месте удара куска льда при скорости 40 км/ч и толщине стенок редуктора 5 мм

Fig. 4. Effective stresses at the point of impact of a chunk of ice at 40 km/h and a traction gearbox wall thickness of 5 mm

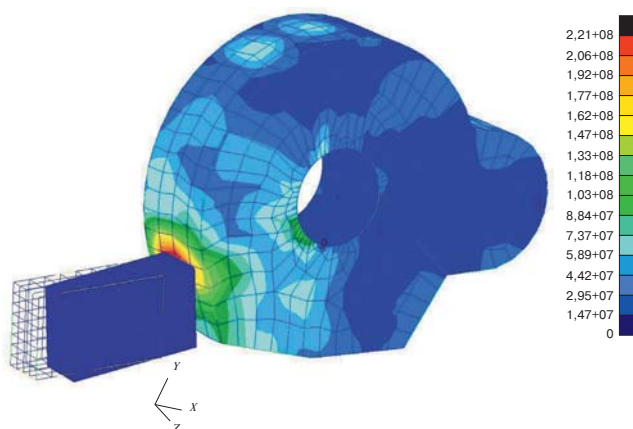


Рис. 5. Эффективные напряжения в месте удара куска льда при скорости 360 км/ч и толщине стенок редуктора 5 мм

Fig. 5. Effective stresses at the point of impact of a chunk of ice at 360 km/h and a traction gearbox wall thickness of 5 mm

воздействия на корпус редуктора для оценки его прочности и факта возникновения подобного разрушения.

Для моделирования использовались программные продукты фирмы MSC.Software Patran/Dytran.

Методика моделирования. Моделирование состоит из двух этапов. На первом этапе происходит разработка моделей и предварительная оценка методики моделирования. На втором этапе назначаются расчетные режимы моделирования по скорости, модели корпуса редуктора и предмета воздействия. Назначаются характеристики материалов моделей, размеры толщины стенок корпуса редуктора.

В качестве куска льда была принята форма прямоугольного параллелепипеда с объемом $0,0054 \text{ м}^3$, который был определен по массе 5 кг и средней плотности льда 920 кг/м^3 . Размеры параллелепипеда — $0,3 \times 0,18 \times 0,1 \text{ м}$. Модель куска льда принята абсолютно жесткой, ее свойства задаются по модели материала Rigid (MATRIG) в Dytran [6, 7].

Для настройки алгоритма задачи в качестве модели корпуса редуктора принята геометрическая модель с внешними габаритами реального редуктора, выполненная полностью тонкостенной [8]. Конечно-элементная модель состоит из элементов Quad 4 со свойствами оболочки Shell. По такой модели можно быстро ответить на вопрос о возможности разрушения стенки нижней части корпуса редуктора при воздействии куска льда.

На рис. 3 представлены модели куска льда и корпуса редуктора. На модели льда показаны векторы начальных скоростей.

Для корпуса редуктора принят эластопластичный (DMATER) материал из библиотеки Dytran со следующими параметрами: модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$; коэффициент Пуассона — 0,3; предел текучести (Yield Stress) — $4,0 \cdot 10^8 \text{ Па}$; максимальная пластическая деформация (Max. Plastic Strain) — 0,5.

Корпуса реальных тяговых редукторов изготавливают с применением ряда технологий, которые зависят от требуемых по конструкции толщин стенок. Для тяговых редукторов их толщина меняется от 5 до 15 мм.

При моделировании был выполнен ряд предварительных расчетов с целью изучения влияния на показатели прочности таких параметров, как толщина стенок корпуса редуктора и относительная скорость движения модели куска льда. В результате расчетов было установлено, что при относительной скорости движения куска льда 40 км/ч и толщине стенок редуктора 5 мм не происходит сквозного разрушения стенки корпуса при эффективной величине напряжений 235 МПа (рис. 4). При толщине стенок редуктора 5 мм и относительной скорости куска льда 360 км/ч происходит сквозное разрушение стенки при эффективной величине напряжения 221 МПа (рис. 5 и 6).

При увеличении толщины стенок до 10 мм и относительной скорости перемещения куска льда 200 км/ч происходит деформация стенки в области удара, и кусок льда отбрасывается в противоположную сторону. Из-за значительной упругой деформации конструкции корпуса накапливается потенциальная энергия, которая превращается в кинетическую энергию движения куска льда.

На рис. 7 и 8 показаны перемещения куска льда в сторону от редуктора при деформации корпуса 37,9 мм. По верхнему листу корпуса распространяется бегущая волна, в результате энергия удара дополнительно расходуется на деформацию корпуса.

То же происходит и при увеличении толщины стенок корпуса редуктора до 15 мм и скорости движения куска льда 200 км/ч. На рис. 9 показано напряженно-деформированное состояние стенки в месте воздействия куска льда. Кусок льда отбрасывается в сторону, противоположную воздействию, при этом пластическая деформация составляет 37,9 мм, эффективные напряжения — 271 МПа. По верхнему листу также распространяется бегущая волна напряжений.

Выполненные расчеты на первом этапе исследования показали, что с помощью принятой упрощенной модели корпуса редуктора не удастся получить адекватного ответа о характере разрушений, которые произошли при эксплуатации скоростного электропоезда. При низкой скорости вся энергия удара расходуется на местное разрушение стенки, при увеличении скорости куска льда примерно в четыре раза кинетическая энергия удара расходуется на деформацию гибкого корпуса редуктора, место удара на стенке редуктора деформируется, но разрушения не происходит.

Для получения адекватных результатов необходимо выполнить расчеты с моделью, близкой к реальному корпусу редуктора.

Моделирование процесса разрушения конструкций корпусов тяговых редукторов. На втором этапе исследования были выполнены расчеты на модели, близкой к реальному корпусу редуктора [9, 10]. При этом для описания поведения материала рассматривались две модели [11, 12]: обычная (General) [13, 14] и модель Купера—Саймондса (Cowper—Simonds) [15]. Последняя позволяет учитывать зависимость динамических деформаций материала от скорости его деформации [6, 7, 16]. Это особенно важно при анализе работы конструкций в процессе ударного нагружения. Требуемые для реализации этой модели коэффициенты C , P (соответственно скорость пластического деформирования, c^{-1} и максимальное значение пластической деформации, %) были приняты на основании исследований, выполненных в [17] (см. таблицу).

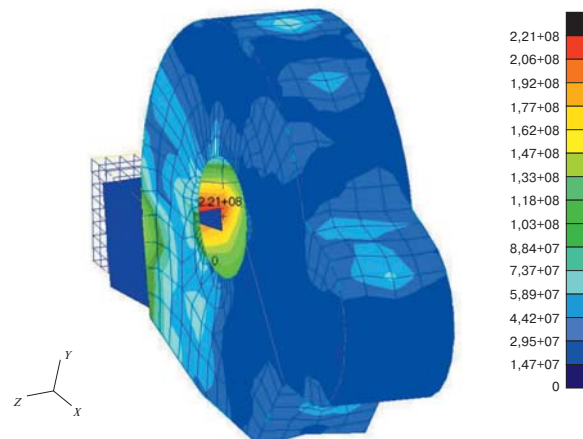


Рис. 6. Сквозное разрушение стенки корпуса редуктора в месте удара куска льда при скорости 360 км/ч и толщине стенок 5 мм

Fig. 6. Through-wall fracture of the traction gearbox housing wall at the point of impact with a chunk of ice at 360 km/h and a wall thickness of 5 mm

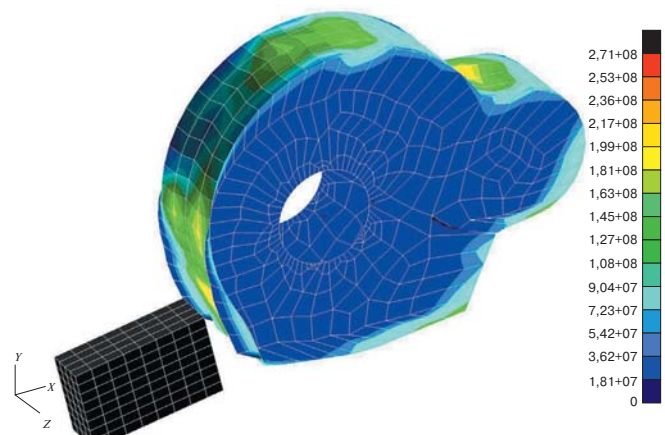


Рис. 7. Напряженно-деформированное состояние корпуса редуктора при скорости куска льда 200 км/ч и толщине стенок 10 мм

Fig. 7. Stress-strain state of the traction gearbox housing at 200 km/h ice chunk velocity and 10 mm wall thickness

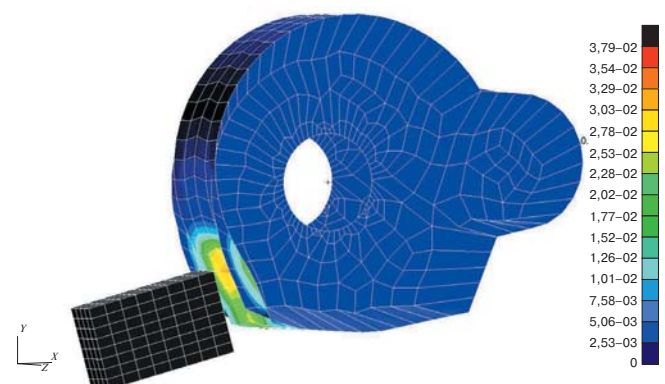


Рис. 8. Деформация корпуса редуктора при скорости куска льда 200 км/ч и толщине стенок 10 мм

Fig. 8. Deformation of the traction gearbox housing at 200 km/h ice chunk speed and 10 mm wall thickness

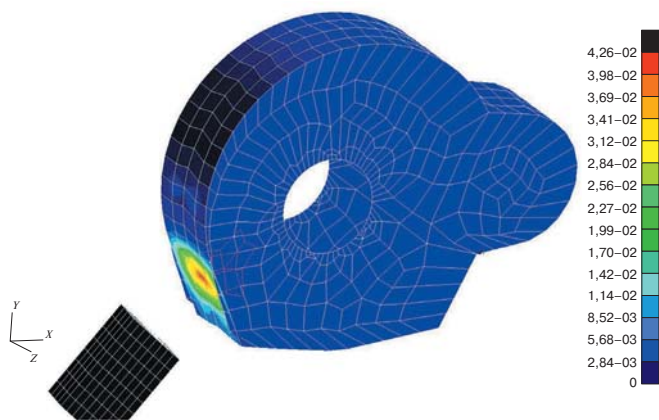


Рис. 9. Деформация корпуса редуктора при скорости куска льда 200 км/ч и толщине стенок 15 мм

Fig. 9. Deformation of the traction gearbox housing at 200 km/h ice chunk speed and 15 mm wall thickness

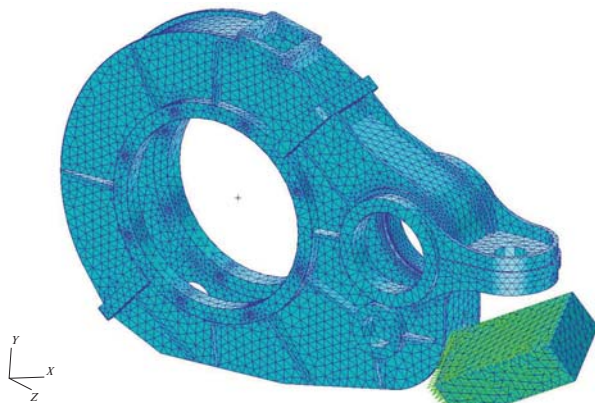


Рис. 10. Уточненная конечно-элементная модель корпуса редуктора и модель куска льда

Fig. 10. Fine element model of the traction gearbox housing and ice chunk model

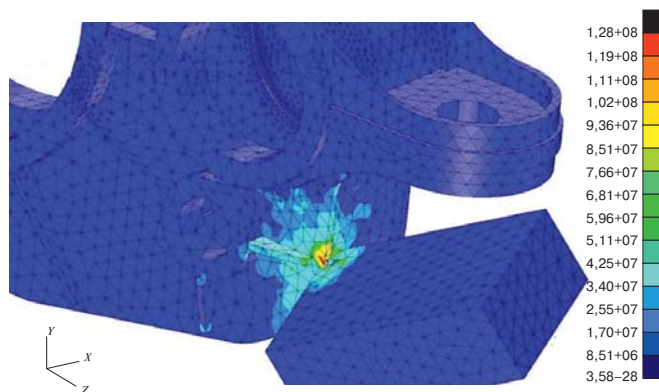


Рис. 11. Момент соприкосновения куска льда с корпусом редуктора, напряжение в месте контакта — 128 МПа (модель материала Cowper—Simonds)

Fig. 11. Moment of contact between the ice chunk and the traction gearbox housing, stress at the point of contact — 128 MPa (Cowper—Simonds material model)

Результаты расчета. На рис. 10 показана уточненная геометрическая модель корпуса тягового редуктора с моделью куска льда. Корпус изготавливается из сварных листов толщиной 10 мм. Конечно-элементная модель состоит из четырех узловых объемных конечных элементов с длиной ребра 10 мм. Расчеты выполнялись в среде MSC.Nastran_SOL700, представляющей собой интегрированный решатель существенно нелинейных быстропротекающих процессов LS-DYNA [18].

Для моделирования удара куска льда о корпус редуктора принималось два значения начальной скорости: 45 и 80 м/с. Это соответствует скоростям движения примерно 160 и 287 км/ч. При выполнении расчетов изменялось максимальное значение пластической деформации (Maximum Plastic Strain), которое в нормативных документах [14] рекомендуется принимать равным 5 %. Величина напряжения в момент соприкосновения куска льда с корпусом редуктора составила 128 МПа (рис. 11).

На рис. 12 показано начало местного разрушения корпуса редуктора при скорости 45 м/с, а на рис. 13 — последняя фаза разрушения. Величина напряжения в окрестности области разрушения составляет 127 МПа.

Как видно из зависимостей $\sigma = f(\epsilon)$, где σ — динамическое напряжение, ϵ — величина пластической деформации в месте измерения напряжения (рис. 14), разрушение материала корпуса происходит при меньшем значении пластической деформации в обеих моделях. В модели Cowper—Simonds (рис. 14, б) виден увеличенный уровень напряжения по сравнению с обычной моделью за счет влияния скорости деформации.

На рис. 15 показана часть конструкции корпуса редуктора с резервуаром для масла. Такая конструкция обычно выполняется по технологии литья. На рис. 16

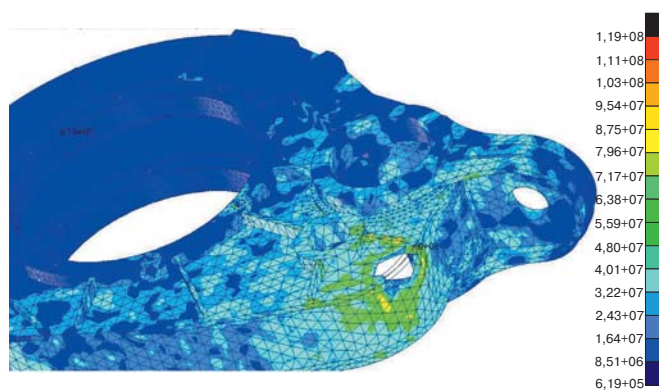


Рис. 12. Начало разрушения корпуса редуктора при скорости куска льда 45 м/с (160 км/ч) (модель материала Cowper—Simonds)

Fig. 12. Beginning of the traction gearbox housing fracture at an ice chunk velocity of 45 m/s (160 km/h) (Cowper—Simonds material model)

Таблица
Характеристики материалов, используемых в моделях корпусов
Table
Characteristics of the materials used in the housing models

№ п/п	Характеристика	Эластопластич- ный материал по модели General	Эластопластич- ный материал по модели Cowper — Simonds
1	Плотность, кг/м ³	7800	7800
2	Модуль упругости, Н/м ²	$2,0 \cdot 10^{11}$	$2,0 \cdot 10^{11}$
3	Коэффициент Пуассона	0,3	0,3
4	Предел текучести	$2,0 \cdot 10^8$	$2,0 \cdot 10^8$
5	Касательный модуль	$5,0 \cdot 10^9$	$5,0 \cdot 10^9$
6	Максимальная пла- стическая деforma- ция	0,025	0,025
7	Коэффициент C	—	247
8	Коэффициент P	—	5

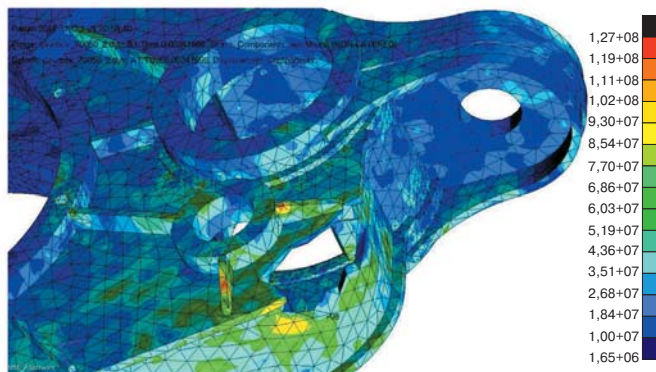


Рис. 13. Последняя фаза разрушения корпуса редуктора, максимальное напряжение в окрестности области разрушения — 127 МПа (модель материала Cowper — Simonds)

Fig. 13. Last fracture phase of the traction gearbox housing, maximum stress in the vicinity of the fracture area — 127 MPa (Cowper — Simonds material model)

показана зависимость $\sigma = f(\epsilon)$ для модели корпуса, изображенной на рис. 15 (модель материала Cowper — Simonds при значении пластической деформации 2,5 %). Разрушение одного конечного элемента происходит при значении напряжения, близком к пределу текучести 125 МПа. На рис. 17 показан окончательный характер разрушения корпуса для этой модели материала.

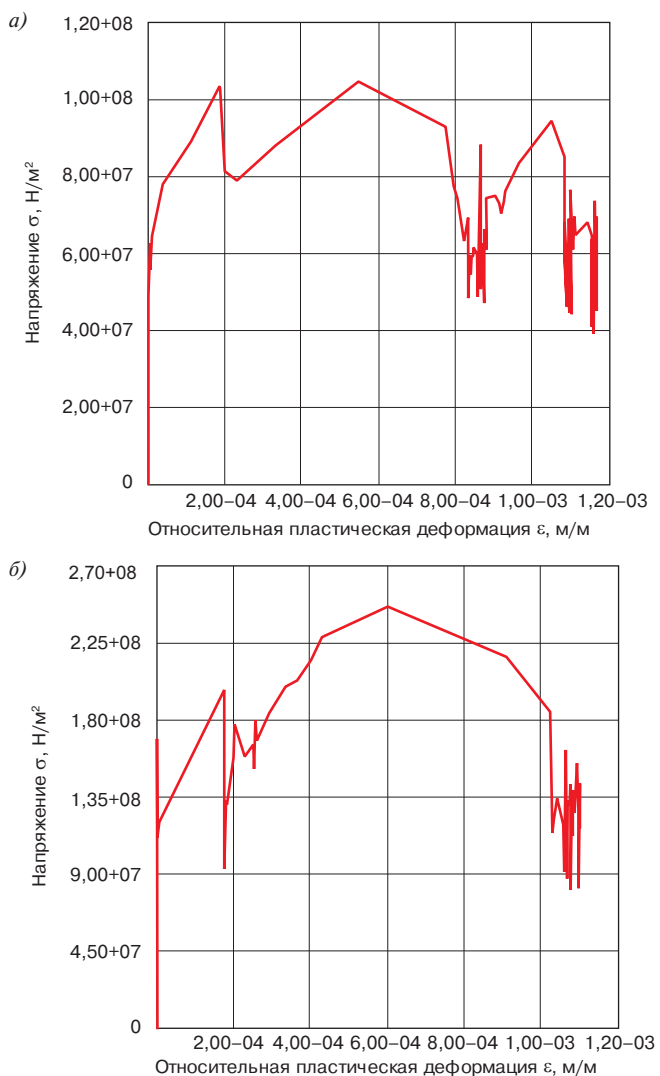


Рис. 14. Зависимость напряжения от пластической деформации для узла конечных элементов в окрестности области разрушения корпуса редуктора. Заданное максимальное значение пластической деформации 2,5 %:
а — по результатам расчета по модели General; б — по результатам расчета по модели Cowper — Simonds

Fig. 14. Stress dependence on dynamic strain for finite element node in the vicinity of the traction gearbox housing fracture area. The specified maximum value of plastic deformation is 2.5 %:
а — according to the results of calculation using the General model;
б — according to the results of calculation using the Cowper — Simonds model

На рис. 18 представлены зависимости для двух разрушенных конечных элементов при значении принятой для модели материала Cowper — Simonds максимальной пластической деформации 2,5 %. Видны значительные увеличения общего уровня напряжения и уровня разрушения.

На рис. 19 показан начальный характер разрушения при значении максимальной пластической

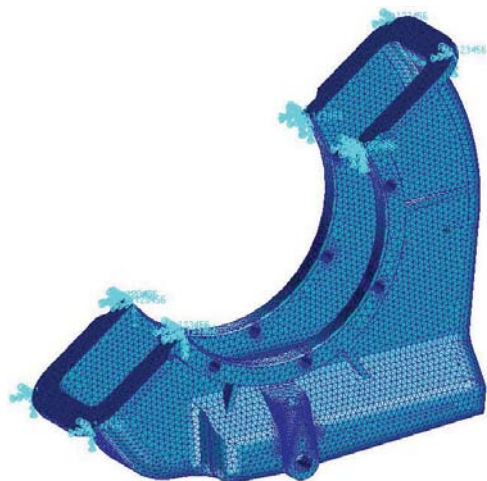


Рис. 15. Конечно-элементная модель части корпуса литого редуктора
Fig. 15. Finite element model of the cast traction gearbox housing component

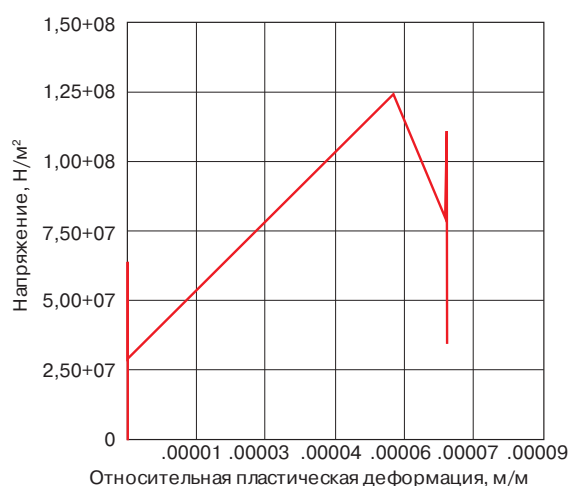


Рис. 16. Зависимость напряжения от пластической деформации для узла конечных элементов в области разрушения (модель материала Cowper—Simonds)

Fig. 16. Stress dependence on plastic strain for finite element node in the fracture area (Cowper—Simonds material model)

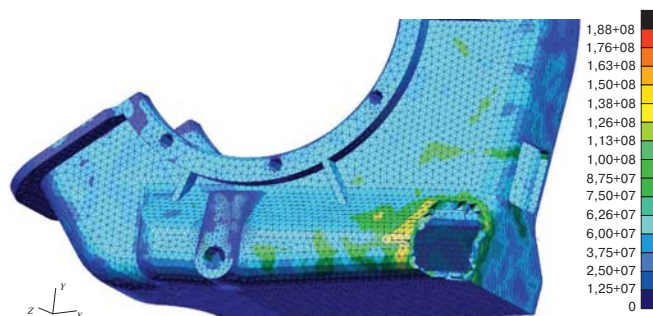


Рис. 17. Разрушение корпуса редуктора при начальной скорости куска льда 45 м/с (модель материала Cowper—Simonds)

Fig. 17. Traction gearbox housing fracture at initial ice block velocity of 45 m/s (Cowper—Simonds material model)

деформации материала около 15%, принятой для этой модели. Скорость куска льда при этом составит 79 м/с.

На рис. 20 показан вариант конструкции корпуса редуктора по модели Cowper—Simonds при значении максимальной пластической деформации 5% по рекомендации [14], показано взаимодействие куска льда и корпуса.

На рис. 21 представлена конечная фаза разрушения корпуса редуктора и зависимости для конечных элементов в окрестности области разрушения корпуса. Виден повышенный уровень напряжения из-за влияния скорости деформации, а разрушение начинается и происходит при значениях пластической деформации, близких к 1–2%.

На основании выполненных исследований следует ряд конструктивных решений для защиты корпуса редуктора высокоскоростных поездов от разрушения при воздействии сторонних предметов с пути.

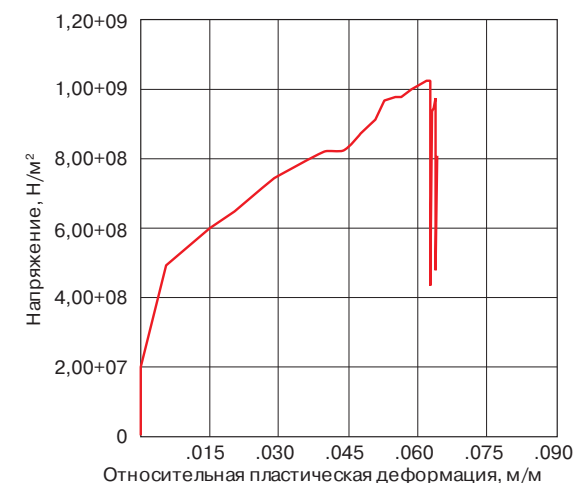
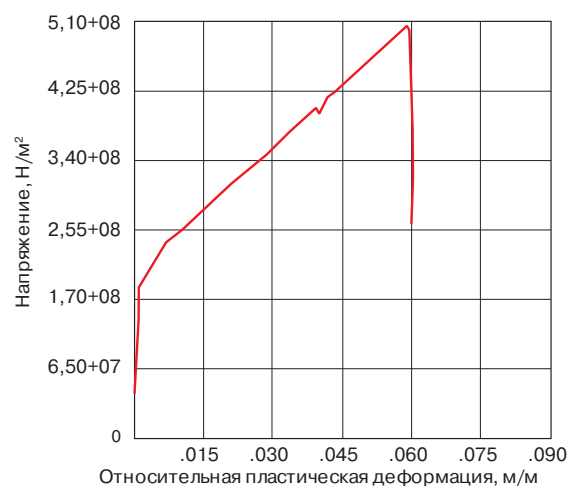


Рис. 18. Зависимость напряжения от пластической деформации для двух узлов конечных элементов в области разрушения при скорости воздействия 79 м/с

Fig. 18. Stress dependence on plastic strain for two finite element nodes in the fracture area at an impact velocity of 79 m/s

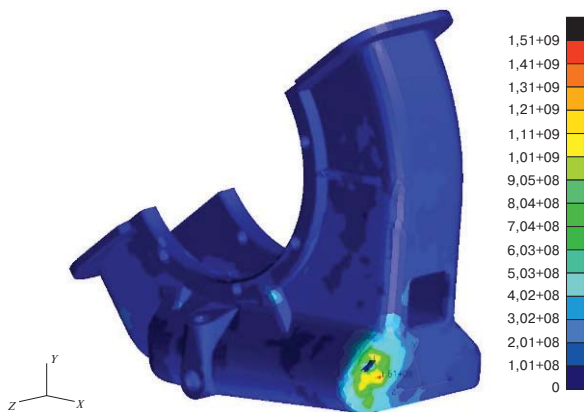


Рис. 19. Начальная фаза разрушения корпуса редуктора при скорости куска льда 79 м/с (максимальная пластическая деформация материала около 15%)

Fig 19. Initial fracture phase of the traction gearbox housing at ice chunk velocity of 79 m/s (maximum plastic deformation of material approx. 15%)



Рис. 20. Начальная фаза разрушения корпуса редуктора при скорости куска льда 79 м/с (максимальная пластическая деформация материала 5%)

Fig 20. Initial fracture phase of the traction gearbox housing at ice chunk velocity of 79 m/s (maximum plastic deformation of material approx. 5%)

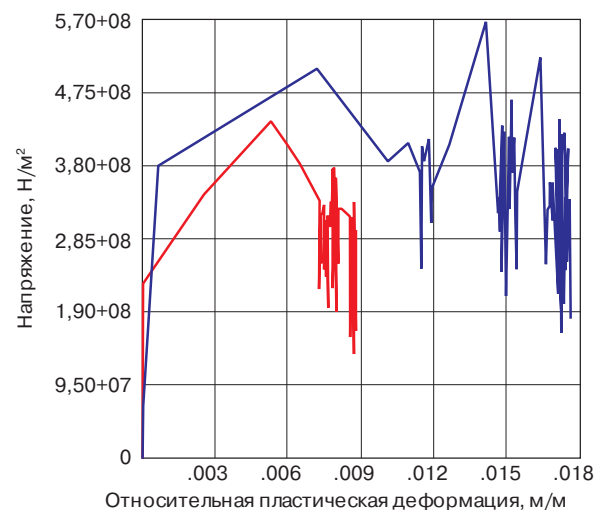
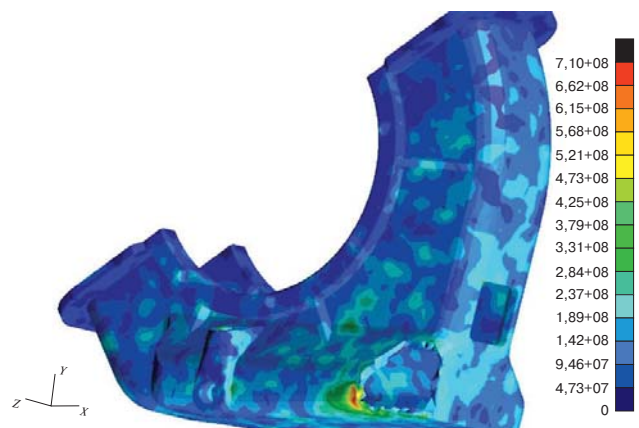


Рис. 21. Конечная фаза разрушения корпуса редуктора при скорости куска льда 79 м/с и зависимость напряжения от пластической деформации для узла конечных элементов в области разрушения. На графике синим цветом — деформация элемента конечно-элементной модели в окрестности области разрушения, красным — непосредственно в области разрушения

Fig 21. The final fracture phase of the traction gearbox housing at 79 m/s and the stress-strain dynamic relationship for the finite element node in the fracture area. The graph shows in blue the deformation of the finite element model element in the vicinity of the fracture area, and in red the deformation of the fracture area itself

1. Проектирование упругих корпусов. Это решение входит в противоречие с требованием жесткости корпусов для зубчатых передач.

2. Применение специального «жертвенного элемента» в конструкции корпуса редуктора, который разрушается, защищая корпус, и затем заменяется на новый элемент.

3. Проектирование корпуса с развитым в продольном направлении объемом картера с защитой его нижней части ребрами (рис. 22).

Обсуждение. Предлагаемая методика расчета корпусов редукторов с применением модели Cowper—

Simonds, учитывающей зависимость динамических деформаций материала от его скорости деформации, позволила выявить уязвимость конструкции корпусов от сторонних предметов на пути.

При этом в качестве рекомендации возможны два направления: изменение конструкции картера редуктора с введением ребер жесткости в его нижней части или применение «жертвенного элемента», выполненного из материала с повышенной прочностью. Первое направление потребует значительных изменений в конструкторской документации и приведет к удорожанию редуктора. Второе

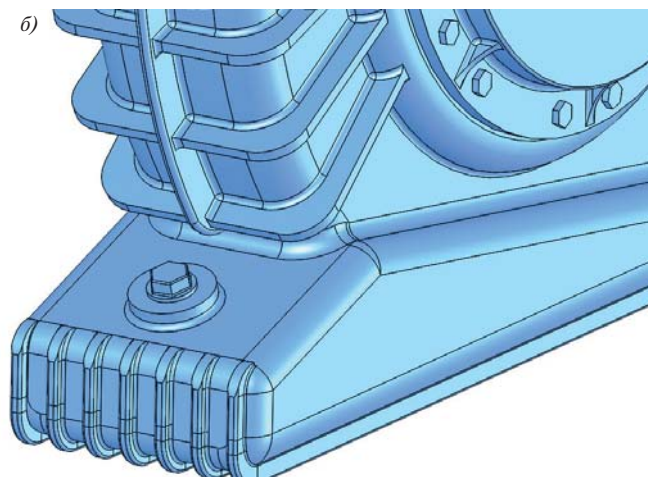


Рис. 22. Корпус редуктора с развитым в продольном направлении объемом картера:
а — внешний вид; б — модель нижней части корпуса

Fig. 22. Traction gearbox housing with a crankcase volume developed in the longitudinal direction:
а — appearance; б — model of the lower part of the housing

направление, подразумевающее съемное присоединение пластины повышенной прочности, проще в реализации в условиях разработки или модернизации скоростного подвижного состава.

Закключение. 1. Рассмотренный случай разрушения корпуса редуктора относится к редким событиям, но возможным.

2. Для учета упрочнения металла при больших скоростях его деформации в расчетах модели корпуса редуктора применена модель билинейного упрочнения материала Купера — Саймондса (Cowper — Simonds).

3. Выполненные расчеты подтверждают возможность разрушения корпусов опорно-осевых тяговых

редукторов скоростных и высокоскоростных электропоездов при воздействии на корпус сторонних предметов, в частности куска льда.

4. Предложен ряд конструктивных решений для защиты корпусов тяговых редукторов высокоскоростных поездов от воздействия сторонних предметов.

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 ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Князев Д. А. Обоснование периодичности освидетельствования полых осей колесных пар высокоскоростного подвижного состава: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. М., 2019. 138 с. [Knyazev D. A. *Justification for the frequency of inspection of hollow axles of wheel pairs of high-speed rolling stock*. Cand. Sci. (Eng.) thesis: 05.22.07. Moscow; 2019. 138 p. (In Russ.)].
2. Полякова Е. Я. Особенности аэродинамики подвагонного пространства высокоскоростного подвижного состава: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. СПб., 2021. 150 с. [Polyakova E. Ya. *Peculiarities of the aerodynamics of the undercarriage of high-speed rolling stock*. Cand. Sci. (Eng.) thesis: 05.22.07. St. Petersburg; 2021. 150 p. (In Russ.)].
3. Kwon H. B., Park C. S. An experimental study on the relationship between ballast flying phenomenon and strong wind under high speed train. In: *Proceedings of the World Congress on Rail Research, Montreal, QC, Canada, 4–8 June 2006*. [S. l.]; 2006. p. 3–6.
4. Ido A., Saitou S., Nakade K., Iikura S. Study on under-floor flow to reduce ballast flying phenomena. In: *Proceedings of the World Congress on Rail Research, Seoul, South Korea, 18–22 May 2008*. Paper S2.3.4.2.
5. Высокоскоростной подвижной состав для ВСМ: технические требования: утв. первым вице-президентом ОАО «РЖД» А. С. Мишариным 08.06.2015. М., 2015. [High-speed railway rolling stock for HS lines. *Technical requirements*. Approv. First Vice-President of JSC Russian Railways Alexander Misharin of June 8, 2015. Moscow; 2015. (In Russ.)].
6. MSC/Dytran™ 2008 r1. User's Guide. MSC Software Corporation. 234 p.
7. MSC/Dytran™ 2018. Reference Manual. MSC Software Corporation. 849 p.
8. Ray R. G. *Elasto-plastic Analysis of Plate Using ABAQUS*. India: National Institute of Technology Rourkela; 2016. 61 p.
9. Islam M. M. R., Sakib-Ul-Alam M., Nazat K. K., Hassan M. M. Effect of Analysis Parameters on Non-Linear Implicit Finite Element Analysis of Marine Corroded Steel Plate. *AIP Conference Proceedings*. 2017;1919(1):020025. <https://doi.org/10.1063/1.5018543>.
10. Ko Y. G., Kim S. J., Sohn J. M., Paik J. K. A practical method to determine the dynamic fracture strain for the nonlinear finite element analysis of structural crashworthiness in ship–ship collisions. *Ships and*

Offshore Structures. 2017;13(4):412-422. <https://doi.org/10.1080/17445302.2017.1405584>.

11. Selyutina N. S., Petrov Yu. V. Comparative Analysis of Dynamic Plasticity Models. *Reviews on Advanced Materials Science*. 2018;57(2):199-211. <https://doi.org/10.1515/rams-2018-0065>.

12. Murugesan M., Jung D. W. Johnson Cook Material and Failure Model Parameters Estimation of AISI-1045 Medium Carbon Steel for Metal Forming Applications. *Materials*. 2019;12(4):609. <https://doi.org/10.3390/ma12040609>.

13. Márquez S. *Modelling the Constitutive Behaviour of Cast Iron*. Sweden: Linköping University; 2015. 41 p.

14. BS EN 1993-1-5. *Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1–5: General rules – Plated structural elements*. Brussels: CEN; 2006. 55 p.

15. Lobdell M., Croop B., Lobo H. Comparison of Crash Models for Ductile Plastics. In: *10th European LS-DYNA Conference, 15–17 June 2015, Würzburg, Germany*. [S. l.]; 2015.

16. Соболев А. В., Радченко М. В. Использование модели пластичности Джонсона – Кука в численном моделировании бросковых испытаний контейнеров для транспортирования ОЯТ // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2016. № 3. С. 82–93 [Sobolev A. V., Radchenko M. V. Using Johnson–Cook plasticity model to drop test numerical simulation containers for spent fuel transportation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2016;(3):82-93 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.26583/npe.2016.3.09>.

17. Paik J. K. *Ultimate limit state analysis and design of plated structures*. 2nd edition. UK: Wiley; 2018. 672 p. <https://doi.org/10.1002/9781119367758>.

18. Kim Y. S., Samy Y., Serdar I., Kim S. J., Seo J. K., Kim B. J. Environmental consequences associated with collisions involving double hull oil tanker. *Ships and Offshore Structures*. 2015;10(5):479-487. <https://doi.org/10.1080/17445302.2015.1026762>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Евгений Константинович РЫБНИКОВ,

канд. техн. наук, профессор, кафедра электропоездов и локомотивов, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 795215, <https://orcid.org/0000-0002-9104-3959>

Сергей Вячеславович ВОЛОДИН,

канд. техн. наук, доцент, кафедра электропоездов и локомотивов, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 794923, <https://orcid.org/0000-0001-6887-9355>

Татьяна Олеговна ВАХРОМЕЕВА,

канд. техн. наук, доцент, кафедра электропоездов и локомотивов, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 795098, <https://orcid.org/0000-0002-1705-8044>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy K. RYBNIKOV,

Cand. Sci. (Eng.), Professor, Department of Electric Trains and Locomotives, Russian University of Transport (127994,

Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 795215, <https://orcid.org/0000-0002-9104-3959>

Sergey V. VOLODIN,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Electric Trains and Locomotives, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 794923, <https://orcid.org/0000-0001-6887-9355>

Tatiana O. VAKHROMEeva,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Electric Trains and Locomotives, Russian University of Transport (127994, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 795098, <https://orcid.org/0000-0002-1705-8044>

ВКЛАД АВТОРОВ

Евгений Константинович РЫБНИКОВ. Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, разработка алгоритма исследования и расчетных моделей, структурирование исследования, анализ результатов, редактирование и подготовка текста рукописи (50%).

Сергей Вячеславович ВОЛОДИН. Изучение конструктивных особенностей корпусов тяговых редукторов, разработка геометрических моделей, анализ результатов расчета (25%).

Татьяна Олеговна ВАХРОМЕЕВА. Анализ и описание материалов для расчета, анализ результатов расчета (25%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Evgeniy K. RYBNIKOV. Formulation of areas of research, formulation of objectives, development of research algorithms and computational models, structuring of research, analysis of results, editing and preparation of the paper (50%).

Sergey V. VOLODIN. Study of the design features of traction gearboxes, development of geometric models, analysis of calculation results (25%).

Tatiana O. VAKHROMEeva. Analysis and description of calculation materials, analysis of calculation results (25%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 20.02.2023, рецензия от первого рецензента получена 23.03.2023, рецензия от второго рецензента получена 10.04.2023, принята к публикации 14.04.2023.

The article was submitted 20.02.2023, first review received 23.03.2023, second review received 10.04.2023, accepted for publication 14.04.2023.



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 625.151

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-146-156>

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



Проектирование конструкции моноблочных крестовин для тяжелых условий эксплуатации

П. В. Трегубчак✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Анализируется влияние конструктивных особенностей крестовин с цельнолитым блоком сердечника с усовиками и приварными рельсовыми окончаниями (моноблочная крестовина) на возникновение опасных отказов, связанных с недостатками конструкции. Важным вопросом при проектировании крестовин является распределение напряжений с целью обеспечения равномерной жесткости и исключение возникновения опасных отказов изделия при обеспечении технологичности его производства. Достижение данных целей реализуется за счет рационального расположения продольного силового элемента отливки.

Материалы и методы. Для определения влияния места расположения силового элемента конструкции моноблочной крестовины на коэффициент запаса по усталостной прочности использовалось компьютерное моделирование с помощью системы конечно-элементного анализа ANSYS. Эксплуатационные испытания опытных крестовин прошли на втором главном пути Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» и на станции Исылкуль Западно-Сибирской железной дороги.

Результаты. Изучено влияние геометрии продольного ребра крестовины и места его расположения на безотказность работы конструкции. По результатам расчетов и подтвердивших их испытаний были предложены окончательные геометрические размеры цельнолитого блока сердечника с усовиками с учетом технологичности производства изделий. Даны рекомендации по проектному расположению продольных ребер моноблочных крестовин при конструировании. Предложенная конструкция моноблочных крестовин принята к серийному производству.

Обсуждение и заключение. Представленная в статье одна из конструкций моноблочной крестовины со сдвоенными продольными ребрами жесткости показала наименьшие эквивалентные напряжения. Такая конструкция позволяет обеспечить работу изделия, исключая возникновение опасных отказов. Реализация использованных в работе принципов математического моделирования с учетом принятой расчетной схемы позволит в дальнейшем значительно сократить время разработки и постановки на производство крестовин с цельнолитым блоком сердечника с усовиками и приварными рельсовыми окончаниями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стрелочный перевод, моноблочная крестовина, прочность, конструирование, тяжеловесное движение, компьютерное моделирование, циклическое нагружение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Трегубчак П. В. Проектирование конструкции моноблочных крестовин для тяжелых условий эксплуатации // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 2. С. 146–156. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-146-156>.

✉ tregubchak.pavel@vniizht.ru (П. В. Трегубчак)

© Трегубчак П. В., 2023



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 625.151

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-146-156>

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



Design of monoblock crossing for heavy operating conditions

Pavel V. Tregubchak✉

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors analyse the influence of the design features of crossings with a solid core unit with wing rails and welded rail ends (monoblock crossing) on the occurrence of hazardous failures associated with design flaws. Stress distribution to ensure uniform stiffness and avoid dangerous failures while ensuring product manufacturability is an important issue in cross design. This is achieved by rationalising the casting's longitudinal force element.

Materials and methods. A computer simulation using ANSYS finite element analysis is used to determine the influence of the location of the force element in a monoblock crossing design on the fatigue safety factor. Operational tests of the prototype crossings were carried out on the second main track of the Experimental Loop of Railway Research Institute and at the Isilkul station of the West Siberian Railway.

Results. The influence of the geometry of the longitudinal rib of the crossing and its location on the failure-free operation of the structure is studied. Based on the calculation results and confirmed tests, the final geometric dimensions of the one-piece core unit with wing rails are proposed, taking into account product manufacturability. Recommendations are given for the positioning of the longitudinal ribs of the monoblock crossings during the design phase. The proposed design of the monoblock crossings is adopted for series production.

Discussion and conclusion. The lowest equivalent stresses are found in one of the monoblock crossing designs with two longitudinal stiffening ribs presented in the article. This design allows the product to operate in a way that prevents dangerous failures. The implementation of the principles of mathematical modelling used in this work, taking into account the adopted calculation scheme, ensures a significant reduction in the time required for the design and manufacture of crossings with a solid core unit with wing rails and welded rail ends.

KEYWORDS: railroad switch, monoblock crossing, strength, design, heavy-haul, computer simulation, cyclic loading

FOR CITATION: Tregubchak P.V. Design of monoblock crossing for heavy operating conditions. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(2):146-156. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-146-156>.

Введение. Повышение объемов перевозок — одна из важнейших задач железнодорожного транспорта Российской Федерации в настоящее время. Увеличение пропускной и провозной способности без реконструкции и строительства дополнительных линий возможно несколькими способами: повышением весовых норм поездов, повышением осевых нагрузок, повышением скоростей движения.

Стрелочные переводы являются одним из важнейших технических средств инфраструктуры железных дорог, поэтому их конструкция и технология производства должны отвечать потребностям перевозочного процесса и обеспечивать реализацию перспективных планов железнодорожного транспорта. В настоящее время ведутся разработки новых и модернизация существующих стрелочных переводов с целью повышения их ресурса в условиях интенсификации перевозочного процесса [1, 2]. Внедрение такой продукции позволит снизить эксплуатационные затраты и периодичность проведения ремонтов пути, что необходимо для освоения заданного объема перевозок, эффективного применения тяжеловесного движения грузовых поездов, развития скоростного и высокоскоростного движения на железных дорогах России.

Над проблемой увеличения ресурса стрелочной продукции работают специалисты в России и за рубежом. В этой области существует три основных направления для совершенствования конструкции: применение новых и модифицированных материалов; упрочнение рабочих поверхностей; разработка конструкции, наилучшим образом отвечающей условиям работы крестовины. Опыт исследований специалистов российских железных дорог показывает, что использование третьего направления позволяет получить наибольший эффект при наименьших затратах [3, 4].

Разработка инновационной элементной базы для создания стрелочных переводов нового поколения из комплектующих российского производства ведется с учетом отечественного и зарубежного опыта при участии предприятий-изготовителей, а также профильных институтов, компетентных в области проектирования и проведения сложных расчетов элементов инфраструктуры [5].

На российских железных дорогах наиболее распространены конструкции крестовин с неподвижным сердечником. Они применяются в стрелочных переводах, косоугольных глухих пересечениях и перекрестных съездах. При этом такие крестовины имеют наименьший ресурс в сравнении с основными элементами конструкции в целом.

Крестовина с цельнолитым блоком сердечника с усовиками и приварными рельсовыми окончаниями

(моноблочная крестовина) в большей степени удовлетворяет требованиям, предъявляемым к конструкциям, работающим под воздействием высоких нагрузок. К преимуществам данных крестовин можно отнести отсутствие болтовых соединений рельсовых усовиков и сердечника из высокомарганцевистой стали, что позволяет обеспечить единство работы конструкции по сравнению со сборными крестовинами, а также отсутствие необходимости подтяжки болтов в процессе эксплуатации. Цельнолитой блок сердечника дает дополнительные возможности конструкторам по оптимизации формы верхней рабочей поверхности (геометрии поверхности катания). Моноблочные крестовины имеют повышенные эксплуатационные качества и способны воспринимать высокие нагрузки на ось благодаря конструктивным особенностям и способности к самоупрочнению (наклепу), а также высокой износостойкости стали марки 110Г13Л, из которой они изготавливаются.

С учетом тяжелых условий работы, сложной формы изделия и технологии изготовления, крестовины из высокомарганцевистой стали являются одними из наиболее трудоемких в проектировании элементов стрелочного перевода.

Объект исследования. Крестовина как элемент инфраструктуры должна обеспечивать выполнение следующих основных требований: безопасности; учета видов подвижного состава, на обращение которых должен быть рассчитан перевод; соответствия системе обслуживания; ресурсных требований к элементам перевода [6, 7], а также быть технологичной на всех стадиях производства. С целью достижения требуемых показателей при проектировании крестовин должны быть решены конструкторские, металлургические и технологические задачи, позволяющие обеспечить «проливаемость» (заполнение литейной формы) и бездефектность отливки крестовины, достижение соответствия всех геометрических параметров (геометрии) изделия.

В большей степени точность отливки и возможность получения геометрии, заложенной в конструкции изделия, определяются технологией изготовления форм. При этом конструктивные особенности крестовины из высокомарганцевистой стали в значительной степени будут влиять на прочность и устойчивость к возникновению дефектов, угрожающих безопасности движения в процессе эксплуатации, а также на ее долговечность, что является первоочередной задачей, решаемой при проектировании.

Важным вопросом при проектировании крестовин является распределение напряжений с целью обеспечения равномерной жесткости и исключение возникновения опасных отказов изделия при обеспечении технологичности его производства. Достижение

данных целей реализуется за счет рационального расположения в конструкции продольного силового элемента отливки.

В качестве моделируемого объекта был принят цельнолитой блок моноблочной крестовины типа Р65 марки 1/11. Для проведения анализа были подготовлены 3D-модели трех вариантов конструкции рассчитываемого объекта под формат конечно-элементного комплекса ANSYS (модуль ANSYS Design Modeler) с одинаковой геометрией поверхности катания, а также внешними, сопрягаемыми при сборке крестовины размерами (рис. 1).

При подготовке моделей учитывалась сложность и трудоемкость процесса изготовления литейных форм и характерные опасные зоны (рис. 2–4).

Расположение первой опасной зоны обусловлено увеличением расстояния между боковыми поверхностями клина по мере удаления от математического центра крестовины в сторону заднего торца и, как следствие, снижением перераспределения доли нагрузки на боковую поверхность клина, противоположную нагружаемой.

Расположение второй опасной зоны обусловлено перераспределением нагрузки между боковой поверхностью литого усовика и внешней боковой поверхностью цельнолитого блока от его горла до пазухи, находящейся со стороны переднего торца.

Первая модель конструкции крестовины имеет два продольных ребра, проходящих по центру отливки (рис. 2). С точки зрения конструкции и сложности изготовления литейной формы данный вариант является самым простым.

Вторая модель конструкции имеет два продольных ребра, начинающихся от тела отливки со стороны заднего торца отливки и объединяющихся в районе сечения клина сердечника крестовины шириной 50 мм. Два коротких продольных ребра клина идут от тела отливки со стороны переднего торца и объединяются в одно ребро, сопрягающееся с ребрами, расположенными с противоположной стороны (рис. 3). Переход в зоне сопряжения ребер выполнен в виде понижения их высоты до уровня диафрагмы, что обусловлено особенностями изготовления литейной формы. Учитывая геометрию соединения и перехода ребер, расположенных со стороны заднего торца отливки, данный вариант является наиболее технологически сложным для реализации.

Третья модель конструкции отличается от второй тем, что ребра, расположенные со стороны заднего торца отливки, объединяются в районе сечения клина сердечника крестовины шириной 80 мм, а два противоположных ребра — в районе ее горла (рис. 4). Ребра имеют увеличенную высоту по сравнению с первой и второй конструкцией. Изготовление литейной формы данной



Рис. 1. 3D-модель цельнолитого блока моноблочной крестовины типа Р65 марки 1/11 (внешние поверхности)

Fig. 1. 3D model of a solid block of a P65 type monoblock crossing, grade 1/11 (external surfaces)

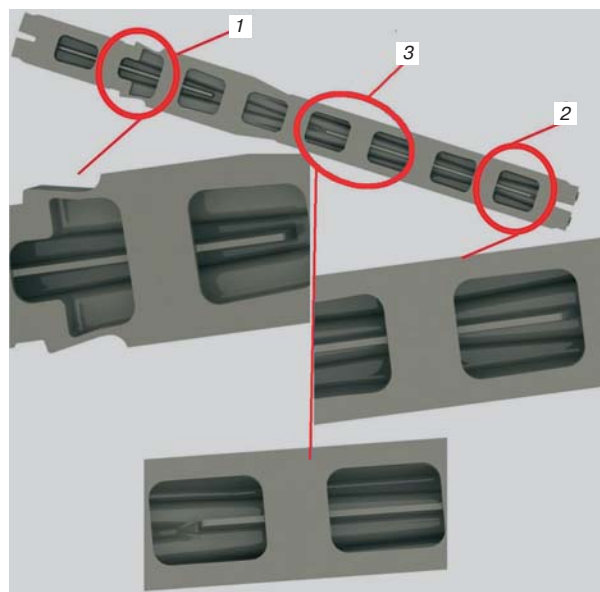


Рис. 2. Первая модель конструкции с одиночными продольными ребрами жесткости:
1 — первая опасная зона со стороны заднего торца крестовины;
2 — вторая опасная зона со стороны переднего торца крестовины;
3 — геометрия перехода ребра жесткости, расположенного со стороны переднего торца крестовины, в тело отливки

Fig. 2. First model designed with single longitudinal stiffeners:
1 — first danger zone at the rear end of the crossing;
2 — second danger zone at the front end of the crossing;
3 — transition geometry of the stiffener at the front end of the crossing into the casting body

отливки по технологической сложности является промежуточным между первым и вторым вариантами.

Данные сочетания расположения ребер в конструкции крестовин были выбраны с целью проведения анализа влияния длины, высоты и места расположения ребер относительно поверхности катания на особенности их работы.

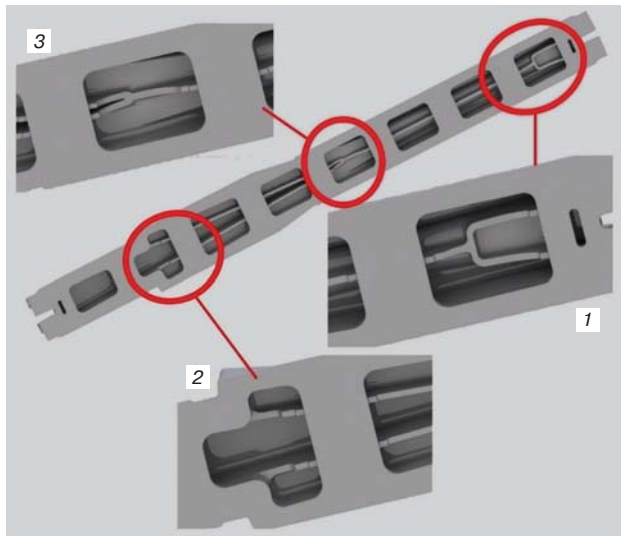


Рис. 3. Вторая модель конструкции со сдвоенными продольными ребрами жесткости:

- 1 — первая опасная зона со стороны переднего торца отливки;
2 — вторая опасная зона со стороны заднего торца крестовины;
3 — геометрия соединения ребер, идущих со стороны заднего торца крестовины

Fig. 3. Second model designed with double longitudinal stiffening:

- 1 — first danger zone at the front end of the casting;
2 — second danger zone at the rear end of the crossing;
3 — rib connection geometry from the rear end of the crossing

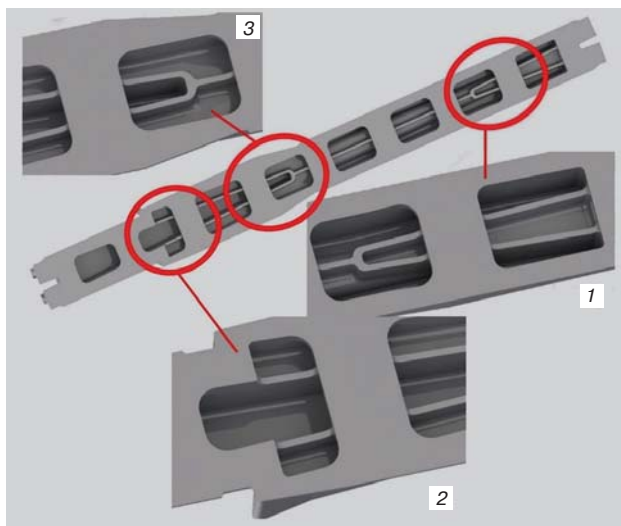


Рис. 4. Третья модель конструкции со сдвоенными продольными ребрами жесткости:

- 1 — первая опасная зона со стороны переднего торца отливки;
2 — вторая опасная зона со стороны заднего торца крестовины;
3 — геометрия соединения ребер, идущих со стороны заднего торца крестовины

Fig. 4. Third model designed with double longitudinal stiffeners:

- 1 — first danger zone at the front end of the casting;
2 — second danger zone at the rear end of the crossing;
3 — rib connection geometry from the rear end of the crossing

Моделирование цельнолитого блока моноблочной крестовины с помощью метода конечных элементов.

Составление математической модели осуществлялось с использованием расчетной платформы ANSYS Workbench. На данном этапе работ для проведения конечно-элементного моделирования были выбраны следующие модели поведения конструкции: нестационарный прочностной анализ (Transient Structural), статический структурный анализ (Static Structural) [8–10].

При моделировании материал модели принимался изотропным (использовалась модель изотропного поведения материала — Isotropic Elasticity). Модуль упругости первого рода (модуль Юнга E) принят $2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона — 0,3; объемный модуль упругости K — $1,6667 \cdot 10^{11}$ Па; модуль сдвига G — $7,6923 \cdot 10^{10}$ Па. Величины пределов текучести и прочности на растяжение-сжатие использованы на основе данных [11, 12] и экспериментальных результатов лабораторных исследований фактически выплавляемой стали (табл. 1). Полный объем выборки составил 100 плавов. Механические свойства стали марки 110Г13Л после термической обработки на исследуемых образцах соответствуют ГОСТ 7370–2015 [13].

Таким образом, пределы текучести при растяжении (Tensile Yield Strength) и сжатии (Compressive Yield Strength) равны $380 \div 490$ МПа. Пределы прочности при растяжении (Tensile Ultimate Strength) и сжатии (Compressive Ultimate Strength) — $810 \div 920$ МПа. При моделировании использованы нижние значения характеристик.

Были приняты следующие параметры конечно-элементной модели (КЭМ): тип КЭМ — тетрагональная сетка; максимальный размер конечных элементов — 50 мм. На контактные поверхности крестовины, располагающиеся вдоль траектории перемещения колеса, а также на ее внутренние поверхности назначен минимальный размер конечного элемента — 2–4 мм (рис. 5).

В расчетной модели выделены и обозначены следующие контактные поверхности: Contact bodies — контактные поверхности вагонного колеса; Target bodies — контактные поверхности крестовины стрелочного перевода. Тип контакта — фрикционный (Frictional) с учетом трения-качения. Использован расширенный метод Лагранжа при обновлении матрицы жесткости на каждой итерации.

В настройках конечно-элементного анализа (Analysis Settings) были выбраны следующие параметры:

1. Количество начальных подшагов — 20, минимальное количество подшагов — 10, максимальное количество — 100.
2. Активирован контроль больших деформаций.
3. Активирован нелинейный контроль: вариант метода Ньютона — Рафсона (полный).
4. Активирован учет конвергенции нагрузки.

Таблица 1

Механические свойства стали марки 110Г13Л после термической обработки на исследуемых образцах

Table 1

Mechanical properties of 110G13L steel after heat treatment on test specimens

№ п/п	№ плавки	Предел прочности, кгс/мм ²	Предел текучести, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, кгс·м/см ²	Группа металла
1	155849	89,8	49,0	31,7	27,5	22,5	2
2	657466	93,9	49,0	42,0	36,4	32,3	1
3	657468	92,1	49,0	33,7	30,6	27,8	1
4	657487	81,4	49,0	22,2	21,0	31,9	3
5	205822	92,9	49,0	36,7	34,9	28,6	1
6	657497	89,2	49,0	32,0	29,4	22,6	2

Нижняя опорная поверхность цельнолитой крестовины была выбрана в качестве неподвижной опоры (fixed support).

Нагрузка на ось колесной пары составляет 270 кН. Соответственно, нагрузка на колесо равна 135 кН.

Моменту времени τ_1 соответствуют положения колес, представленные на рис. 6. Каждый последующий момент времени τ_n характеризует следующее положение колеса, отличающееся от предыдущего на расстояние 15 мм.

На рис. 7 представлены картины распределения полей: полных деформаций, эквивалентных напряжений по Мизесу, коэффициентов запаса по статической и усталостной прочности для момента времени τ_8 . Аналогичным образом были получены картины распределения полей для других сечений крестовины.

На рис. 8 и 9 представлено поле распределения эквивалентных напряжений, а на рис. 10 поле распределения коэффициента запаса по усталостной прочности в опасных зонах второй модели конструкции.

Картины распределения полей эквивалентных напряжений и коэффициента запаса по усталостной прочности показывают слабые места конструкции, они выделены красным цветом, и позволяют оценить ее ресурсный потенциал.

Результаты численного моделирования. Полученные в процессе моделирования максимальные уровни эквивалентных напряжений и минимальные значения коэффициента запаса по усталостной прочности в первой и второй опасных зонах (см. рис. 2–4) представлены в табл. 2.

В ходе проведенного конечно-элементного моделирования определено напряженно-деформированное состояние трех вариантов конструкций (моделей) цельнолитой крестовины, находящейся в условиях циклического нагружения.

Рекомендуется при проектировании моноблочных крестовин продольные ребра жесткости располагать непосредственно под поверхностью катания.

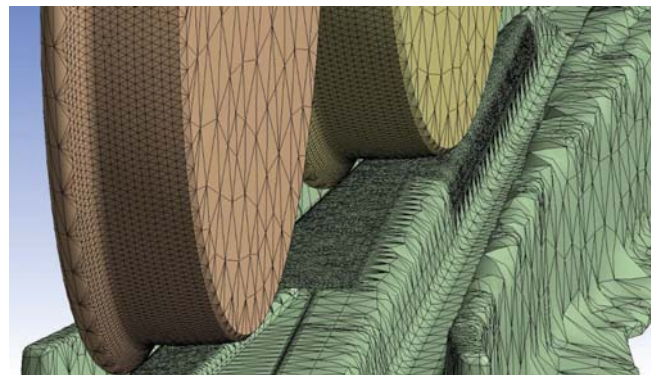


Рис. 5. Сгущение сетки вдоль траектории качения колеса на поверхности катания крестовины

Fig. 5. Grid clustering along the wheel path on the rolling surface of the crossing

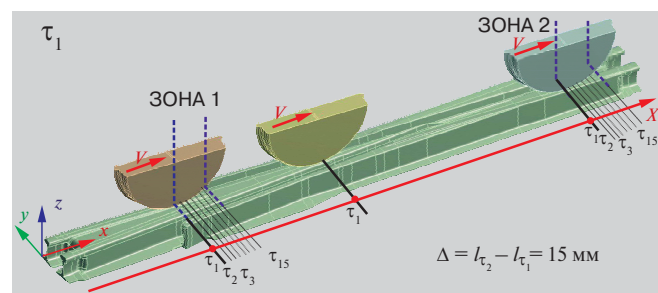


Рис. 6. Перемещение колеса относительно цельнолитой крестовины в процессе моделирования

Fig. 6. Wheel movement in relation to the solid crossing during modelling

Установлено, что из всех представленных конструкций цельнолитой крестовины наименьшей прочностью в условиях циклического нагружения обладает первая модель, а лучшими прочностными характеристиками — третья.

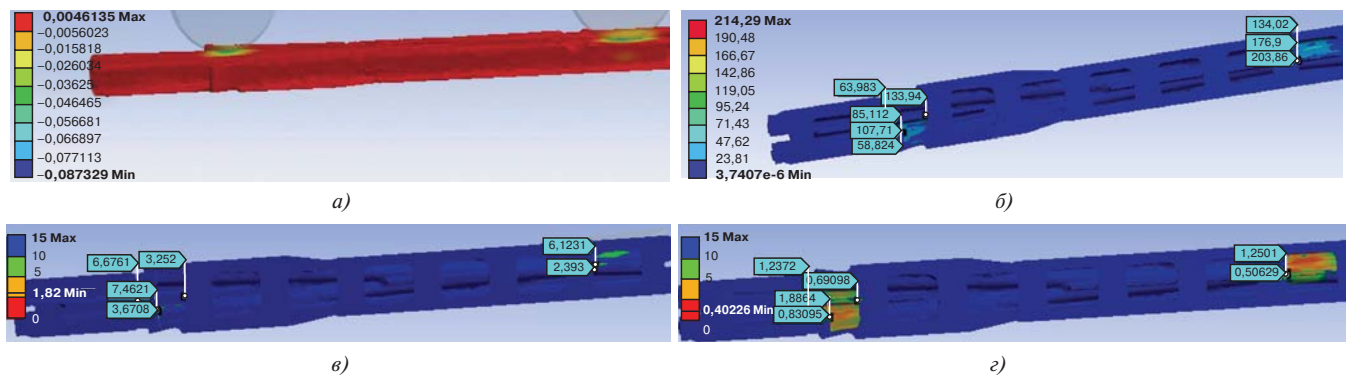


Рис. 7. Результаты расчета для восьмого момента времени в первой и второй опасных зонах для первой модели конструкции:
 а — абсолютная деформация по вертикальной компоненте, мм; б — эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа;
 в — коэффициент запаса по статической прочности; г — коэффициент запаса по усталостной прочности

Fig. 7. Calculation results for the eighth time point in the first and the second danger zones for the first design model:
 а — absolute vertical component strain, mm; б — equivalent von Mises stresses, MPa;
 в — static safety factor; г — fatigue safety factor

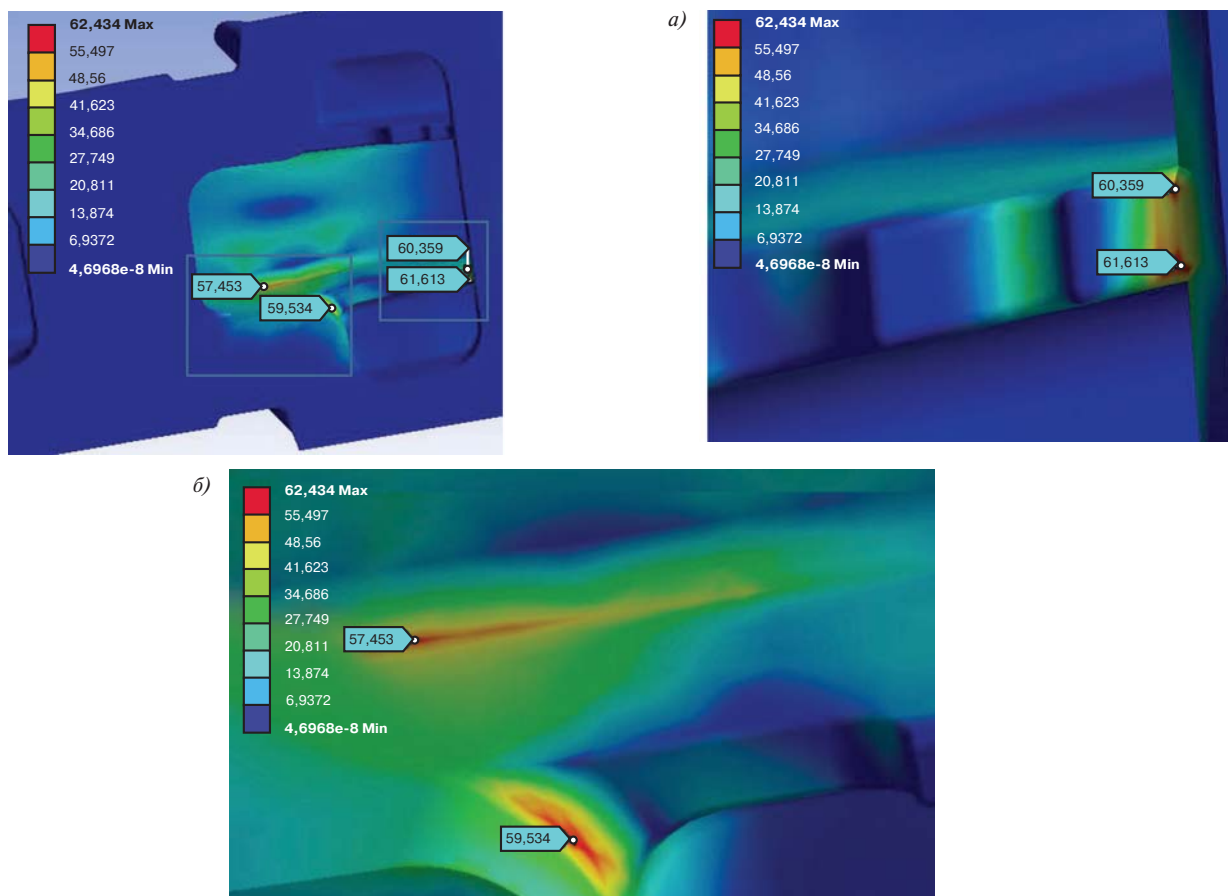


Рис. 8. Поле эквивалентных напряжений в первой опасной зоне для второй модели конструкции, МПа:
 а — правый выделенный фрагмент (увеличен); б — левый фрагмент (увеличен)

Fig. 8. Equivalent stress field in the first danger zone for the second design model, MPa:
 а — right selected fragment (enlarged); б — left fragment (enlarged)

Принимая во внимание отличие в 2,3 раза коэффициента запаса по усталостной прочности между первой и второй зонами третьей модели конструкции,

а также его локальный характер, для увеличения коэффициента запаса в первой опасной зоне рекомендовано провести изменение конструкции путем

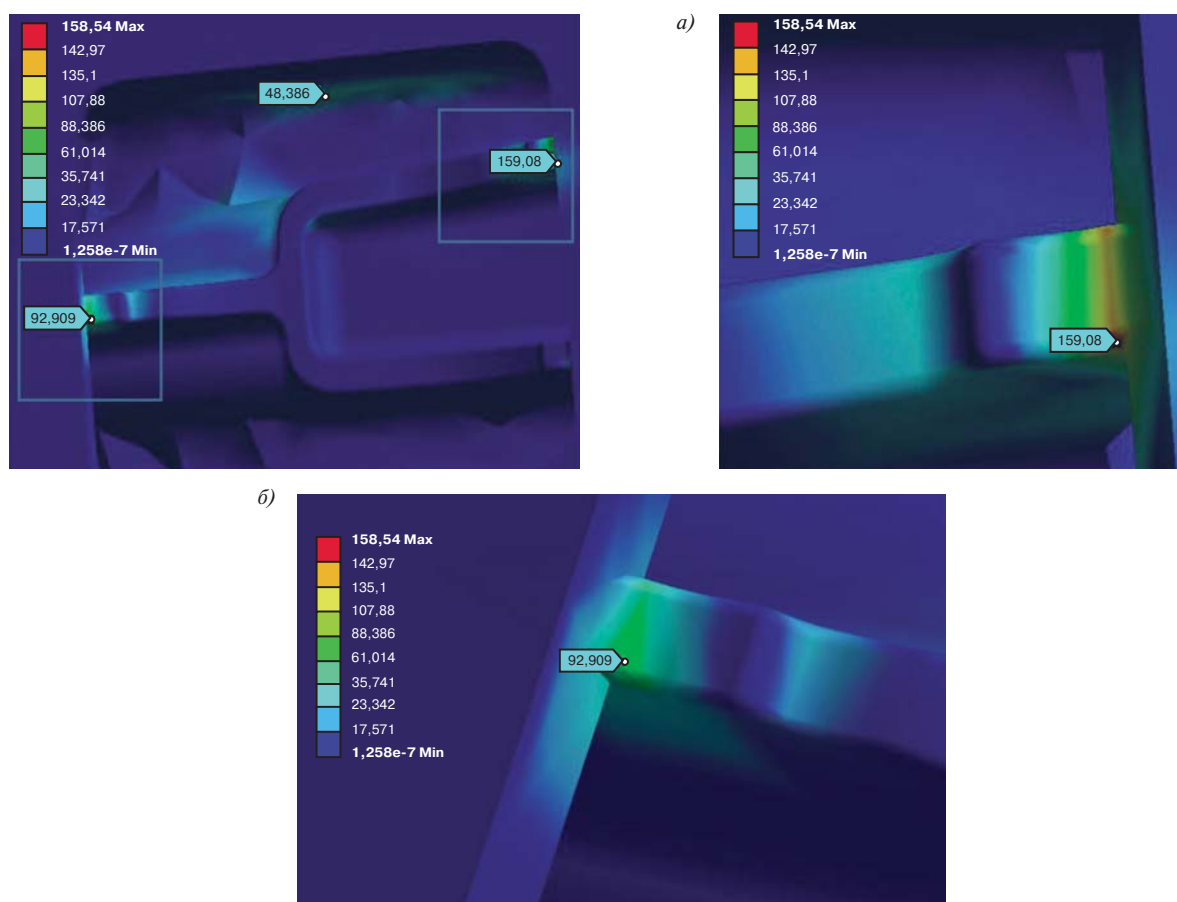


Рис. 9. Поле эквивалентных напряжений во второй опасной зоне для второй модели конструкции, МПа:
 а — правый выделенный фрагмент (увеличен); б — левый фрагмент (увеличен)

Fig. 9. Equivalent stress field in the second danger zone for the second design model, MPa:
 а — right selected fragment (enlarged); б — left fragment (enlarged)

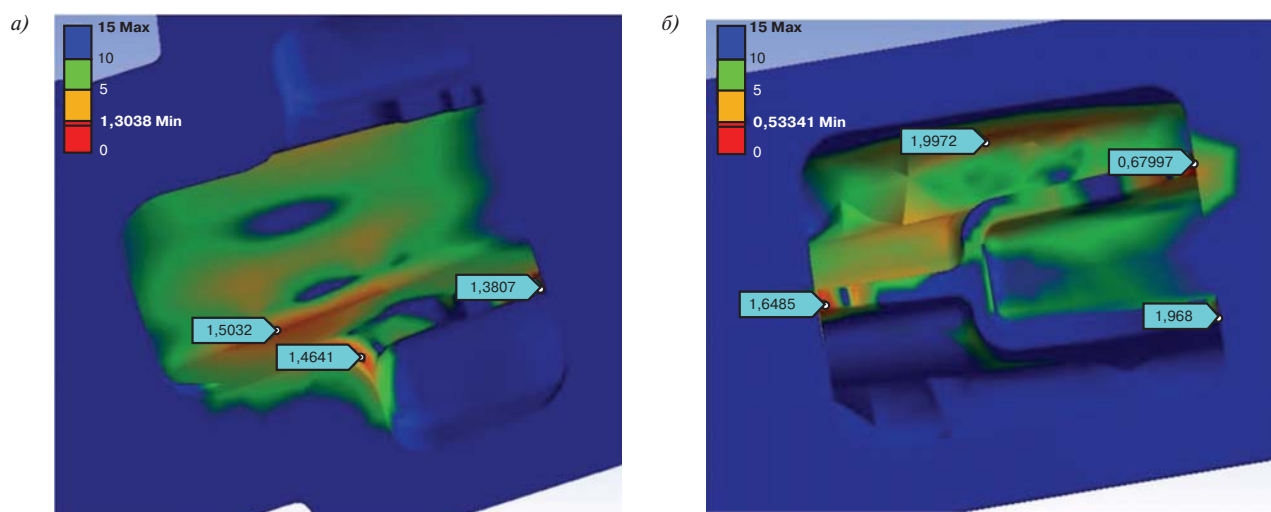


Рис. 10. Коэффициент запаса по усталостной прочности для второй модели конструкции:
 а — в первой опасной зоне; б — во второй опасной зоне

Fig. 10. Fatigue safety factor for the second design model:
 а — in the first danger zone; б — in the second danger zone

Таблица 2
Результаты расчета для моделей 1–3

Table 2

Calculation results for models 1–3

Модель конструкции	Эквивалентные напряжения max, МПа		Коэффициент запаса по усталостной прочности, min	
	Первая зона	Вторая зона	Первая зона	Вторая зона
1	376	221	0,36	0,46
2	62	159	1,38	1,63
3	58	81	2,02	4,73

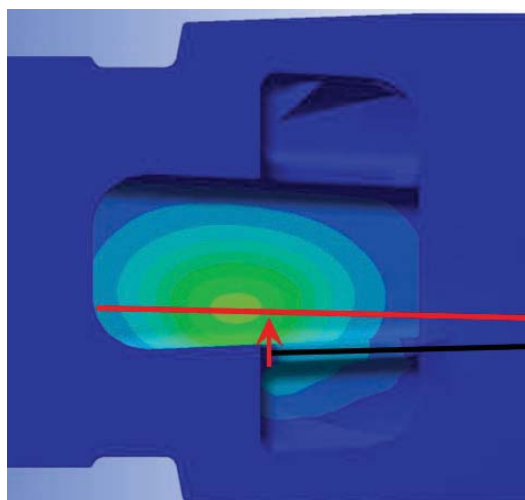


Рис. 11. Рекомендуемое место расположения ребра жесткости относительно зоны контакта колеса с поверхностью катания крестовины (третья модель конструкции, вид снизу отливки)

Fig. 11. Recommended location of the stiffener in relation to the contact area of the wheel with the crossing rolling surface (third design model, view from below the casting)

смещения существующего ребра жесткости в сторону области контакта колеса с поверхностью катания крестовины, как показано на рис. 11, или введения дополнительного элемента жесткости. Данное решение позволит усилить конструкцию крестовины, повысить ее долговечность и безотказность работы.

После усиления конструкции крестовины третьей модели расчетный уровень эквивалентных напряжений снизился до 47 МПа, а коэффициент запаса по усталостной прочности увеличился до 4,18.

По разработанным с помощью моделирования конструкциям крестовин изготовлены опытные образцы. Результаты математического моделирования были проверены в эксплуатационных испытаниях.

Эксплуатационные испытания моноблочных крестовин. Испытания проходили в составе модернизированного стрелочного перевода типа Р65 марки 1/11 проекта Н01.001 при установленных скоростях движения по прямому и боковому путям 80 и 40 км/ч соответственно, максимальные статические нагрузки на ось подвижного состава не превышали 25 т.

При проведении эксплуатационных испытаний моноблочных крестовин ширина колеи и желобов на стрелочных переводах находилась в пределах регламентируемых норм и допусков, отклонений критического расстояния между элементами крестовины и контрольного узла, превышающих установленные нормы, не отмечено. Отказов в работе креплений за время проведения испытаний не наблюдалось.

Крестовина первой конструкции эксплуатировалась на месте стрелочного перевода № 111 на втором главном пути Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» и вышла из строя, пропустив 86,4 млн т брутто груза, из-за трещин литой части цельнолитого блока моноблочной крестовины в районе улавливающего желоба и переднего вылета (рис. 12, 13). На момент изъятия



Рис. 12. Трещины литой части цельнолитого блока моноблочной крестовины в районе улавливающего желоба:
a — вид слева; б — вид справа

Fig. 12. Cracks in the cast part of the solid block of the monoblock crossing in the area of the catch chute:
a — left side view; б — right side view



Рис. 13. Трещина в районе переднего вылета цельнолитого блока моноблочной крестовины

Fig. 13. Crack in the area of the front outrigger of the solid block of the monoblock crossing

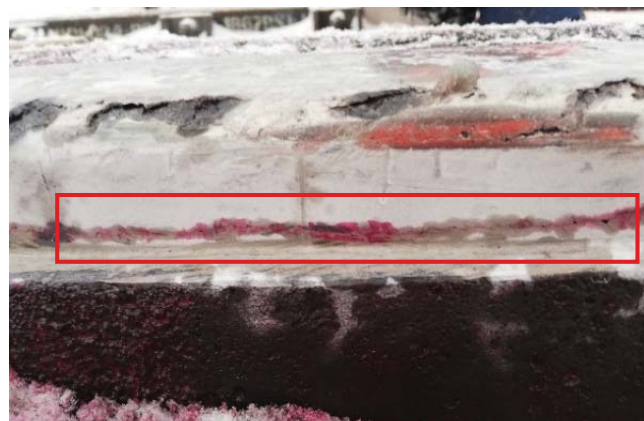


Рис. 14. Результат проверки трещины методом цветной дефектоскопии, подозрение на дефект ДС.30Г.2

Fig. 14. Result of crack inspection by means of colour defectoscopy, suspected defect DS.30G.2

износ элементов поверхности катания находился в пределах 1 мм.

Крестовины второй и третьей конструкции эксплуатировались на станции Исилькуль Западно-Сибирской железной дороги на переводах № 5 и 35 соответственно. На момент проведения испытаний грузонапряженность участка, на котором расположены данные стрелочные переводы, составляла до 186,7 млн т-км брутто на км в год.

После пропуска груза в 235,6 млн т брутто была выявлена продольная горизонтальная трещина литой части сердечника в районе первой опасной зоны, подозрение на дефект по коду ДС.30Г.2 (рис. 14).

Износ литых усювиков по прямому и боковому направлениям составил 4,4 и 2,1 мм соответственно. Износ клина сердечника в сечении шириной 40 мм — 3,8 мм. На поверхности клина имелись выкрашивания по коду дефекта ДС.13.2 глубиной до 1,6 мм.

Опытный образец крестовины третьей конструкции был изъят из эксплуатации по причине износа. Трещин в теле крестовины не выявлено. В процессе эксплуатации на крестовине также выявлялись дефекты по коду ДС.13.2.

В ходе эксплуатационных испытаний было отмечено, что моноблочные крестовины из-за конструктивных особенностей в меньшей степени склонны к образованию дефектов по кодам ДУ.13.2 и ДУ.14.2. Картина распределения эквивалентных напряжений и коэффициента запаса по усталостной прочности для крестовин первой и второй конструкции соответствует характеру их разрушения в процессе эксплуатации.

Исследования образцов металла, вырезанных из отливок крестовин первой и второй конструкции, показали отсутствие литейного характера образования

выявленных дефектов [13]. Очевидно, что причиной образования трещин при эксплуатации моноблочных крестовин являлись недостатки конструкций.

Результаты расчетов и подтвердивших их испытаний показали, что конструкцию моноблока следует проектировать на основе третьего варианта, рассмотренного в исследовании. Окончательная геометрия моноблока была доработана с учетом возможности получения бездефектной отливки и технологичности изготовления. Разработанная конструкция моноблочных крестовин принята к серийному производству.

Заключение. Результаты расчетов и эксплуатационных испытаний показали, что рассматриваемые в работе геометрии ребер жесткости моноблочных крестовин оказывают значительное влияние на картину распределения и величины напряжений, а также на надежность всего изделия. Конструкция моноблочной крестовины со сдвоенными продольными ребрами жесткости по третьей модели расположения показала наименьшие эквивалентные напряжения, что позволило исключить возникновение опасных отказов при работе изделия.

Представленный способ определения прочности конструкции крестовин с цельнолитым блоком сердечника с усювиками и приварными рельсовыми окончаниями может быть использован при проектировании аналогичных конструкций. Это позволит значительно сократить время разработки и постановки на производство моноблочных крестовин. Кроме того, даст возможность исключить затраты на разработку и изготовление литейной оснастки, а также на проведение испытаний опытных образцов моноблочных крестовин, не отвечающих предъявляемым к ним требованиям по надежности конструкции.

Благодарности: автор выражает благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the author expresses his gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

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 и не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Новый стрелочный перевод типа Р65 марки 1/22 для высокоскоростного движения / М. Е. Березовский [и др.] // Студент — инновации России. 2017. № 2. С. 29–35 [Berezovskiy M. E., Tregubchak P. V., Tsittser I. V., Korolev V. V. New switch of P65 type and 1/22 make for high-speed traffic. *Student — innovatsii Rossii*. 2017;(2):29–35. (In Russ.)].
2. Глюзберг Б. Э. Разработка и внедрение новых конструкций стрелочных переводов // Железнодорожный транспорт. 2012. № 3. С. 31–36 [Gluzberg B. E. Development and implementation of new automatic switch designs. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2012;(3):31–36 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/oxvrtf>.
3. Глюзберг Б. Э., Королев В. В., Шишкина И. В. Увеличение ресурса крестовин стрелочных переводов // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: XV Междунар. науч.-техн. конф.: чтения, посвященные памяти проф. Г. М. Шахунянца, Москва, 4–5 апреля 2018 г.: тр. М.: РУТ, 2018. С. 186–187 [Gluzberg B. E., Korolev V. V., Shishkina I. V. Increasing the life of simple switch crossings. In: *Modern problems of railway design, construction and operation: XV International Scientific-Technical Conference: readings in memory of Prof. G. M. Shakhunyan, Moscow, 4–5 April 2018: proc.* Moscow: RUT; 2018. p. 186–187. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/hhkygj>.
4. Королев В. В. Совершенствование системы учета дефектов элементов стрелочных переводов // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 7. С. 14–16 [Korolev V. V. Improvement of the simple switch defect accounting system. *Railway Track and Facilities*. 2016;(7):14–16 (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/whctbd>.
5. Глюзберг Б. Э. Модернизация и совершенствование стрелочных переводов // Железнодорожный транспорт. 2015. № 7. С. 54–57 [Gluzberg B. E. Modernising and improving simple switches. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2015;(7):54–57 (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/udlfpf>.
6. Глюзберг Б. Э. Проблемы стрелочного хозяйства высокоскоростной железнодорожной магистрали ВСЖМ-1 // Транспортное строительство: сб. ст. Второй Всерос. науч.-техн. конф., Москва, 12–14 апреля 2021 г. М.: Перо, 2021. С. 14–22 [Gluzberg B. E. Problems of switch management of the high-speed railway line VSZhM-1. In: *Transport Construction: Collection of article, Second All-Russian Scientific and Technical Conference, Moscow, 12–14 April 2021*. Moscow: Pero; 2021. p. 14–22. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/zzxzlj>.

7. Этапы проектирования технических средств инфраструктуры железных дорог / Б. Э. Глюзберг [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 2. С. 20–22 [Gluzberg B. E., Zverkova N. V., Korolev V. V., Shishkina I. V. Stages of railway technical infrastructure design. *Railway Track and Facilities*. 2018;(2):20–22. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/yqdyhc>.

8. Lee H.-H. *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 15*. Mission, Kansas: SDC Publications; 2014. 600 p.

9. Chen X., Liu Y. *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. 1st. ed. Boca Raton, Florida: CRC Press; 2014. 411 p. <https://doi.org/10.1201/b17284>.

10. Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. *Engineering Analysis with ANSYS Software*. 1st ed. Oxford, UK: Elsevier Butterworth-Heinemann; 2006. 453 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6875-0.X5030-3>.

11. Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко [и др.]; под общ. ред. А. С. Зубченко. 2-е изд. доп. и испр. М.: Машиностроение, 2003. 784 с. [Zubchenko A. S., Koloskov M. M., Kashirskiy Yu. V., Astakhov Yu. I., Gerasimov V. I., Golen'shina L. G., et al. *Handbook of steels and alloys*. 2nd revised and enlarged edition. Moscow: Mashinostroenie; 2003. 784 c. (In Russ.)].

12. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин [и др.]; под общ. ред. В. Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. 640 с. [Sorokin V. G., Volosnikova A. V., Vyatkin S. A., Gervas'ev M. A., Greditor M. A., Krylova K. M., et al. *Handbook of steels and alloys*. Moscow: Mashinostroenie; 1989. 640 c. (In Russ.)].

13. ГОСТ 7370–2015. Крестовины железнодорожные. Технические условия: дата введения 2016–07–01. М.: Стандартинформ, 2015. 66 с. [GOST 7370–2015. *Railway frogs. Specifications*. Introduction date 2016–07–01. Moscow: Standartinform; 2015. 66 p. (In Russ.)].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Павел Владимирович ТРЕГУБЧАК,

начальник отдела, отдел устройств верхнего строения пути и стрелочных переводов, научный центр «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 779415, <https://orcid.org/0009-0002-1097-9227>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pavel V. TREGUBCHAK,

Head of the Department, Department of Devices of the track superstructure and turnouts, Research Center for Railway Infrastructure and Issues of Wheel – Rail Interaction, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 779415, <https://orcid.org/0009-0002-1097-9227>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

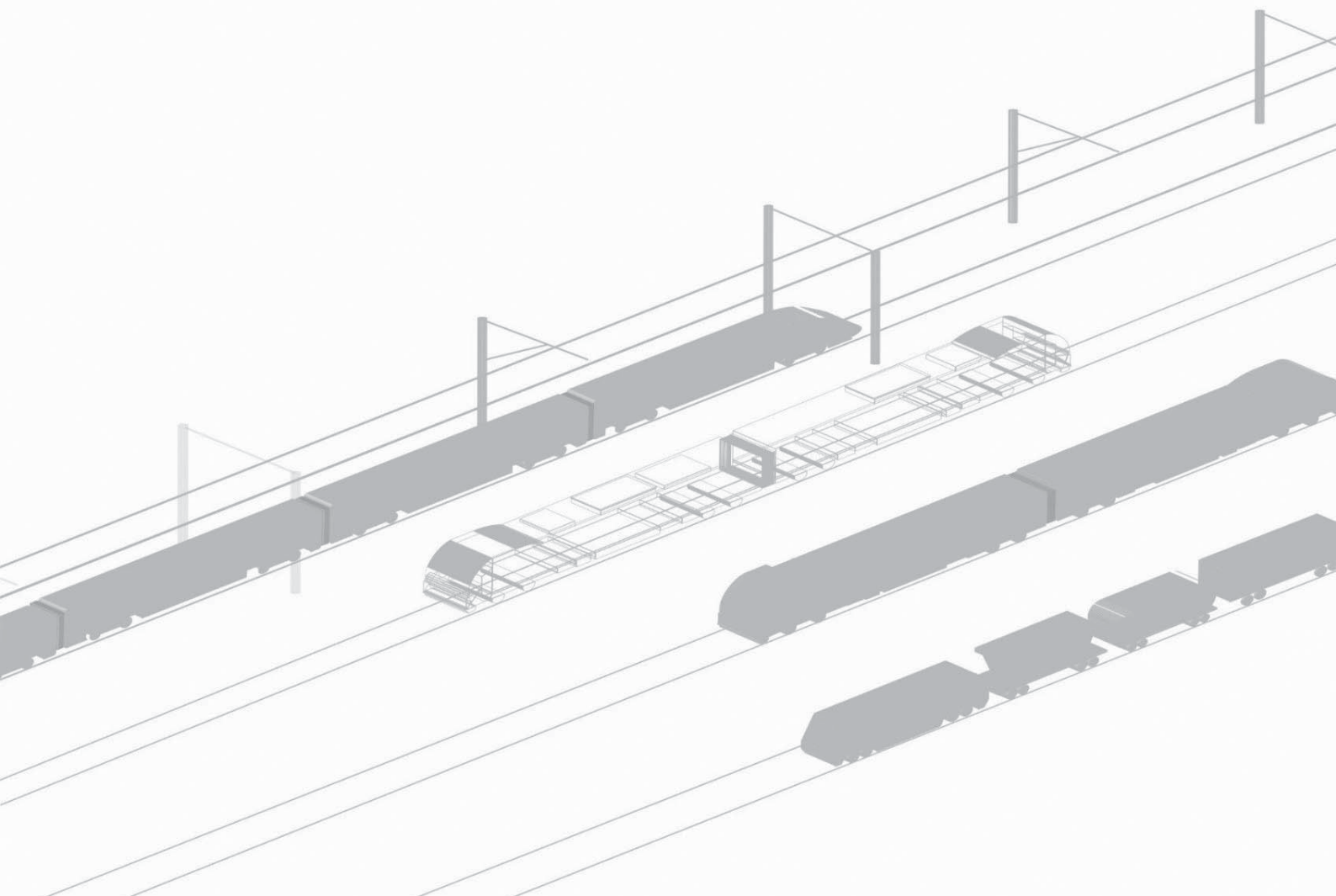
The author has read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 16.03.2023, рецензия от первого рецензента получена 21.04.2023, рецензия от второго рецензента получена 24.04.2023, принята к публикации 17.05.2023.

The article was submitted 16.03.2023, first review received 21.04.2023, second review received 24.04.2023, accepted for publication 17.05.2023.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL
PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT





АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Оригинальная статья

УДК 656.222.6

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-158-167>

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



Нейросетевой подход к изучению функционирования системы курсирования кольцевых маршрутных поездов

А. Л. Казаков^{1, 2}, Р. Ю. Упырь¹, А. Д. Доможирова¹✉

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

²Институт динамики систем и теории управления
им. В. М. Матросова СО РАН,
Иркутск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследуется участок курсирования кольцевых маршрутных поездов. Приведены подробное описание и характеристика участка, на их основе он отнесен к человеко-машинным и трудноформализуемым системам. Исследование устойчивости такого рода транспортных объектов не может быть осуществлено с использованием известных критериев и методов. Целью работы стала разработка нового подхода к оценке устойчивости функционирования системы курсирования кольцевых маршрутных поездов, который учитывает особенности и специфику объекта исследования.

Материалы и методы. В статье предлагается для оценки устойчивости курсирования кольцевых маршрутных поездов использовать нейросетевой подход. В качестве исходных данных используется временной ряд изменения грузопотока на участке обращения кольцевых маршрутных поездов, являющийся главным эксплуатационным показателем исследуемой системы. Для моделирования выбран метод искусственной нейронной сети как простой и эффективный инструмент изучения рассматриваемой системы со значениями грузопотока, имеющими случайный характер.

Результаты. Описан подход, основанный на использовании производительности нейронной сети. Данный показатель отражает соответствие результатов моделирования с фактическими данными и позволяет оценить качество модели.

Обсуждение и заключение. Представленный подход может использоваться для оценки устойчивости системы курсирования кольцевых маршрутных поездов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: транспортная система, человеко-машинная система, трудноформализуемая система, нейронная сеть, моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Казаков А. Л., Упырь Р. Ю., Доможирова А. Д. Нейросетевой подход к изучению функционирования системы курсирования кольцевых маршрутных поездов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 2. С. 158–167. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-158-167>.

✉ domojirova.a@gmail.com (А. Д. Доможирова)

© Казаков А. Л., Упырь Р. Ю., Доможирова А. Д., 2023



AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 656.222.6

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-158-167>

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



Neuronal network approach to study the operation of shuttle-service trains

Alexander L. Kazakov^{1, 2}, Roman Yu. Upyr¹, Alena D. Domojrova¹✉

¹Irkutsk State University of Railway Transport,
Irkutsk, Russian Federation

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

ABSTRACT

Introduction. The authors study the section of the shuttle-service trains. Based on a detailed description and characterisation of the site, it is categorised as a man-machine and difficult-to-formalise system. It is not possible to study stability of such transport facilities using known criteria and methods. This study aimed at developing a new approach for assessing sustainability of a shuttle-service train system, taking account of its specific features and characteristics.

Materials and methods. The paper proposes the use of a neural network approach to assess the sustainability of shuttle-service trains. The input data used is a time series of freight flow on a section of the shuttle-service trains, which is the main operational indicator of the system under study. The method of artificial neural networks is chosen for modelling because it is a simple and effective tool for studying the system in question, with the values of the freight flow having a random character.

Results. An approach based on the power of neural networks is described. This indicator enables to assess quality of the model by reflecting the consistency of model results with actual data.

Discussion and conclusion. The approach presented may be used to assess the sustainability of a shuttle-service train system.

KEYWORDS: transport system, man-machine system, difficult-to-formalise system, neural network, modeling

FOR CITATION: Kazakov A. L., Upyr A. D., Domojrova A. D. Neuronal network approach to study the operation of shuttle-service trains. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(2):158-167. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-158-167>.

✉ domojrova.a@gmail.com (A. D. Domojrova)

© Kazakov A. L., Upyr A. D., Domojrova A. D., 2023

Введение. Кольцевые маршрутные поезда — это поезда, проходящие не менее одной технической станции без обработки с постоянным составом от станции погрузки до станции выгрузки и обратно. Такая организация поездопотока целесообразна и экономически эффективна при стабильных объемах погрузки на станциях отправления груженого маршрута [1].

Курсирование кольцевых маршрутных поездов осуществляется на участке, в пределах которого обращаются постоянные составы, с одной или несколькими станциями погрузки и выгрузки, оснащенными погрузо-разгрузочными средствами и складами. Продолжительность оборота составов строго регламентируется посредством составления расписания. В рамках участка устанавливается весовая норма маршрутного поезда. Организацию движения осуществляет оперативно-диспетчерский персонал (поездной диспетчер, дежурные по станции), управление тягой поездов выполняют локомотивные бригады, работники грузовых комплексов координируют грузовые операции [2]. Данное описание подпадает под определение технологической системы [3].

Средствами технологического оснащения участка курсирования кольцевых маршрутных поездов являются главные пути, путевое развитие станций погрузки-выгрузки, грузовые устройства, устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) и связи [4]; предметами производства — порожние и груженные составы кольцевых маршрутных поездов, груз, загружаемый или выгружаемый из вагонов [5]; исполнителями — дежурные по станции, поездной диспетчер, составители поездов, работники пунктов технического осмотра, приемосдатчики груза и багажа, локомотивные бригады, работники грузовых объектов и др. [6].

Процесс курсирования кольцевых маршрутных поездов подвержен негативным воздействиям случайного характера (отказы технических средств, несвоевременная явка локомотивной бригады, технологические нарушения оперативно-диспетчерского персонала), которые могут в той или иной степени отклонить его параметры от нормативных значений (отправление поезда с опозданием, отправление неполновесного состава поезда), однако по прошествии некоторого времени исследуемый транспортный объект способен вернуться к нормальному функционированию с нормативными параметрами: поезд, отправившийся с опозданием, за счет нагона вернется к движению по расписанию; вышедшие из строя погрузочно-разгрузочные устройства после ремонта приводятся к работоспособному состоянию; невыполненное в сутках задание по размеру грузопотока реализуется на следующий день и т. д. При этом участие в производственном процессе не только средств

технологического оснащения и предметов производства, но и исполнителей не позволяет использовать для оценки устойчивости методы и подходы, применяемые к обычным техническим системам (например, системам автоматического регулирования). В работе [7] системы, в которых элементами являются исполнители, называются трудноформализуемыми. Это объясняется сложностью использования фундаментальных математических и физических законов в описании внешних и внутренних связей, а также моделирования процессов их функционирования из-за наличия человеческого фактора, который чрезвычайно усложняет моделирование. Таким образом, отнесем исследуемую систему к классу трудноформализуемых, требующих применения специальных методов исследования [8]. Целью работы является разработка нового подхода к оценке устойчивости функционирования на основе методов математического и компьютерного моделирования.

В качестве модельного инструментария выбрана искусственная нейронная сеть, которая позволяет получить данные за счет генерации значений посредством симуляции. Искусственная нейронная сеть является наиболее простым и доступным инструментом для исследования изменения величины грузопотока, который меняет величину случайным образом. Именно в простоте и удобстве заключается главное преимущество нейронных сетей по сравнению с моделями в виде случайных процессов [9].

Постановка задачи. Состав кольцевого маршрутного поезда может изменять свой вес при операциях погрузки или выгрузки. В другие промежутки времени его вес постоянен: при следовании от станции погрузки и обратно, при нахождении под техническими и коммерческими операциями. Технологией работы участка обращения кольцевых маршрутов предусмотрены расписание, которое должно соблюдаться при выполнении всех операций и следовании по участку, и вес поезда, установленный нормативными документами. Опишем математически работу системы, согласно приведенным выше условиям. Функцию, характеризующую работу системы, представим в виде

$$f(t) = \begin{cases} at; & 0 \leq t \leq t_1; \\ Q; & t_1 < t \leq t_2; \\ -kt + b; & t_2 < t \leq t_3; \\ 0; & t_3 < t \leq T; \end{cases} \quad a > 0; b > 0; k > 0, \quad (1)$$

где $0 \leq t \leq t_1$ — время на погрузку состава маршрутного поезда; $t_1 < t \leq t_2$ — время на техническую обработку состава после погрузки, прицепку поездного локомотива, торможение, время следования маршрутного поезда от станции погрузки до станции выгрузки;

$t_2 < t \leq t_3$ — время на выгрузку состава маршрутного поезда; $t_3 < t \leq T$ — время на техническую обработку состава после выгрузки, прицепку поездного локомотива, торможение, время следования маршрутного поезда от станции выгрузки до станции погрузки; Q — вес маршрутного поезда, установленный для участка курсирования; T — время, в течение которого производятся повторяющиеся операции четырех промежутков кусочно-линейной функции [10].

Константы a , k и b определяются по формулам

$$a = \frac{Q}{t_1}; \quad k = \frac{Q}{t_3 - t_2}; \quad b = \frac{Q - t_3}{t_3 - t_2}. \quad (2)$$

График функции $f(t)$ представлен на рис. 1.

Задачей, которую необходимо решить для достижения цели данного исследования, является разработка нейросетевого подхода, позволяющего оценить устойчивость функционирования рассматриваемой системы. Это важно для проведения своевременных мероприятий по минимизации эксплуатационных и экономических потерь при возникновении сбоев в курсировании кольцевых маршрутных поездов, что в целом позволит повысить эффективность организации перевозок на железнодорожном участке.

Материалы и методы. В работе [11] авторами была представлена структурная модель технологической системы грузовой станции, в которую вошли технологические модули (технологические линии) работы станции: погрузка-выгрузка вагонов, обработка составов по прибытии-отправлению, подача-уборка вагонов и др. Каждый из модулей содержит предмет производства, средства технологического оснащения и исполнителей. Применим подход, предложенный в [11]. Выделим следующие модули структурной модели системы курсирования кольцевых маршрутных поездов:

- первый модуль — погрузка состава маршрутного поезда;
- второй модуль — обработка груженого состава (техническое и коммерческое обслуживание), прицепка локомотива, перестановка на пути отправления и др.;
- третий модуль — следование маршрутного поезда с груженым составом;
- четвертый модуль — обработка поезда с груженым составом по прибытии, перестановка на выгрузочные пути;
- пятый модуль — выгрузка состава маршрутного поезда;
- шестой модуль — обработка порожнего состава (техническое и коммерческое обслуживание), прицепка локомотива, перестановка на пути отправления и др.;

• седьмой модуль — следование маршрутного поезда с порожним составом;

• восьмой модуль — обработка поезда с порожним составом по прибытии, перестановка на погрузочные пути.

Операции, осуществляемые в рамках описанных модулей, производятся в течение четырех промежутков времени кусочно-линейной функции (1): первый модуль — в первом интервале; второй, третий и четвертый — во втором; пятый — в третьем; шестой, седьмой и восьмой — в четвертом.

Вероятность устойчивого функционирования модулей технологической системы определяется зависимостью [11]:

$$P_i(t) = P_{i1}(t)P_{i2}(t)P_{i3}(t), \quad (3)$$

где $P_{i1}(t)$ — вероятность устойчивого функционирования средств технологического оснащения; $i = 1, 2, \dots, k$ — номер модуля; $P_{i2}(t)$ — вероятность устойчивого функционирования предмета производства; $P_{i3}(t)$ — вероятность устойчивого функционирования исполнителя.

Для того чтобы дать оценку устойчивости системы в целом, необходимо оценить устойчивость каждого модуля [12], которая, в свою очередь, определяется совокупностью устойчивостей функционирования его составляющих: предмета производства, средств технологического оснащения и исполнителей. В данном исследовании рассмотрим предмет производства третьего модуля — величину грузопотока на участке курсирования кольцевых маршрутных поездов — и проанализируем его устойчивость. Для оценки последней будем использовать показатели производительности нейросетей, характеризующие степень соответствия между данными, полученными в ходе моделирования, и фактическими и являющиеся в данном случае аналогом вероятности устойчивого функционирования. Исходным материалом для построения моделей будут

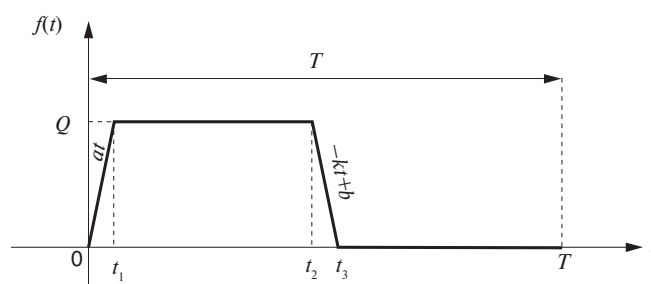


Рис. 1. Изменение веса состава Q в рамках системы курсирования кольцевых маршрутных поездов

Fig. 1. Variation of train weight Q with in a shuttle-service train system

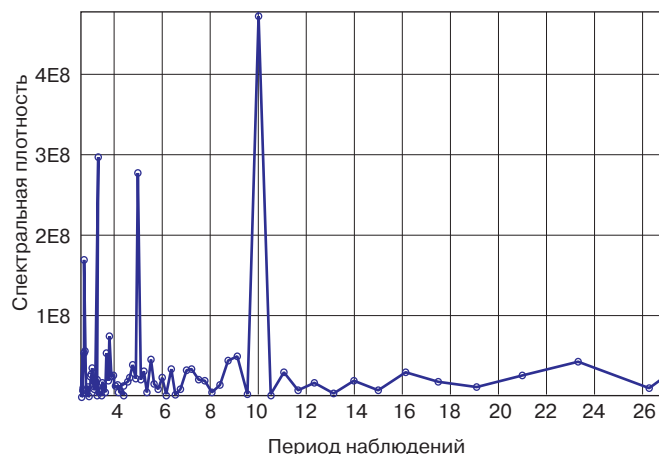


Рис. 2. Периодограмма колебаний грузопотока на участке А

Fig. 2. Periodogram of freight flow variations on section A

Таблица 1

Значения производительности построенных нейронных сетей

Table 1

Neural network performance values

№ п/п	Нейросеть	Производительность
1	MLP 10-2-1	0,48
2	MLP 10-8-1	0,72
3	MLP 10-11-1	0,69

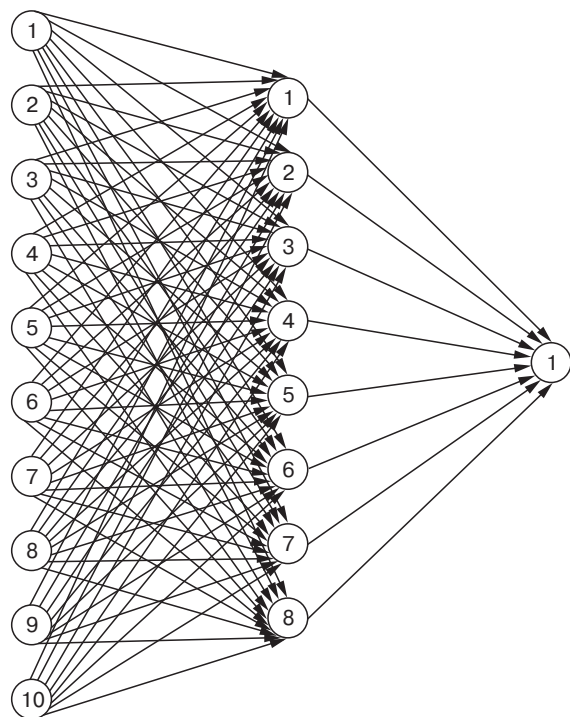


Рис. 3. Архитектура нейросети MLP 10-8-1

Fig. 3. Neural network architecture MLP 10-8-1

служить данные временного ряда о величине грузопотока участка курсирования кольцевых маршрутных поездов.

Построение модели. При построении нейросетевой модели сначала необходимо определить период наблюдений — количество нейронов входного слоя, далее следует ввести исходные данные временного ряда грузопотока, на заключительном этапе выполняется построение нейросетей с помощью программного пакета STATISTICA с последующим анализом результатов.

Для определения периода наблюдений — количества нейронов входного слоя — проведем спектральный одномерный анализ Фурье и построим периодограмму [13]. На периодограмме точка, в которой достигается наибольшее значение спектральной плотности, — это период наблюдений, в данном случае период равен 10 (рис. 2). Величины на осях являются безразмерными.

С помощью программного пакета STATISTICA был произведен спектральный анализ колебаний величин грузопотоков, построены нейронные сети и выполнен их сравнительный анализ (табл. 1). Построение нейронных сетей необходимо для получения значений производительности моделей и показателя, отражающего соответствие результатов моделирования фактическим данным.

Существуют следующие показатели, использующиеся для оценки адекватности нейросетевой модели: производительность обучения, ошибка обучения, контрольная ошибка, тестовая ошибка и др. Для оценки выбрана производительность обучения нейросети, поскольку она отражает степень совпадения фактических данных с полученными с учетом ошибок. Данный показатель характеризуется коэффициентом детерминации, определяемым по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2}, \quad (4)$$

где σ^2 — дисперсия случайной величины y ; σ_y^2 — дисперсия ошибки модели.

Архитектура нейронной сети с наибольшей производительностью представлена на рис. 3.

На рис. 4 представлено графическое изображение фактических и полученных нейросетями значений грузопотока.

У каждой из нейросетей имеются свои достоинства. Так, график, построенный на основе значений нейросети MLP 10-2-1, характеризуется наименьшей амплитудой колебаний грузопотока. Нейросетевые данные MLP 10-11-1 содержат пиковые значения, которые наиболее близки фактическим экстремумам. Тем не менее для прогнозирования будем использовать MLP 10-8-1, так как эта нейросеть обладает самой высокой производительностью (табл. 1).

Вычислительный эксперимент. Объектом исследования является однопутный железнодорожный участок А—Б, в границах которого курсируют 5 пар кольцевых маршрутных поездов: 5 порожних и 5 груженых. Станция А является станцией выгрузки, станция Б — погрузки. Поезда обращаются от станции А до станции Б и обратно в соответствии с расписанием, в которое заложено время следования от станции А до станции Б и обратно, обработка составов (отцепка локомотива от привезенного порожнего или груженого состава, переезд и прицепка к составу, торможение).

Каждый из пяти груженых поездов состоит из 40–45 вагонов, вес поезда 2400–2700 т. В сутки нормативный суммарный вес пяти поездов составляет 12 000–13 500 т. На исследуемом участке не всегда удается достичь установленного суммарного веса поездов по следующим причинам:

- срыв погрузки на станции Б (ввиду неисправности погрузочных средств, отсутствия груза);
- прибытие маршрута на станцию А или Б с опозданием (опоздание не позволяет отправиться груженому маршруту по расписанию, из-за чего оперативно-диспетчерский персонал принимает решение об отправлении локомотива резервом — без вагонов);
- отказы технических средств (неисправности локомотива, вагонов, устройств СЦБ и др.).

Колебания грузопотока на рассматриваемом участке имеют значительный размах (рис. 5).

На станции Б добавим 40 резервных вагонов, из которых состоит один маршрутный поезд, что

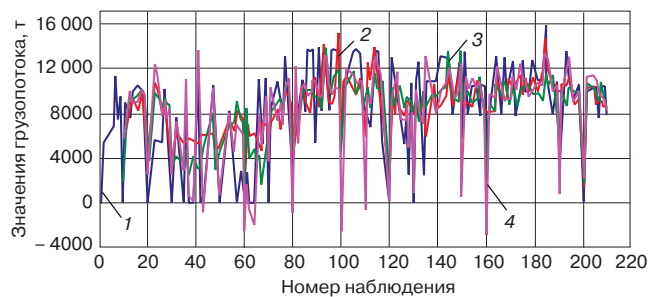


Рис. 4. Графики фактических и полученных нейросетью значений грузопотока:

1 — фактические значения; 2 — MLP 10-2-1;
3 — MLP 10-8-1; 4 — MLP 10-11-1

Fig. 4. Graphs of actual and neural network derived freight flow values:

1 — actual values; 2 — MLP 10-2-1;
3 — MLP 10-8-1; 4 — MLP 10-11-1

позволяет в случае неготовности груженого состава отправить поезд по расписанию, используя резерв. Увеличение парка вагонов возможно, к примеру, за счет аренды грузоотправителем дополнительного подвижного состава.

Данные о кольцевых маршрутных поездах участка Восточного полигона сведены в таблицу соотношения маршрутов с гружеными и порожними составами, по которой можно определить номер наблюдения (суток), в котором число груженых поездов меньше порожних. Фрагмент представлен в табл. 2.

Таблица 2

Соотношение груженых и порожних маршрутных поездов

Table 2

Ratio of loaded to empty shuttle-service trains

Номер суток	Номер груженого маршрутного поезда	Количество вагонов в поезде	Номер порожнего маршрутного поезда	Количество вагонов в поезде
1	3041	43	3046	44
	3045	45	3042	43
2	3049	40	3046	44
	3047	44	3048	43
	3041	44	3044	45
	3045	41	3010	41
3	3045	40	3044	34
	3043	34	3042	40
	3041	40	3046	44
	—	—	3048	40
4	3049	42	3042	40
	3047	42	3010	44
	3045	44	3046	42
	—	—	3044	42
5	3043	42	3010	44
	3041	42	3042	45
	3049	42	—	—



Рис. 5. Колебания величины грузопотока на участке курсирования кольцевых маршрутных поездов

Fig. 5. Variation in freight flow on a section of shuttle-service trains



Рис. 6. Колебания величины грузопотока на участке курсирования кольцевых маршрутных поездов после введения резерва вагонов

Fig. 6. Variation of the freight flow on the shuttle-service trains section after the introduction of the car reserve

В наблюдениях 3 и 4 имеет место прибытие локомотивов на станцию Б с порожними вагонами (четные номера поездов) и отправление локомотивов со станции Б без вагонов (в таблице отмечено «—»). Для обоих случаев (3 и 4) причиной этого явилась неисправность погрузочно-разгрузочных средств на станции Б, из-за которой к моменту прибытия порожнего маршрута грузовой состав не был готов. Именно для таких «срывов» отправления грузового маршрутного поезда целесообразно использовать резерв грузовых вагонов.

Из исследуемых 211 наблюдений, частично представленных в табл. 2, выберем 41, которые удовлетворяют приведенным выше условиям отправления резервного локомотива. К значениям грузопотока здесь добавлено 2400 т, что соответствует массе 40 грузовых резервных вагонов. График с измененными значениями грузопотока представлен на рис. 6.

Согласно [14], показатель устойчивости уровней временного ряда, а именно индекс устойчивости уровней динамического ряда, определяется по формуле

$$i_y = \frac{\bar{y}_{\text{благ}}}{\bar{y}_{\text{неблаг}}}, \quad (5)$$

где $\bar{y}_{\text{благ}}$ — средний уровень за благоприятные периоды (среднее значение, определяемое за периоды, когда величина грузопотока выше значений, описываемых уравнениями тренда); $\bar{y}_{\text{неблаг}}$ — средний уровень за неблагоприятные периоды (среднее значение, определяемое за периоды, когда величина грузопотока ниже значений, описываемых уравнениями тренда).

На основании сказанного примем, что стабильность отправления грузовых маршрутных поездов возможно повысить за счет введения резервных вагонов на станции погрузки.

Для подтверждения состоятельности подхода проверим, повысится ли производительность нейросети после корректировки исходных данных для ее построения. Для моделирования используем значения грузопотока, представленные на рис. 6. После построения новых нейросетей в программном пакете STATISTICA определим их производительность (см. табл. 3).

Можно увидеть, что самые высокие значения производительности нейросетей, построенных на фактических данных и на данных с применением резерва вагонов, отличаются до 10 %, что говорит об адекватности предложенного подхода.

Таблица 3

Значения производительности построенных нейронных сетей после введения резерва вагонов

Table 3

Performance of the constructed neural networks after the introduction of the car reserve

Номер варианта	Структура нейросети	Производительность по фактическим данным	Структура нейросети	Производительность после введения резерва вагонов
1	MLP 10-2-1	0,48	MLP 10-6-1	0,77
2	MLP 10-8-1	0,72	MLP 10-5-1	0,76
3	MLP 10-11-1	0,69	MLP 10-8-1	0,82

Заключение. Система курсирования кольцевых маршрутных поездов — трудноформализуемая система, требующая особых подходов при исследовании ее функционирования. Тем не менее оценка устойчивости для рассматриваемой системы осуществима. Для этого в качестве параметра, по которому возможно оценить устойчивость, выбран ключевой показатель работы исследуемого объекта — величина грузопотока.

В качестве инструмента моделирования выбраны искусственные нейронные сети, производительность которых определяет прогнозируемость изменений грузопотока и используется для оценки устойчивости работы изучаемой системы. Для подтверждения состоятельности подхода был проведен вычислительный эксперимент, при котором сглаживание колебаний достигнуто путем введения резерва вагонов на станции отправления груженых маршрутных поездов. Построенные на основе скорректированных данных, нейронные сети показали более высокие значения производительности (рост до 10 % по сравнению с исходными).

Как и всякий модельно-алгоритмический подход, предложенная здесь нейросетевая модель имеет свои ограничения. Так, она не учитывает величину нормативного веса составов кольцевых маршрутов, а опирается на фактические данные, которые часто имеют значения меньше нормы. Кроме того, значения грузопотока выше нормативного считаются как некие «выбросы» во временном ряду, за счет чего понижается значение производительности нейросети, хотя на производстве такие значения являются «благоприятными». В этой связи напрашивается разработка дополнительного критерия, который учитывал бы отклонения уровней колебаний величины грузопотока от нормативного значения. Это планируется сделать в ходе дальнейшей работы. Однако здесь неизбежно возникает фундаментальная проблема всех нейросетевых моделей — необходимость привлечения больших объемов данных для обучения и недостаточная гибкость подхода. Решить ее предполагается за счет более широкого применения математических методов.

При высокой производительности нейронных сетей (от 80 % и выше) допускается возможность использования полученных данных для прогноза, описания характера изменений значений временных рядов и определения порядковых номеров наблюдений с наибольшими пиковыми значениями в будущем. Прогнозные данные могут быть полезны для выявления предстоящих промежутков времени, в течение которых ожидаются пониженные значения грузопотока. Избежать этого возможно с помощью проведения профилактических мероприятий: усиленного

контроля за работой по управлению тяговыми ресурсами (обеспечение своевременной явки локомотивных бригад и выдачи локомотивов из депо под составы маршрутов), заблаговременно выполненной маневровой работы по перестановке локомотива, применения дополнительных мер по борьбе со смерзаемостью насыпных грузов в зимние месяцы, мероприятий по повышению надежности погрузо-выгрузочных устройств и др.

Информация об устойчивости транспортных систем важна для предотвращения выхода из равновесного состояния или минимизации эксплуатационных и экономических потерь за счет оперативной корректировки параметров.

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 ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Александров А. Э., Ковалев И. А. Построение автоматизированного процесса управления обращением кольцевых маршрутов // Транспорт Урала. 2007. № 1. С. 41–47 [Aleksandrov A. E., Kovalev I. A. Design of automated control process for circular routes. *Transport of the Urals*. 2007;(1):41-47. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/kdmkjz>.
2. Malovetskaya E. V., Bolshakov R. S., Dimov A. V., Byshlyago A. A. Planning of qualitative indexes of railroad operational work in polygon technologies. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 760: *International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans-2019)*, 12–15 November 2019, Moscow, Russian Federation. [S. l.]: IOP Publ.; 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/760/1/012041>.
3. ГОСТ 27.004-85. Надежность в технике. Системы технологические. Термины и определения: дата введения 1986-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1986. 15 с. [GOST 27.004-85. *Reliability in technology. Technological systems. Terms and definitions*. Introduction date 1986-07-01. Moscow: Standards Publishing House; 1986. 15 p. (In Russ.)].
4. Доможирова А. Д., Упырь Р. Ю. О влиянии задержек маршрутных поездов на восстановление графика движения поездов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 4 (72). С. 161–168 [Domozhirova A. D., Upyr R. Yu. On the influence of delays in route trains on the recovery of train graphics. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2021;(4):161-168. (In Russ.)]. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.4\(72\).161-168](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.4(72).161-168).
5. Александров А. Э., Тимухина Е. Н., Ковалев И. А. Оптимизационная модель перевозочного процесса с использованием кольцевых маршрутов // Транспорт Урала. 2017. № 4. С. 36–39 [Aleksandrov A. E., Timuhina E. N., Kovalev I. A. Optimization model of the transportation process with the use of unit trains. *Transport of*

the Urals. 2017;(4):36–39. (In Russ.)). <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2017-4-36-39>.

6. Апатцев В. И., Шаров В. А. К реализации комплексной программы поэтапного перехода на организацию движения грузовых поездов по расписанию на российских железных дорогах // Наука и техника транспорта. 2011. № 3. С. 69–72 [Apattsev V. I., Sharov V. A. To realization of the Comprehensive program of phased transition to the organization of freight trains operation according to schedule on Russian railways. *Science and Technology in Transport*. 2011;(3):69–72. (In Russ.)). EDN: <https://www.elibrary.ru/oeyyhl>.

7. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: идеи, методы, примеры. М.: Физматлит, 2002. 320 с. [Samarskiy A. A., Mikhaylov A. P. *Mathematical modeling: ideas, methods, examples*. Moscow: Fizmatlit; 2002. 320 p. (In Russ.)). EDN: <https://www.elibrary.ru/mvanqr>.

8. Токарев В. Л. Интегрированные системы поддержки принятия решений сложных трудноформализуемых задач (по прогнозированию, управлению и диагностике): автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.09. Тула, 2000. 48 с. [Tokarev V. L. *Integrated decision support systems for complex hard-to-formalizable tasks (for forecasting, control and diagnostics)*. Dr. Sci. (Eng.) thesis synopsis: 05.13.09. Tula; 2000. 48 p. (In Russ.)).

9. Bychkov I. V., Kazakov A. L., Lempert A. A., Bukharov D. S., Stolbov A. B. An intelligent management system for the development of a regional transport logistics infrastructure. *Automation and Remote Control*. 2016;77(2):332–343. <https://doi.org/10.1134/S0005117916020090>.

10. Доможирова А. Д., Упырь Р. Ю. Моделирование устойчивого состояния системы курсирования кольцевых маршрутных поездов // Железная дорога: путь в будущее: сб. материалов I Междунар. науч. конф. аспирантов и молодых ученых, Москва, 28–29 апреля 2022 г. М.: Науч.-исслед. ин-т ж.-д. транспорта, 2022. С. 305–308 [Domozhirova A. D., Upyr R. Yu. Modeling of the stable conditions of the circular main tracker shuttle system. In: *Railways: A Path to the Future: Proceedings of the I International Scientific Conference of Postgraduate and Young Scientists, 28–29 April 2022, Moscow*. Moscow: Railway Research Institute; 2022. p. 305–308. (In Russ.)). EDN: <https://www.elibrary.ru/iftmju>.

11. Апатцев В. И., Подорожкина А. В. Оценка технологической устойчивости функционирования грузовых станций // Наука и техника транспорта. 2007. № 1. С. 8–13 [Apattsev V. I., Podorozhkina A. V. On the estimation of technological stability of the freight terminal operation. *Science and Technology in Transport*. 2007;(1):8–13. (In Russ.)). EDN: <https://www.elibrary.ru/hznail>.

12. Подорожкина А. В. Методика комплексной оценки технологической устойчивости грузовой станции // Наука и техника транспорта. 2010. № 4. С. 13–18 [Podorozhkina A. V. Integrated estimation procedure of technological stability of freight station. *Science and Technology in Transport*. 2010;(4):13–18. (In Russ.)). EDN: <https://www.elibrary.ru/mwlbzx>.

13. Рыбин П. К., Горин Р. В. Метод оптимизации структуры нейронной сети для задачи планирования подвода поездов к предпортовым станциям // Вестник транспорта Поволжья. 2017. № 5. С. 55–63 [Rybin P. K., Gorin R. V. Method of optimizing of the neural network structure for planning train arrival at pre-port stations. *Vestnik transporta Povolzhya*. 2017;(5):55–63. (In Russ.)). EDN: <https://www.elibrary.ru/yqzjy>.

14. Афанасьев В. Н., Юзбашев М. М. Анализ временных рядов и прогнозирование: учеб. для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению и специальности «Статистика». М.: Финансы и статистика, 2001. 228 с. [Afanas'ev V. N., Yuzbashev M. M. *Time series analysis and forecasting*. Moscow: Finansy i statistika; 2001. 228 p. (In Russ.)). EDN: <https://www.elibrary.ru/gdhzgx>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Леонидович КАЗАКОВ,

д-р физ.-мат. наук, профессор, кафедра управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15); главный научный сотрудник, Институт динамики систем и теории управления им. В. М. Матросова СО РАН (664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 134), Author ID: 14911, <https://orcid.org/0000-0002-3047-1650>

Роман Юрьевич УПЫРЬ,

канд. техн. наук, заведующий кафедрой, кафедра управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15), Author ID: 518343, <https://orcid.org/0000-0001-5584-5105>

Алёна Дмитриевна ДОМОЖИРОВА,

аспирант, кафедра управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15), Author ID: 1039855, <https://orcid.org/0000-0002-3477-7788>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander L. KAZAKOV,

Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Department of Operations Management, Irkutsk State University of Railway Transport (664074, Irkutsk, 15, Chernyshevskogo St.); Chief Researcher, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of the Siberian Branch of the RAS (664033, Irkutsk, 134, Lermontov St.), Author ID: 14911, <https://orcid.org/0000-0002-3047-1650>

Roman Yu. UPYR,

Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, Department of Operations Management, Irkutsk State University of Railway Transport (664074, Irkutsk, 15, Chernyshevskogo St.), Author ID: 518343, <https://orcid.org/0000-0001-5584-5105>

Alena D. DOMOJIROVA,

Postgraduate, Department of Operations Management, Irkutsk State University of Railway Transport (664074, Irkutsk, 15, Chernyshevskogo St.), Author ID: 1039855, <https://orcid.org/0000-0002-3477-7788>

ВКЛАД АВТОРОВ

Александр Леонидович КАЗАКОВ. Определение и формирование направления исследования, формулировка цели, составление алгоритма исследования, подготовка и редактирование текста (40%).

Роман Юрьевич УПЫРЬ. Предложение и осуществление эксперимента, подтверждающего состоятельность предлагаемого подхода (20%).

Алёна Дмитриевна ДОМОЖИРОВА. Характеристика и описание функционирования системы курсирования кольцевых маршрутных поездов, разработка нейросетевой модели колебаний грузопотока, сравнительный анализ полученных результатов, выводы (40%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexander L. KAZAKOV. Definition and shaping of the areas of research, formulation of the objective, design of the research algorithm, preparation and editing of the paper (40%).

Roman Yu. UPYR. Proposal and implementation of an experiment to confirm the validity of the proposed approach (20%).

Alena D. DOMOJIROVA. Characterisation and description of the operation of a shuttle-service train system, development of a neural network model of freight flow variations, comparative analysis of the results, conclusions (40%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 02.02.2023, рецензия от первого рецензента получена 27.02.2023, рецензия от второго рецензента получена 27.03.2023, рецензия от третьего рецензента получена 29.03.2023, принята к публикации 14.04.2023.

The article was submitted 02.02.2023, first review received 27.02.2023, second review received 27.03.2023, third review received 29.03.2023, accepted for publication 14.04.2023.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

.....

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В АО «ВНИИЖТ»

Центр дополнительного образования (ЦДО) (лиц. № 2329 от 11.08.2016 г.) проводит повышение квалификации и профессиональную переподготовку слушателей по следующим направлениям:

- Анализ, моделирование бизнес-архитектуры и бизнес-процессов, использование процессного подхода в управлении организацией (для руководителей и специалистов)
- Проектирование, изготовление и приемка сварных конструкций железнодорожного подвижного состава, управление качеством в сварке рельсов, проведение аудита сварочного производства
- Построение энергосберегающих графиков движения поездов с использованием автоматизированной системы АПК ЭЛЬБРУС
- Изучение технологии транспортных процессов
- Транспортная логистика
- Изучение принципов построения и функционирования автоматизированной системы контроля за работой специального подвижного состава
- Изучение устройств, диагностики и средств контроля состояния железнодорожного пути
- Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт подвижного состава и устройств электроснабжения

Программы обучения могут быть разработаны по инициативе заказчика с учетом профессиональной деятельности АО «ВНИИЖТ».

Обучение проводится как в очной форме, так и с применением дистанционных образовательных технологий.

По итогам освоения образовательных программ слушателям выдается документ о квалификации государственного образца.

Куратор ЦДО — Пархаев Алексей Александрович, кандидат социологических наук, заместитель генерального директора по управлению персоналом и социальным вопросам.

По вопросам обучения обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская улица, д. 10
Центр дополнительного образования. Тел.: +7 (499) 260-41-08





АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Оригинальная статья

УДК 625.172:658.512

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-168-176>

EDN: <https://elibrary.ru/myqmh1>



Моделирование организации технологических процессов по содержанию геометрии рельсовой колеи

А. А. Севостьянов✉, Д. В. Величко

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС)
Новосибирск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рост грузонапряженности и осевой нагрузки на Восточном полигоне отражается как на состоянии железнодорожного пути, так и на сокращении доступного времени на его техническое обслуживание. Увеличение объемов работ вследствие деформативности пути в сложных условиях эксплуатации существенно усложняет процесс планирования и организации работ по текущему содержанию железнодорожного пути. Одним из основных факторов, влияющих на безопасность и бесперебойность движения поездов, является геометрия рельсовой колеи, нормативное состояние которой обеспечивается за счет проведения работ по текущему содержанию пути. В исследовании рассмотрен вопрос повышения эффективности организации работ по содержанию геометрии рельсовой колеи.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи использовались методы математического моделирования и статистики. Была построена модель организации технологических процессов на основе формализации процесса поступления объемов работ и их выполнения. Определение расчетных трудозатрат, необходимых для устранения выявленных отступлений, осуществлялось на основе результатов оценки состояния пути путеизмерительными средствами с учетом регламентированных норм времени на их устранение.

Результаты. Представлена математическая модель организации технологических процессов содержания геометрии рельсовой колеи, которая позволяет определять необходимый уровень ежедневных трудозатрат на линейном участке для выполнения полного объема работ в регламентирующие сроки, что позволит сократить время принятия решений при планировании работ.

Обсуждение и заключение. Использование данной модели позволит упростить процесс планирования и организации работ на линейном участке дистанции пути, что особенно актуально при высоком уровне неотложных и первоочередных работ на особо грузонапряженных участках. Дальнейшие исследования будут направлены на развитие математической модели, разработку программного продукта и внедрение в единую корпоративную автоматизированную систему управления инфраструктурой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный путь, геометрия рельсовой колеи, организация работ, планирование работ, математическая модель

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Севостьянов А. А., Величко Д. В. Моделирование организации технологических процессов по содержанию геометрии рельсовой колеи // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 2. С. 168–176. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-168-176>.

✉ seva2233@yandex.ru (А. А. Севостьянов)

© Севостьянов А. А., Величко Д. В., 2023

Original article

UDK 625.172:658.512

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-168-176>

EDN: <https://elibrary.ru/myqmh1>



Process organisation modelling for maintaining rail track geometry

Alexander A. Sevostyanov✉, Dmitriy V. Velichko

Siberian Transport University,
Novosibirsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The increase in freight traffic density and axial loads on the Eastern polygon is affecting the condition of the railway and reducing the time available for maintenance. The increased workload caused by track deformation in difficult operating conditions makes the planning and organisation of railway maintenance work much more difficult. One of the main factors affecting the safety and smooth running of trains is the geometry of the rail track, which is kept in a normal condition by track maintenance. The study examines the problem of increasing the efficiency of maintaining rail track geometry.

Materials and methods. Mathematical modelling and statistical methods were used to solve the problem. A process organisation model was created based on formalising the process of incoming and outgoing work. The estimated workload required to rectify the identified deviations was determined on the basis of the results of the track condition assessment using track measuring devices, taking into account the regulatory time standards for their rectification.

Results. The mathematical model for the process organisation of rail track geometry maintenance is presented, which allows to determine the necessary level of daily workload on a linear section to perform the full scope of works within the regulated terms, which would reduce the decision time during the planning of works.

Discussion and conclusion. The use of this model makes it possible to simplify the planning and organisation of work on a section of track, which is particularly important at a high level of urgent and high-priority work on particularly heavy-traffic sections. Further research would focus on the development of a mathematical model, the development of a software product and its implementation into a unified enterprise automated infrastructure management system.

KEYWORDS: railway track, rail track geometry, organisation of work, work planning, mathematical model

FOR CITATION: Sevostyanov A. A., Velichko D. V. Process organisation modelling for maintaining rail track geometry. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(2):168-176. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-2-168-176>.

Введение. В последние годы существенным образом увеличились объемы грузоперевозок на железнодорожном транспорте: к началу 2023 г. грузооборот составил 2635,7 млрд т·км, что на 31 % превышает показатели 2010 г. Стоит отметить, что наибольшая доля погрузки по сети ОАО «РЖД» приходится на каменный уголь, лидерство по объемам погрузки за 2022 г. сохраняется за Кузбассом. Вместе с тем, согласно Стратегии научно-технического развития холдинга «РЖД» [1], происходит увеличение объемов тяжеловесного движения из Кузбасса по основным направлениям. Так, к концу 2021 г. общий парк инновационных вагонов с повышенной нагрузкой на ось (25–27 т) на Западно-Сибирской дороге составлял уже более 30 % [2, с. 2].

Исследования показывают, что рост нагрузки на ось ускоряет накопление деформаций и изменений геометрии железнодорожного пути [3–5], а увеличение интенсивности движения поездов приводит к сокращению времени на проведение работ по текущему содержанию пути в межпоездной интервал [6].

Вопросы организации работ по содержанию геометрии рельсовой колеи (ГРК). Регламент организации работ по содержанию ГРК определяется нормативной документацией ОАО «РЖД» [7, 8], а планирование этих работ осуществляется в единой корпоративной автоматизированной системе управления объектами инфраструктуры (ЕК АСУИ), развитие которой непрерывно продолжается [9, 10]. Исследования в области планирования работ по техническому обслуживанию железнодорожного пути [11, 12] показывают, что повышение эффективности текущего содержания железнодорожного пути при современном уровне развития науки и техники является вполне разрешимой задачей. Внедрение цифровых двойников обеспечит повышение уровня планирования работ [11, 13, 14], но для адекватного взаимодействия с цифровыми двойниками необходимы отработанные алгоритмы и существенный объем данных, полученных по результатам диагностики и мониторинга объектов инфраструктуры. Тем не менее планирование и организация работ по содержанию ГРК на линейных участках до сих пор осуществляется на основе субъективных решений руководителей среднего звена. В Положении об организации комплексного обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений [8] предложено разделять работы на неотложные, первоочередные и плановые, но не приведен порядок категорирования планово-предупредительных работ по степени важности. Таким образом, планирование осуществляется на основании оперативных распоряжений и опыта дорожного мастера. При практическом применении методики планирования выявляются недостатки, которые не позволяют эффективно выстроить

систему организации производства путевых работ. К этому относятся как «барьерные места» [15], так и влияние человеческого фактора на корректность заполнения контрольных параметров в рабочих заданиях [16]. Отмечено, что существенную долю своего рабочего времени (до 25 %) дорожный мастер уделяет выполнению рутинных функций в системе ЕК АСУИ, что несомненно сказывается на результатах его работы по организации и контролю ремонта пути [16].

В результате проблем в организации и выполнении полного объема планово-предупредительных работ по содержанию ГРК не устраненные ранее отступления выявляются повторно и, соответственно, ведут к увеличению объема работ в следующем месяце.

На линейных участках дистанции пути существенный объем трудозатрат (свыше 40 %) приходится на содержание основных параметров ГРК в нормативном состоянии [17, 18], в частности на выполнение планово-предупредительных работ по регулировке ширины колеи и выправке пути в плане и профиле. Объем данных работ формируется на основе осмотров пути и в большей степени по результатам оценки состояния ГРК путеизмерительными средствами за счет выявления отступлений от нормативных параметров.

Следует учитывать, что подавляющая доля от выявляемых отступлений приходится на отступления II степени, устранение которых осуществляется в плановом порядке. В свою очередь, для железных дорог Сибири в зимний период эксплуатации возникает необходимость организовывать работы по снегоборьбе, что существенно сокращает объем трудовых ресурсов, направляемых на выполнение планово-предупредительных работ по содержанию ГРК [17]. Это приводит к увеличению количества выявляемых отступлений, а соответственно, и к ухудшению балловой оценки состояния пути. Неравномерное оттаивание подшпального основания приводит к резкому увеличению количества отступлений в весенний период.

Также зимой увеличивается время на выполнение работ из-за необходимости проведения дополнительных операций (очистка скреплений от снега и льда, подготовка места под домкрат и т. д.). Все перечисленные факторы влияют на качество планирования и организации работ, а объемы этих работ, их вариативность, а также различные регламентирующие сроки выполнения усложняют процесс принятия решений о распределении трудовых ресурсов, которые должен принимать дорожный мастер, что вносит существенную долю субъективизма.

Постановка задачи. Упростить процесс принятия решений при организации работ по текущему содержанию пути предлагается за счет использования средства поддержки принятия решений, основанного на

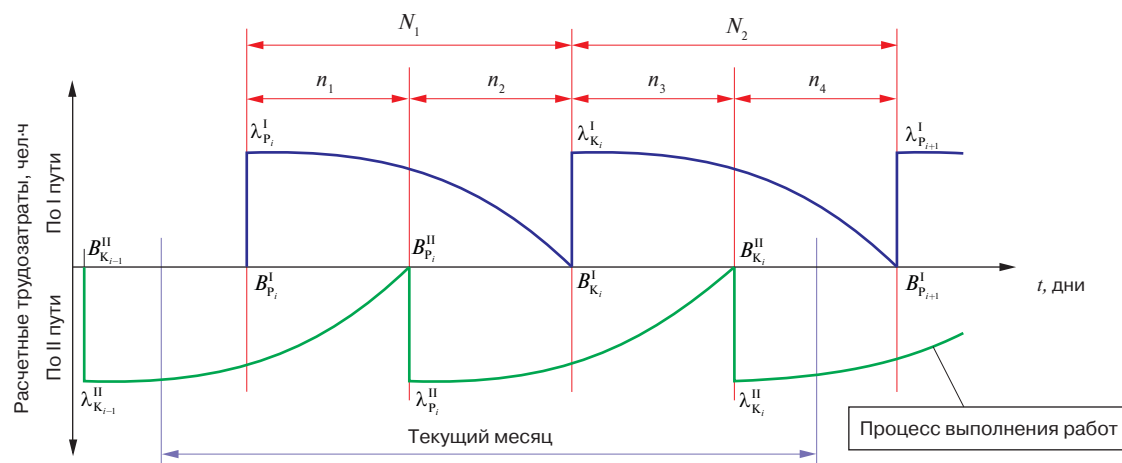


Рис. 1. Схема модели организации технологических процессов содержания ГРК:
 N — промежуток времени; $n_1...n_4$ — период работы; $\lambda_{P_i}^I, \lambda_{K_i}^I$ и $\lambda_{P_i}^{II}, \lambda_{K_i}^{II}$ — рабочая и контрольная оценка выраженного в трудозатратах объема работ на устранение отступлений по I и II пути соответственно; $B_{P_i}^I, B_{K_i}^I$ и $B_{P_i}^{II}, B_{K_i}^{II}$ — момент рабочей и контрольной оценки состояния ГРК по I и II пути соответственно

Fig. 1. Schematic representation of a process model for rail track geometry maintenance:
 N — time interval; $n_1...n_4$ — work period; $\lambda_{P_i}^I, \lambda_{K_i}^I$ и $\lambda_{P_i}^{II}, \lambda_{K_i}^{II}$ — work and control evaluation of the work volume expressed in workload for the elimination of deviations along I and II tracks; $B_{P_i}^I, B_{K_i}^I$ и $B_{P_i}^{II}, B_{K_i}^{II}$ — work and control evaluation of the rail track geometry condition along I and II tracks

моделировании технологических процессов содержания ГРК. Помимо стандартного формирования графика работ по выправке пути, который осуществляет дорожный мастер при планировании работ (месячном, недельном, суточном), предлагается использовать математическую модель для определения необходимого количества трудовых ресурсов на выполнение работ по содержанию ГРК в полном объеме. Такая модель позволит оперативно определить необходимое количество трудозатрат и спланировать работу по содержанию ГРК с учетом регламентирующих сроков по устранению выявленных отступлений, оптимизировать рабочее время дорожного мастера и упростить процесс планирования работ.

В общем виде схему модели можно построить на основе формализации процесса поступления объемов работ в части содержания ГРК (по результатам оценки состояния пути путеизмерительными средствами) и процесса их выполнения (рис. 1).

Контроль состояния главных путей осуществляется вагонами-путеизмерителями два раза в месяц. По данным первой (рабочей) оценки формируется план работ, а по результатам второй (контрольной) оценки определяется балловая, а впоследствии и качественная оценка каждого километра линейного участка, дистанции в целом.

Значение расчетных трудозатрат на устранение отступлений, выявленных по результатам очередных оценок, определяется с использованием утвержденных норм времени согласно технологическим картам [19, 20]. Следует учитывать, что в зависимости

от времени года (состояния подшпального основания) для устранения отступлений используются разные работы (табл. 1). Так, в период замерзшего балласта выправка пути по уровню выполняется исключительно за счет работы с рельсовыми скреплениями (укладка регулировочных карточек), а в летний период работы по выправке пути предпочтительно выполнять с использованием электрошпалоподбоек. Выправка пути в плане (рихтовка) в летний период осуществляется с использованием гидравлических рихтовщиков, в то время как в зимний период рихтовку приходится устранять за счет перешивки пути (регулировки ширины колеи).

С учетом того что в зависимости от месяца эксплуатации и температурной зоны на выполнение работ требуется разное количество времени, расчетные трудозатраты определяются с учетом поправочных коэффициентов [19].

Таблица 1

Значение трудозатрат на устранение 1 м отступления при рельсовом скреплении ЖБР-65Ш на участках Среднесибирского хода, чел-ч

Table 1

Value of workload required to eliminate 1 m of deviation using ZhBR-65Sh rail fastenings on the mid-Siberian line sections, man-hours

Наименование работ	Месяц эксплуатации	
	ноябрь — март	апрель — октябрь
Регулировка ширины колеи	0,160	0,160
Выправка пути в профиле	0,139	0,220
Выправка пути в плане	0,160	0,084

Таким образом, для математического моделирования принимается, что расчетные трудозатраты определяются как произведение длины конкретного отступления и норм времени на его устранение согласно технологической карте в зависимости от типа промежуточного рельсового скрепления и времени года.

Решение задачи. Для определения трудозатрат, необходимых на устранение выявленных отступлений в заданный период времени, примем, что момент рабочей оценки состояния ГРК по I пути в начале месяца (B_{pi}^I) является началом отсчета, тогда период содержания ГРК можно представить в виде суммы двух промежутков времени (N_1 и N_2). В этом случае значение расчетных трудозатрат, необходимых на содержание ГРК в текущий условный месяц (до момента B_{pi+1}^I), можно определить как

$$\lambda = \alpha^i \lambda_{k_{i-1}}^{\Pi} + \lambda_{p_i}^I + \lambda_{p_i}^{\Pi} + \lambda_{k_i}^I + \gamma^i \lambda_{k_i}^{\Pi}, \quad (1)$$

где α^i — доля трудозатрат на устранение отступлений, выявленных по результатам контрольной оценки по II пути в предыдущем месяце; $\lambda_{k_j}^k$ — расчетные трудозатраты на устранение отступлений, выявленных при оценке состояния ГРК, чел·ч; k — номер пути; j — вид оценки (рабочая — Р или контрольная — К); i — текущий месяц; γ^i — доля трудозатрат на устранение отступлений, выявленных по результатам контрольной оценки по II пути в текущем месяце.

Расчетные трудозатраты по каждому пути определяются как сумма расчетных трудозатрат на устранение отступлений в зависимости от их вида и способа устранения (табл. 1) по результатам оценки состояния ГРК, полученным из программного комплекса аналитической оценки ПКП КВЛ-П.

В ОАО «РЖД» наиболее широкое распространение приобрели методы прогноза амплитуд отклонений и их статистических характеристик. В свою очередь, для определения трудозатрат на устранение отступлений помимо вероятности появления и амплитуды отклонения необходимо иметь значения длины отступления. Следовательно, планирование работ по содержанию ГРК возможно лишь на определенном промежутке времени между очередными оценками состояния ГРК.

Исходя из характера проведения оценки состояния ГРК на линейном участке в течение месяца предлагается принять четыре периода работы, для которых будут определяться расчетные трудозатраты на устранение выявленных отступлений в целом на линейном участке. Начало каждого периода работы приурочено к моменту оценки состояния ГРК путеизмерительным вагоном (момент B). В общем виде формула средних ежедневных расчетных трудозатрат на содержание ГРК выглядит следующим образом:

$$\lambda^{cp} = \frac{1}{4} \left(\frac{\alpha^i \lambda_{k_{i-1}}^{\Pi} + \chi^i \lambda_{p_i}^I}{n_1^i} + \frac{(1 - \chi^i) \lambda_{p_i}^I + \beta^i \lambda_{p_i}^{\Pi}}{n_2^i} + \frac{(1 - \beta^i) \lambda_{p_i}^{\Pi} + \delta^i \lambda_{k_i}^I}{n_3^i} + \frac{(1 - \delta^i) \lambda_{k_i}^I + \gamma^i \lambda_{k_i}^{\Pi}}{n_4^i} \right), \quad (2)$$

где α^i , β^i , χ^i , δ^i , γ^i — доли распределения трудозатрат, необходимых для устранения отступлений, выявленных при соответствующей оценке состояния ГРК; n_{τ}^i — период работы между очередными оценками состояния пути по I и II пути, дни; τ — номер периода работы по содержанию ГРК (1 — между контрольной оценкой по II пути и рабочей по I пути; 2 — между рабочей оценкой по I пути и рабочей оценкой по II пути, 3 — между рабочей оценкой по II пути и контрольной по I пути, 4 — между контрольной оценкой по I пути и контрольной по II пути), дни.

Так, α^i — это доля от общих трудозатрат на устранение отступлений, выявленных контрольной оценкой по II пути в предыдущем месяце, которая выделяется на содержание ГРК по II пути в период работы между контрольной оценкой по II пути в предыдущем месяце и рабочей оценкой по I пути в текущем (n_1^i). Также на этот период необходимо выделить долю от общих трудозатрат на устранение отступлений по I пути (χ^i), выявленных по результатам рабочей оценки по I пути.

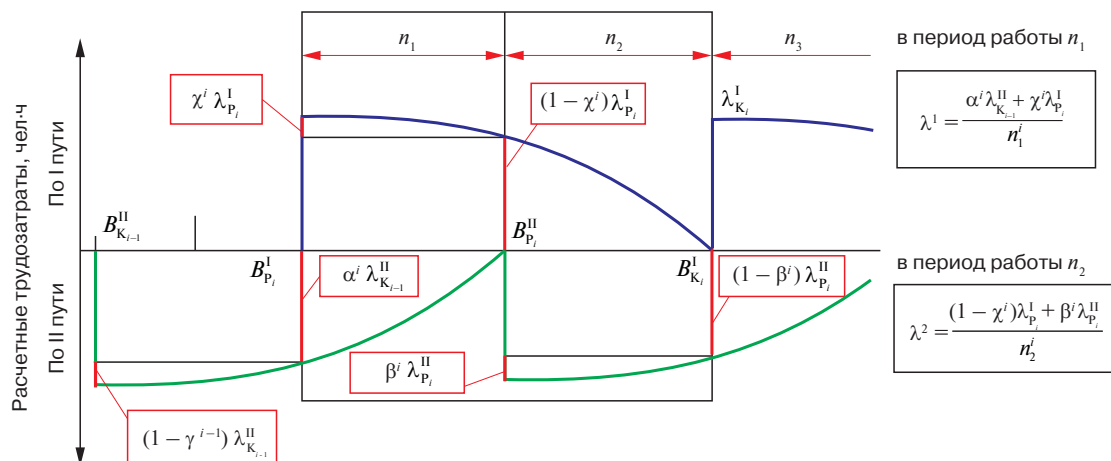
Доли распределения трудозатрат в первом приближении предлагается определять на основе графика оценки состояния пути с учетом рабочих дней (n) между ними:

$$\alpha^i = 1 - \gamma^{i-1}; \chi^i = \frac{n_1^i}{n_1^i + n_2^i}; \beta^i = \frac{n_2^i}{n_2^i + n_3^i}; \delta^i = \frac{n_3^i}{n_3^i + n_4^i}; \gamma^i = \frac{n_4^i}{n_4^i + n_1^{i+1}}. \quad (3)$$

Таким образом, по результатам очередной оценки состояния ГРК осуществляется расчет потребных трудозатрат на устранение отступлений (рис. 2) в текущий период работы (n_{τ}) и доля трудозатрат, которая будет перенесена на следующий ($n_{\tau+1}$).

Исходя из полученных значений потребных трудозатрат в конкретный период работы, явочной численности монтеров пути на линейном участке и прочих запланированных работ, дорожным мастером организуются работы по содержанию ГРК. В случае возникновения неотложных работ или изменения суточных планов выполняется корректировка долевого отношения расчетных трудозатрат и формируется новый план работ с учетом изменений.

Для примера в табл. 2 и 3 приведены результаты моделирования содержания ГРК на одном из линейных участков Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры.

Рис. 2. Определение потребных трудозатрат на период работы (n_i) при краткосрочном планировании работ по содержанию ГРКFig. 2. Determination of workload requirements for the work period (n_i) for short-term planning of rail track geometry maintenance work

В табл. 2 представлены результаты расчета потребных трудозатрат на каждый период работы и доли распределения трудозатрат согласно вышеприведенным формулам.

По результатам расчета (табл. 3) видно, что для выполнения полного объема работ по содержанию ГРК необходимо ежедневно выделять в среднем 31,5 чел-ч, в свою очередь фактическая организация работ на данном линейном участке (исходя из данных журнала планирования и учета выполнения работ по текущему содержанию пути и сооружений и оценки их состояния по форме ПУ-74) привела к тому, что среднее значение ежедневных трудозатрат варьировалось от 15,5 до 46,5 чел-ч.

Подобное распределение трудозатрат связано с тем, что в начале месяца были организованы работы по плановой замене шпал и очистке путей от мусора и грязи, на которые выделен основной объем трудовых ресурсов линейного участка. Пренебрежение к работам по устранению отступлений в начале месяца привело к тому, что линейный участок за вторую половину месяца не справился с объемом работ по содержанию ГРК. Из анализа результатов оценок, выполненных путеизмерительным вагоном за месяц, было выявлено, что в среднем по каждому пути остались не устраненными до 30 % отступлений, что сказалось как на ухудшении балловой оценки линейного участка, так и на общем состоянии пути.

Использование данной математической модели позволило осуществить равномерное распределение трудовых ресурсов на линейном участке дистанции пути в течение месяца, что делает возможным выполнение работы по содержанию ГРК в полном объеме.

Таблица 2

Результаты расчета основных параметров модели

Table 2

Calculation results for the main parameters of the model

Расчетные значения потребных трудозатрат, чел-ч					Доли распределения трудозатрат				
$\lambda_{K_i}^{II}$	$\lambda_{P_i}^I$	$\lambda_{P_i}^{II}$	$\lambda_{K_i}^I$	$\lambda_{K_i}^{II}$	α^I	β^I	γ^I	δ^I	γ^I
146,69	204,41	142,08	113,82	83,26	0,364	0,375	0,500	0,364	0,727

Таблица 3

Сравнение параметров при фактическом содержании ГРК и полученных в результате моделирования (расчетных)

Table 3

Comparison of actual rail track geometry maintenance parameters and those derived from (design) modelling

Параметр	Период работы			
	n_1	n_2	n_3	n_4
Количество рабочих дней	3	5	5	7
Среднее значение трудовых ресурсов на каждый рабочий день, чел-ч	64,0	48,0	60,0	70,0
Среднее значение трудовых ресурсов на каждый рабочий день, выделенных на содержание ГРК, чел-ч: при фактическом содержании	15,5	36,0	33,8	46,5
	43,3	39,8	22,5	19,0
Распределение трудовых ресурсов на содержание ГРК, чел-ч: при фактическом содержании	31,0	132,0	169,0	232,5
	129,9	198,8	112,4	132,9

Заключение. Разработана математическая модель, которая позволяет определить потребный уровень трудовых ресурсов, необходимых для устранения отступлений в конкретный период работы, а также осуществить равномерное распределение трудозатрат в зависимости от количества рабочих дней между очередными оценками состояния ГРК. При сравнении результатов моделирования с фактической организацией работ выявлено расхождение в подходе к распределению трудозатрат. Так, математическая модель осуществляет равномерное распределение трудозатрат в течение рабочих дней, что позволяет построить план с учетом прочих работ по текущему содержанию и с соблюдением регламентирующих сроков устранения отступлений. При фактической организации основной объем работ по содержанию ГРК был запланирован на вторую половину месяца, в результате чего выделенных трудозатрат оказалось недостаточно для выполнения всего объема работ.

Полученная модель может использоваться как средство сокращения рабочего времени дорожного мастера, затрачиваемого на планирование работ, а также служить объективным обоснованием для привлечения дополнительных трудовых ресурсов на линейный участок в случае, если необходимый уровень трудозатрат на устранение отступлений превышает возможности линейного участка.

Помимо этого, в настоящее время активно ведутся разработки по совершенствованию планирования и организации производственных процессов на железнодорожном транспорте, в том числе с целью сокращения влияния человеческого фактора. Разработка и внедрение средств поддержки принятия решений позволят сократить влияние субъективности при планировании и организации работ по текущему содержанию пути. Использование данной математической модели упростит процесс планирования и организации работ на линейном участке дистанции пути, что особенно актуально при высоком уровне неотложных и первоочередных работ на особо грузонапряженных участках, а также на участках, где организована работа вахтовым методом.

Дальнейшие исследования будут направлены на развитие математической модели и разработку программного продукта с возможностью внедрения в информационные системы ОАО «РЖД». Для развития математической модели необходимо рассмотреть вопрос категорирования всех планово-предупредительных работ по текущему содержанию пути по приоритетности, что позволит сформировать алгоритм планирования работ с их ранжированием.

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 ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Стратегия научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 17.04.2018 № 769/р. URL: <https://zszd.rzd.ru/api/media/resources/c/17/121/18071?action=download> (дата обращения: 10.05.2022) [Strategy for scientific and technological development of Russian Railways for the period to 2025 and for the future to 2030 (White Book). Approved by the Order of JSC Russian Railways dated April 17, 2018 No. 769/r. (In Russ.). URL: <https://zszd.rzd.ru/api/media/resources/c/17/121/18071?action=download> (accessed: 10.05.2022)].
2. Сосков А. Г. Эксплуатация крестовин в условиях тяжеловесного движения на Западно-Сибирской дороге // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 10. С. 2–4 [Soskov A. G. Operation of crossings in heavy traffic conditions on the West Siberian road. *Railway Track and Facilities*. 2021;(10):2-4. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/ldomft>.
3. Определение потребности в путевых работах в современных условиях / В. О. Певзнер [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 1. С. 14–20 [Pevzner V. O., Chechelnskiy A. I., Lisysyn A. I., Grin E. N., Petropavlovskaya I. B., Baronayte R. A. Determination of the requirement of track maintenance under modern conditions. *Railway Track and Facilities*. 2021;(1):14-20. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/rjkpxf>.
4. Деформативность пути на участках обращения тяжеловесных поездов / В. О. Певзнер [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2019. № 9. С. 36–41 [Pevzner V. O., Lisitsyn A. I., Grin E. N., Tretyakov V. V., Petropavlovskaya I. B., Gromova T. I. The deformability of the track in areas of heavy freight trains. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2019;(9):36-41. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/fzndro>.
5. Ашпиз Е. С., Виноградов В. В. Основная площадка при осевых нагрузках 27 тс // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 12. С. 22–25 [Ashpiz E. S., Vinogradov V. V. The solid subgrade to pass the cars with axial loads of 27 tf. *Railway Track and Facilities*. 2019;(12):22-25. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/hfbtdv>.
6. Щепотин Г. К. Управление техническим состоянием пути в условиях модернизации Восточного полигона // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 3. С. 35–37 [Shchepotin G. K. Management of the technical condition of the track in the conditions of modernization of the eastern polygon. *Railway Track and Facilities*. 2022;(3):35-37. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/yuymai>.
7. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 28.02.2020 № 436/р (ред. от 11.09.2020, с изм. от 01.04.2021). URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=EXP&n=750874&demo=1> (дата обращения: 10.05.2022) [Instruction on the assessment of the condition of the track gauge by means of track measuring devices and on the measures to be taken to ensure the safety of rail traffic. Approved by the Order of JSC Russian Railways dated February 28, 2020 No. 436/r (revised at September 11, 2020, as amended on April 1,

2021). (In Russ.). URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=EXP&n=750874&demo=1> (accessed: 10.05.2022)].

8. Положение об организации комплексного обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29.11.2019 № 2675/р. URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=EXP&n=769476&demo=1> (дата обращения: 10.05.2022) [*Regulation on the organisation of the comprehensive maintenance of the infrastructure and works of the railways*. Approved by the Order of JSC Russian Railways dated November 29, 2019 No. 2675/r. (In Russ.). URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=EXP&n=769476&demo=1> (accessed: 10.05.2022)].

9. Асаланова Т. Н., Осолков А. А. Организация транспортного производства путевых работ с учетом информационного моделирования // Транспорт Урала. 2021. № 3 (70). С. 65–67 [Asalkhanova T. N., Oskolkov A. A. Organization of transport production of permanent way work with the consideration for information modeling. *Transport of the Urals*. 2021;(3):65-67. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2021-3-65-67>.

10. Асаланова Т. Н. Проблемные зоны эксплуатации системы ЕК АСУИ // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Десятой Междунар. науч.-практ. конф., 21–24 мая 2019 г.: в 2 т. Иркутск: Иркутский гос. ун-т путей сообщения, 2019. Т. 1. С. 504–510 [Asalkhanova T. N. Problem areas in the operation of the Unified Corporate Automated Infrastructure Management System (EK ASUI). In: *Transport Infrastructure of Siberian Region: Proceedings of the Tenth International Scientific-Practical Conference, 21–24 May 2019, in 2 volumes*. Irkutsk: Irkutsk State University of Railway Transport; 2019. Vol. 1. p. 504–510. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/zsludr>.

11. Применение цифровизации при планировании контингента по техническому обслуживанию железнодорожной инфраструктуры / Н. И. Коваленко [и др.] // Мир транспорта. 2021. Т. 19, № 2 (93). С. 116–121 [Kovalenko N. I., Buchkin V. A., Bykov Yu. A., Grin E. N. Application of Digitalisation in Staffing Planning for Railway Infrastructure Maintenance. *World of Transport and Transportation*. 2021;19(2):116-121. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-2-16>.

12. Коваленко Н. И., Суворова Д. О., Аноховская И. В. Применение системы ЕК АСУИ при планировании работ путевого хозяйства ОАО «РЖД» // Наука и технологии железных дорог. 2020. Т. 4, № 1 (13). С. 78–87 [Kovalenko N. I., Suvorova D. O., Anokhovskaya I. V. Application of the Unified Corporate Automated Infrastructure Management System (EK ASUI) in the planning of the track activities of JSC Russian Railways. *Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog*. 2020;4(1):78-87 (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/yaigzl>.

13. Суслов О. А., Федорова В. И. Цифровые двойники — перспективная основа планирования технического обслуживания железнодорожного пути // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сб. докладов I Междунар. науч.-практ. конф. АО «ВНИИЖТ», Щербинка, 26–27 августа 2021 г. М.: АО «ВНИИЖТ», 2021. С. 184–192 [Suslov O. A., Fedorova V. I. Digital twins — a forward-looking way to plan and maintain railways. In: *Science 1520 VNIIZhT: Looking beyond the horizon: Proceedings of the First International Scientific and Practical Conference of the JSC VNIIZhT, Shcherbinka, 26–27 August 2021*. Moscow: JSC VNIIZhT; 2021. p. 184–192. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/tsmrp>.

14. Суслов О. А. Реорганизация системы технического обслуживания и ремонта пути // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 1. С. 11–13 [Suslov O. A. Reorganization of the railway track maintenance and repair system. *Railway Track and Facilities*. 2021;(1):11-13. (In Russ.)]. EDN: <https://www.elibrary.ru/pxvirm>.

15. Асаланова Т. Н., Осолков А. А. Анализ планирования технологических процессов производства путевых работ железнодорожного транспорта в единой корпоративной автоматизированной

системе управления инфраструктурой // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 1 (69). С. 141–148 [Asalkhanova T. N., Oskolkov A. A. Analysis of the planning of technological processes for the production of railway track works in a single corporate automated infrastructure management system. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2021;(1):141-148. (In Russ.)]. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1\(69\).141-148](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1(69).141-148).

16. Асаланова Т. Н., Карпов И. Г., Лагерева С. Ю. Роботизация технологии допуска бригад к выполнению путевых работ в единой корпоративной автоматизированной системе управления инфраструктурой // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 1 (73). С. 54–63 [Asalkhanova T. N., Karpov I. G., Lagereva S. Yu. Robotization of track crews admission technology in a unified corporate automated infrastructure management system. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2022;(1):54-63. (In Russ.)]. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.1\(73\).54-63](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.1(73).54-63).

17. Севостьянов А. А. Планирование и организация работ по содержанию геометрии рельсовой колеи в зимний период эксплуатации // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2022. № 4 (7). С. 95–102 [Sevostyanov A. A. Planning and organization of preventive maintenance of rail track geometry in the winter. *Fundamental and applied transport issues*. 2022;(4):95-102. (In Russ.)]. https://doi.org/10.52170/2712-9195_2022_4_95.

18. Севостьянов А. А. Организация производственного процесса содержания рельсовой колеи по основным геометрическим параметрам в сложных климатических и эксплуатационных условиях: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.22. Новосибирск, 2022. 161 с. [Sevostyanov A. A. Organisation of production process of track maintenance by main geometrical parameters in complex climatic and operational conditions. Cand. Sci. (Eng.) thesis: 05.02.22. Novosibirsk; 2022. 161 p. (In Russ.)].

19. Нормы времени на работы по текущему содержанию пути. Часть 1. Работы по балласту и шпалам [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2017 № 2707/р. URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=LAW&n=290965&demo=1> (дата обращения 18.05.2022) [*Time standards for track maintenance work. Part 1. Works on ballast and sleepers*. Approved by the Order of JSC Russian Railways dated December 22, 2017 No. 2707/r. (In Russ.). URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=LAW&n=290965&demo=1> (accessed: 18.05.2022)].

20. Нормы времени на работы по текущему содержанию пути. Часть 2. Работы по рельсам и креплениям [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 11.01.2018 № 22/р. URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=LAW&n=316044&demo=1> (дата обращения 18.05.2022) [*Time standards for track maintenance work. Part 2. Works on rails and fastenings*. Approved by the Order of JSC Russian Railways dated January 11, 2018 No. 22/r (In Russ.). URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=LAW&n=316044&demo=1> (accessed: 18.05.2022)].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Александрович СЕВОСТЬЯНОВ,

канд. техн. наук, заведующий лабораторией, кафедра «Путь и путевое хозяйство», Сибирский государственный университет путей сообщения (630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191), Author ID: 996037, <https://orcid.org/0000-0001-9393-3501>

Дмитрий Валерьевич ВЕЛИЧКО,

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство», Сибирский государственный университет путей сообщения (630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191), Author ID: 287052, <https://orcid.org/0000-0003-1941-816X>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander A. SEVOSTYANOV,

Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Department of Track and track facility, Siberian Transport University (630049, Novosibirsk, 191, Dusi Kovalchuk St.), Author ID: 996037, <https://orcid.org/0000-0001-9393-3501>

Dmitriy V. VELICHKO,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor, Department of Track and track facility, Siberian Transport University (630049, Novosibirsk, 191, Dusi Kovalchuk St.), Author ID: 287052, <https://orcid.org/0000-0003-1941-816X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Александр Александрович СЕВОСТЬЯНОВ. Обзор основных направлений исследования, сбор и структурирование материалов, разработка математической модели, проведение расчетов, оценка результатов, текст статьи (70%).

Дмитрий Валерьевич ВЕЛИЧКО. Постановка задачи, контроль проведение исследования, оценка результатов, текст статьи (30%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Alexander A. SEVOSTYANOV. Overview of the main areas of research, gathering and structuring of materials, development of a mathematical model, calculations, evaluation of results, drafting the paper (70%).

Dmitriy V. VELICHKO. Description of the problem, control of the research, evaluation of the results, drafting the paper (30%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 25.05.2022, рецензия от первого рецензента получена 21.02.2023, рецензия от второго рецензента получена 02.03.2023, принята к публикации 14.04.2023.

The article was submitted 25.05.2022, first review received 21.02.2023, second review received 02.03.2023, accepted for publication 14.04.2023.

ПОДПСКА

.....

«Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ подписаться?

Подписку на научно-технический журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ») можно оформить в любом почтовом отделении связи по Объединенному каталогу «Пресса России», том 1 или агентствах по распространению печатных изданий «Урал-Пресс», АРЗИ и др.

Подписной индекс журнала — 70116.

Также можно оформить подписку (годовую и полугодовую) на договорных условиях в редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (495) 602-84-56, e-mail: journal@vniizht.ru. Информация о подписке размещена на сайте журнала www.journal-vniizht.ru.

Подписчики стран ближнего и дальнего зарубежья могут оформить подписку на журнал «Вестник ВНИИЖТ» в агентстве «Урал-Пресс» (Ural-Press, export@ural-press.ru).



АСПИРАНТУРА ВНИИЖТ

АО «ВНИИЖТ» предоставляет широкие возможности повышения научной квалификации в аспирантуре

Кадровый научный потенциал института

Уникальные возможности для проведения научных исследований


более
100
лет научного опыта

25 докторов наук

109 кандидатов наук

17 научных центров

более
25 лабораторий

 испытательный центр железнодорожной техники



скоростной испытательный полигон (г. Белореченск)



экспериментальное кольцо (г. Щербинка)



СПЕЦИАЛЬНОСТИ ПОДГОТОВКИ



2.9.2 Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог



2.9.3 Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация



2.9.4 Управление процессами перевозок



2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (на железнодорожном транспорте)



2.6.1 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов



2.6.17 Материаловедение (на железнодорожном транспорте)



2.5.3 Трение и износ в машинах



5.2.3 Региональная и отраслевая экономика


ПОРЯДОК ЗАЧИСЛЕНИЯ


1 Подача документов
с 20 августа
по 9 сентября

2 Вступительные испытания*
с 10 сентября
по 27 сентября

3 Зачисление
(начало обучения)
1 октября

* Вступительные испытания — доклад с обоснованием предполагаемой темы кандидатской диссертации

 129626, Москва,
3-я Мытищинская ул., д.10, каб. 304

 +7 (495) 602-82-30

 www.vniizht.ru



Лицензия
на осуществление
образовательной
деятельности



МОНОГРАФИИ И СБОРНИКИ

Научно-издательский отдел предлагает приобрести Труды АО «ВНИИЖТ»:

- Рожицкий Д.Б. Нетяговая энергетика железнодорожного транспорта. Нормирование потребления топливно-энергетических и водных ресурсов. М.: ООО «РАС», 2022. 322 с.
- Косарев А.Б., Виноградов С.А., Король Ю.Н., Косарев И.А. Электробезопасность электроустановок транспорта. М.: ООО «РАС», 2022. 448 с.
- Кондрашов В.М., Максимов И.Н. Альтернативные методы исследования динамики железнодорожных экипажей. М.: ООО «РАС», 2022. 105 с.
- Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием подвижного состава. Том 1. Грузовые вагоны / Под ред. С.М. Захарова. М.: ИННА, 2021. 455 с.
- Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием подвижного состава. Том 2. Грузовые локомотивы / Под ред. С.М. Захарова. М.: ИННА, 2021. 344 с.
- Марков Д.П. Атомно-молекулярные механизмы вещественного трения. М.: ООО «РАС», 2019. 102 с.
- Косарев А.Б., Гогричиани Г.В. Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта. Ч. 1. М.: ООО «РАС», 2019. 272 с.
- Косарев А.Б., Гогричиани Г.В. Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта. Ч. 2. М.: ООО «РАС», 2019. 300 с.
- Ромен Ю.С. Взаимодействие пути и экипажа в рельсовой колее. М.: ООО «РАС», 2019. 160 с.
- АСУ «Экспресс» - автоматизированная система управления пассажирскими перевозками на железнодорожном транспорте / Под ред. А.В. Комиссарова. М.: ООО «РАС», 2019. 168 с.
- Экспериментальная оценка взаимодействия экипажа и пути при скоростном и высокоскоростном движении / Под ред. А.М. Бржезовского. М.: ООО «РАС», 2019. 148 с.
- Экономические исследования железнодорожного комплекса и их практическое значение / Под ред. О.Ф. Мирошниченко. М.: ООО «РАС», 2019. 210 с.
- Певзнер В.О. Научные основы системы управления состоянием пути. М.: ООО «РАС», 2018. 272 с.
- Научное сопровождение развития высокоскоростных магистралей в России / Под ред. А.Б. Косарева, О.Н. Назарова. М.: ООО «РАС», 2018. 119 с.
- Особенности системы ведения рельсового хозяйства на Российских железных дорогах / Под ред. А.Ю. Абдурашитова. М.: ООО «РАС», 2017. 160 с.
- Вопросы развития железнодорожного транспорта / Под ред. М.М. Железнова, Г.В. Гогричиани, М.: ООО «РАС», 2017. 272 с.
- Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием системы колесо-рельс / Под ред. С.М. Захарова, М.: ООО «Интекст», 2017. 420 с.
- Савин А.В. Безбалластный путь. М.: ООО «РАС», 2017. 192 с.
- Случайные процессы взаимодействия пути и подвижного состава / Под ред. А.Я. Когана, Э.Д. Загитова, И.В. Полещук. М.: ООО «РАС», 2016. 208 с.
- Сильноточный скользящий контакт (свойства, повреждаемость и процессы, протекающие в нем) / Под ред. В.Я. Берента. М.: ООО «Аналитика Родис», 2016. 328 с.
- Антюхин Г.Г., Поварков И.Л. Совершенствование учета расхода моторного масла тепловозами. М.: ООО «Аналитика Родис», 2016. 101 с.
- Шенфельд К.П., Сотников Е.А. Развитие методов управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте в современных условиях. М.: ООО «Издательство «Научный мир», 2015. 200 с.

- Косарев А.Б., Косарев Б.И., Сербиненко Д.В. Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока. М.: ВМГ-Принт, 2015. 349 с.
- Тюрнин П.Г., Тибилов А.Т., Миронос Н.В. Токосъем: надежность, экономичность и пути совершенствования. М.: ВМГ-Принт, 2015. 162 с.
- Ромен Ю.С. Динамика железнодорожного экипажа в рельсовой колее. Методы расчета и испытаний. М.: ВМГ-Принт, 2014. 208 с.
- Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу поездов / Под ред. Л.А. Мугинштейн, А.И. Молчанов, С.А. Виноградов, К.М. Попов, Е.Н. Школьников. М.: ВМГ-Принт, 2014. 141 с.
- Повышение эффективности устройства и содержания железнодорожного пути / Под ред. А.Ю. Абдурашитова. М.: ВМГ-Принт, 2014. 125 с.
- Актуальные проблемы экономики железнодорожного транспорта и пути их решения / Под ред. О.Ф. Мирошниченко. М.: ВМГ-Принт, 2014. 255 с.
- Повышение эффективности инноваций и мотивация их внедрения на железных дорогах России. Научно-методическое пособие / Под ред. М.М. Толкачевой, Г.Е. Писаревского. М.: ООО «Интекст», 2014. 152 с.
- Железнодорожный транспорт на современном этапе / Под ред. Б.М. Лapidуса, Г.В. Гогричани. М.: ВМГ-Принт, 2014. 292 с.
- Земляное полотно железнодорожного пути. Справочник / Под ред. П.И. Дыдышко. М.: ООО «Интекст», 2014. 416 с.
- Железнодорожный транспорт на современном этапе развития / Под ред. М.М. Железнова, Г.В. Гогричани. М.: ООО «Интекст», 2013. 288 с.
- Путь и путевое хозяйство. Взаимодействие колеса и рельса / Под ред. М.М. Железнова. М.: ООО «Интекст», 2013. 236 с.
- Лapidус Б.М. Железнодорожный бизнес: как встать на главный путь. М.: ООО «Интекст», 2013. 383 с.
- Макроэкономическая роль железнодорожного транспорта: Теоретические основы, исторические тенденции и взгляд в будущее / Под ред. Б.М. Лapidуса, Д.А. Мачерета. М.: КРАСАНД, 2013. 324 с.
- Основы разработки нормативов содержания пути и установления скоростей движения / Под ред. В.О. Певзнера, Ю.С. Ромена. М.: ООО «Интекст», 2013. 224 с.
- Экспериментальные исследования процессов движения подвижного состава / Под ред. А.В. Заручейского, П.Т. Гребенюка. М.: ООО «Интекст», 2013. 80 с.
- Современные и перспективные конструкции железнодорожного пути для различных условий эксплуатации / Под ред. А.Ю. Абдурашитова. М.: ООО «Интекст», 2013. 152 с.
- Имитационное моделирование в задачах организации движения поездов / Под ред. Л.А. Мугинштейна. М.: ООО «Интекст», 2012. 56 с.
- Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Конструкция и содержание железнодорожной инфраструктуры / Под ред. С.М. Захарова. М.: ООО «Интекст», 2012. 568 с.
- Проблемы железнодорожного транспорта. Задачи и пути их решения / Под ред. Б.М. Лapidуса, Г.В. Гогричани. М.: ООО «Интекст», 2012. 260 с.
- Энергооптимальные методы управления движением поездов / Под ред. Л.А. Мугинштейна, И.А. Ябко А.Е. Илютовича. М.: ООО «Интекст», 2012. 80 с.

**Актуальная информация
о Трудах ВНИИЖТ доступна
на сайте (переход через
QR-код):**



По вопросам приобретения книг и за справочной информацией обращаться в научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ»:

Anokhov.Igor@vniizht.ru
rio@vniizht.ru
тел.: +7 (495) 602-83-01, +7 (495) 602-84-56

II Международная научно-практическая конференция
НАУКА 1520 ВНИИЖТ



2023

ТЕМЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- //// Новые транспортные продукты и логистические решения для повышения пропускной способности железных дорог
- //// Инфраструктура в современных условиях, обеспечение перспективных объемов грузооборота
- //// Тяговый подвижной состав – взгляд в будущее
- //// Цифровая трансформация на железнодорожном транспорте
- //// Развитие вагонного комплекса
- //// Техническая диагностика на железнодорожном транспорте



II МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «НАУКА 1520 ВНИИЖТ» ПРОЙДЕТ В РАМКАХ ГЛАВНОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ВЫСТАВКИ НА ПРОСТРАНСТВЕ 1520 «PRO//ДВИЖЕНИЕ.ЭКСПО» В Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Конференция ориентирована на обсуждение стратегических задач железнодорожной отрасли, нацелена на развитие и укрепление взаимодействия между органами власти, предприятиями отрасли, учеными, профильными университетами, производителями технических средств, разработчиками технологических решений на железных дорогах мира.

ОСНОВНОЙ ФОКУС КОНФЕРЕНЦИИ

Обсуждение перспективных железнодорожных технологий в эпоху 4-й промышленной революции и глобальных мировых вызовов.

На одной площадке соберутся ведущие российские и зарубежные эксперты и ученые, представители промышленности, органов власти.

ОРГАНИЗАТОР КОНФЕРЕНЦИИ

АО «ВНИИЖТ» – лидер в области разработок, создания, испытания и внедрения железнодорожной техники и технологий на пространстве колеи 1520 мм.



9 772223 973003