



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



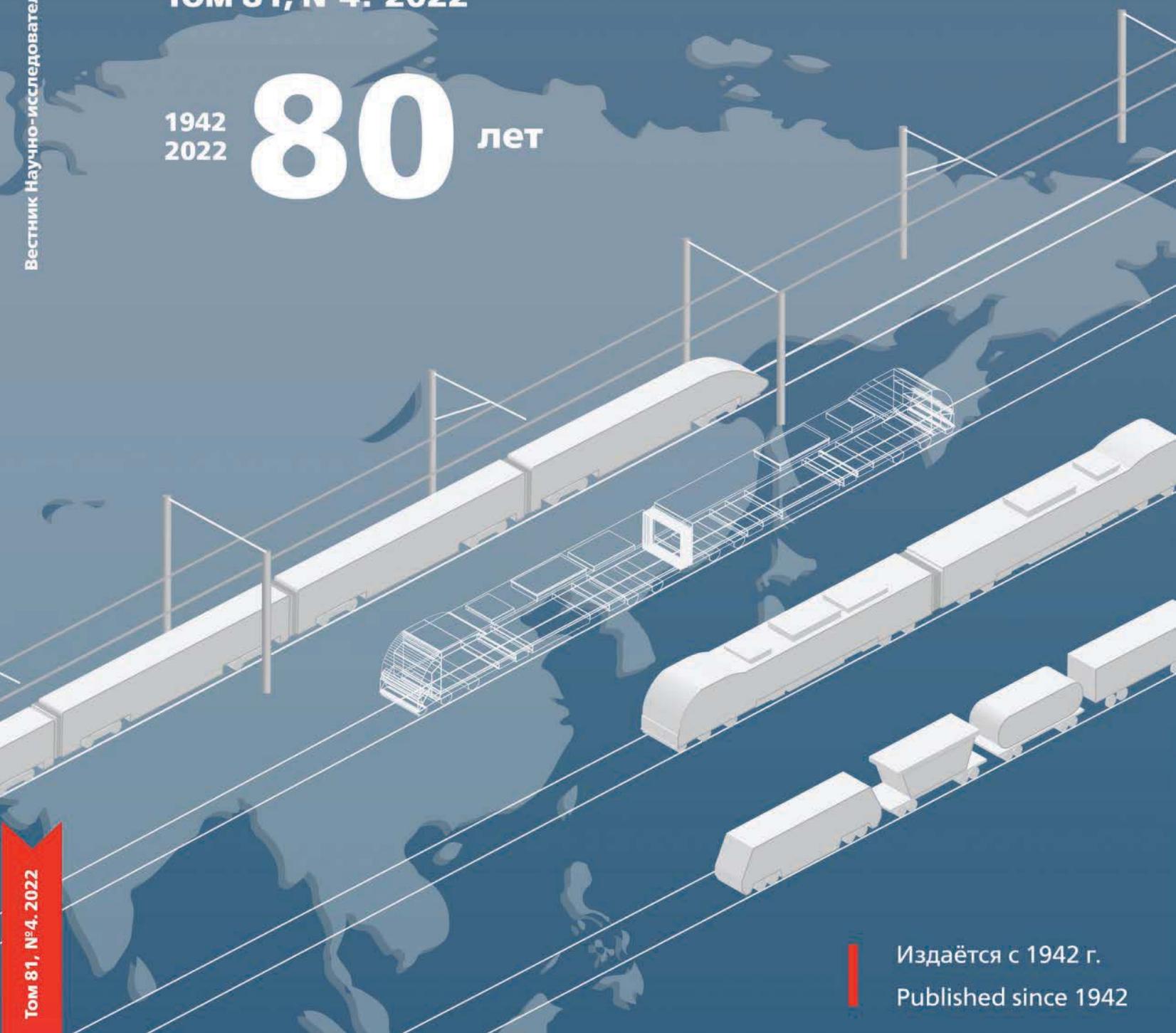
# ВЕСТНИК НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

## RUSSIAN RAILWAY SCIENCE JOURNAL

Том 81, №4. 2022

1942  
2022

# 80 лет



Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта

Том 81, №4. 2022

Издаётся с 1942 г.  
Published since 1942

# Круглый стол, посвященный 90-летию Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ»



**22 сентября 2022 г. состоялось расширенное заседание Ученого совета АО «ВНИИЖТ» в формате круглого стола, посвященного 90-летию Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ».**

В центре внимания были вопросы, связанные с развитием испытательной деятельности с учетом современных вызовов и задач железнодорожной отрасли. Было отмечено, что сегодня на железных дорогах нет хозяйства, в котором бы не использовались результаты исследований, проведенных на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» (ЭК). ОАО «РЖД» заинтересовано в новых решениях и предложениях от АО «ВНИИЖТ» и ЭК, связанных с совершенствова-

нием конструкций инфраструктуры и подвижного состава.

Для взаимодействия АО «ВНИИЖТ» с Центральной дирекцией инфраструктуры ОАО «РЖД» (ЦДИ) предлагается рассмотреть в качестве ключевых следующие направления деятельности: совершенствование технологий сварки, наплавки, шлифовки, фрезеровки рельсов; разработка методик ускоренных ресурсных испытаний модели пути и его элементов; развитие компетенций в области содержания искусственных сооружений, земляного полотна; разработка математического обеспечения предиктивной аналитики по хозяйствам ЦДИ.

В ЦДИ на базе филиала ОАО «РЖД» — проектно-конструкторского бюро по инфраструктуре — создается единый центр компетенций по разработке и проведению испытаний верхнего строения пути. Предполагается, что АО «ВНИИЖТ» примет активное участие в его работе в качестве организации, привлекаемой для разработки математических

моделей и проведения полигонных испытаний.

Рассмотрено и обсуждено предложение о создании геотехнического паспорта ЭК, позволяющего определять количество и протяженность участков пути, оборудованных различными типами опытных конструкций, строение земляного полотна и пр.

Отмечена плодотворность совместной работы организаций НОК «РЖД», которая обеспечивает для ОАО «РЖД» максимально эффективный результат, в том числе и в части испытательной деятельности.



Рассмотрены тренды перезагрузки ЭК, а также направления работ АО «ВНИИЖТ» по созданию технологий, технических средств и нормативной базы, способных обеспечить перевозку грузов до 240 млн т нетто в год по одному пути двухпутной линии и при смешанном движении поездов.

В ходе дискуссии было замечено, что основная проблема пути сегодня не прочность, а деформативность. Участники совещания пришли к соглашению, что необходимо повысить роль научного эксперимента при проведении научных работ.



ISSN 2223-9731 (Print)  
ISSN 2713-2560 (Online)  
DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4

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

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

**ТОМ 81, №4. 2022**

Учредитель:  
АО «Научно-исследовательский  
институт железнодорожного транспорта»

Founder:  
Railway Research Institute

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

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

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

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

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

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

[www.journal-vniizht.ru](http://www.journal-vniizht.ru)  
[journal@vniizht.ru](mailto:journal@vniizht.ru)

© АО «ВНИИЖТ», 2022

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)



Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ)



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 Association of Science Editors and Publishers (ASEP)	
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

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### 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>

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

**Гогричани 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>

**Коган Александр Яковлевич**, д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация, Author ID: 536285, <https://orcid.org/0000-0002-0287-8015>

**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

**Ушкалов Виктор Федорович**, д-р техн. наук, член-корреспондент НАН, Институт технической механики НАН, Днепр, Украина

**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>

**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**, проф. железнодорожной инженерии, Делфтский технологический университет, Делфт, Нидерланды

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**Виноградов С. А.**, председатель, канд. техн. наук, генеральный директор АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

**Горячева И. Г.**, д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАН, ИПМех РАН, Москва, Российская Федерация

**Дынькин Б. Е.**, д-р техн. наук, проф., почетный президент МАТУ АТР, РГУПС, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

**Колесников В. И.**, д-р техн. наук, проф., академик РАН, РГУПС, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

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

**Лёвин Б. А.**, д-р техн. наук, проф., президент РУТ (МИИТ), Москва, Российская Федерация

**Махутов Н. А.**, д-р техн. наук, проф., член-корреспондент РАН, ИМАШ РАН, Москва, Российская Федерация

**Мачерет Д. А.**, д-р экон. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

**Назаров О. Н.**, канд. техн. наук, ОАО «РЖД», Москва, Российская Федерация

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

**Смольянинов А. В.**, д-р техн. наук, проф., УрГУПС, Екатеринбург, Российская Федерация

**Шенфельд К. П.**, д-р техн. наук, исполнительный директор АО «ВНИИЖТ», Москва, Российская Федерация

## РЕДАКЦИЯ

**Анохов Игорь Васильевич**, начальник научно-издательского отдела, e-mail: [anokhov.igor@vniizht.ru](mailto:anokhov.igor@vniizht.ru), **Сиротенко Игорь Васильевич**, научный редактор, e-mail: [sirotenko.igor@vniizht.ru](mailto:sirotenko.igor@vniizht.ru), **Смирнова Анна Александровна**, выпускающий редактор, e-mail: [smirnova.anna@vniizht.ru](mailto:smirnova.anna@vniizht.ru), **Еремцов Игорь Александрович**, переводчик, **Редина Анна Эдуардовна**, специалист, e-mail: [redina.anna@vniizht.ru](mailto:redina.anna@vniizht.ru), **Барашков Владислав Владимирович**, специалист по графическому дизайну, e-mail: [barashkov.vladislav@vniizht.ru](mailto:barashkov.vladislav@vniizht.ru)

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

Подписано к печати 19.12.2022. Формат бумаги 60×90 1/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 12,25. Тираж 300 экз. Заказ 595. Цена свободная

## EDITORIAL BOARD

### Editor-in-Chief

**Alexander B. Kosarev**, Dr. of Sci. (Engineering), 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. of Sci. (Economics), Associate Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 583440, <https://orcid.org/0000-0002-1548-0815>

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

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

**Oleg N. Dunaev**, Dr. of Sci. (Economics), 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. of Sci. (Engineering), 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. of Sci. (Engineering), Professor, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 731500, <https://orcid.org/0000-0003-0077-8376>

**Alexander Ya. Kogan**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Chief Scientific Associate, Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation, Author ID: 536285, <https://orcid.org/0000-0002-0287-8015>

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

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

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

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

**Alexander V. Savin**, Dr. of Sci. (Engineering), 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. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russian Federation, Author ID: 436265, <https://orcid.org/0000-0001-9691-5181>

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

**Victor F. Ushkalov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the National Academy of Science in Ukraine, Institute of Technical Mechanics, Dnepr, Ukraine

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

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

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

**Coenraad Esveld**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Delft Technical University, General Director of the "Esveld Consulting Services", Delft, Netherlands

## EDITORIAL COUNCIL

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

**Irina G. Goryacheva**, Dr. of 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. of Sci. (Engineering), Professor, Honored President of the IATU APC, Rostov State University of Railway Engineers, Rostov-on-Don, Moscow, Russian Federation

**Vladimir I. Kolesnikov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Rostov State University of Railway Engineers, Rostov-on-Don, Moscow, Russian Federation

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

**Boris A. Levin**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, President of the Russian University of Transport Moscow, Russian Federation

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

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

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

**Efim N. Rosenberg**, Dr. of Sci. (Engineering), 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. of Sci. (Engineering), Professor of the Wagon Department, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russian Federation

**Konstantin P. Shenfeld**, Dr. of Sci. (Engineering), Executive Director of the Railway Research Institute, Moscow, Russian Federation

## EDITORIAL STAFF

**Igor V. Anokhov**, Head of the Scientific Publishing Department, e-mail: [anokhov.igor@vniizht.ru](mailto:anokhov.igor@vniizht.ru),  
**Igor V. Sirotenko**, Scientific Editor, e-mail: [sirotenko.igor@vniizht.ru](mailto:sirotenko.igor@vniizht.ru), **Anna A. Smirnova**, Publishing Editor, e-mail: [smirnova.anna@vniizht.ru](mailto:smirnova.anna@vniizht.ru),  
**Igor A. Yeremtsov**, Translator, **Anna E. Redina**, Specialist, e-mail: [redina.anna@vniizht.ru](mailto:redina.anna@vniizht.ru),  
**Vladislav V. Barashkov**, Graphic Designer, e-mail: [barashkov.vladislav@vniizht.ru](mailto:barashkov.vladislav@vniizht.ru)

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

Signed to print on 19.12.2022. Format is 60×90 1/8. Offset printing. 12.25 printed sheets. 300 copies. Order No. 595. Free price

# СОДЕРЖАНИЕ

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

<b>Определение нагруженности сцепных устройств электропоездов</b> В. И. Беляев, Д. В. Горский, Д. А. Ступин, А. Н. Конышков .....	297–305
<b>Разработка бортовой системы диагностирования технического состояния поверхности катания колес грузовых вагонов</b> И. А. Гаджиев .....	306–317
<b>Актуализация критериев оценки состояния пути по данным путеизмерительных средств</b> Б. Н. Зензинов, Ю. С. Ромен, М. В. Криволапов .....	318–329
<b>Монометаллические моторно-осевые подшипники тепловозов: замена материала с бронзы на комплексно-легированный алюминиевый сплав</b> А. Е. Миронов, И. С. Гершман, А. А. Крылов, П. О. Мусерский .....	330–338
<b>Разработка рельсов новой категории для применения в особо тяжелых условиях эксплуатации</b> Е. Н. Токмакова, И. Е. Перков, П. В. Иванов, К. Л. Заграничек .....	339–346

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

<b>Исследование распространения волн импульса грозового перенапряжения в контактной сети электрифицированных железных дорог</b> К. С. Беломестных, А. Н. Бардин, С. Н. Вечканов, А. А. Крылов .....	348–358
<b>Методические положения по определению основных параметров организации перевозочного процесса при внедрении вагонов с повышенной осевой и погонной нагрузкой</b> М. И. Мехедов, Е. А. Сотников, П. С. Холодняк, А. А. Капырин, Н. В. Корниенко .....	359–369
<b>Некоторые вопросы практического использования бортовых систем учета топлива тепловозов</b> К. М. Попов .....	370–382
<b>Содержание журнала за 2022 год .....</b>	<b>383–384</b>

# CONTENTS

## TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

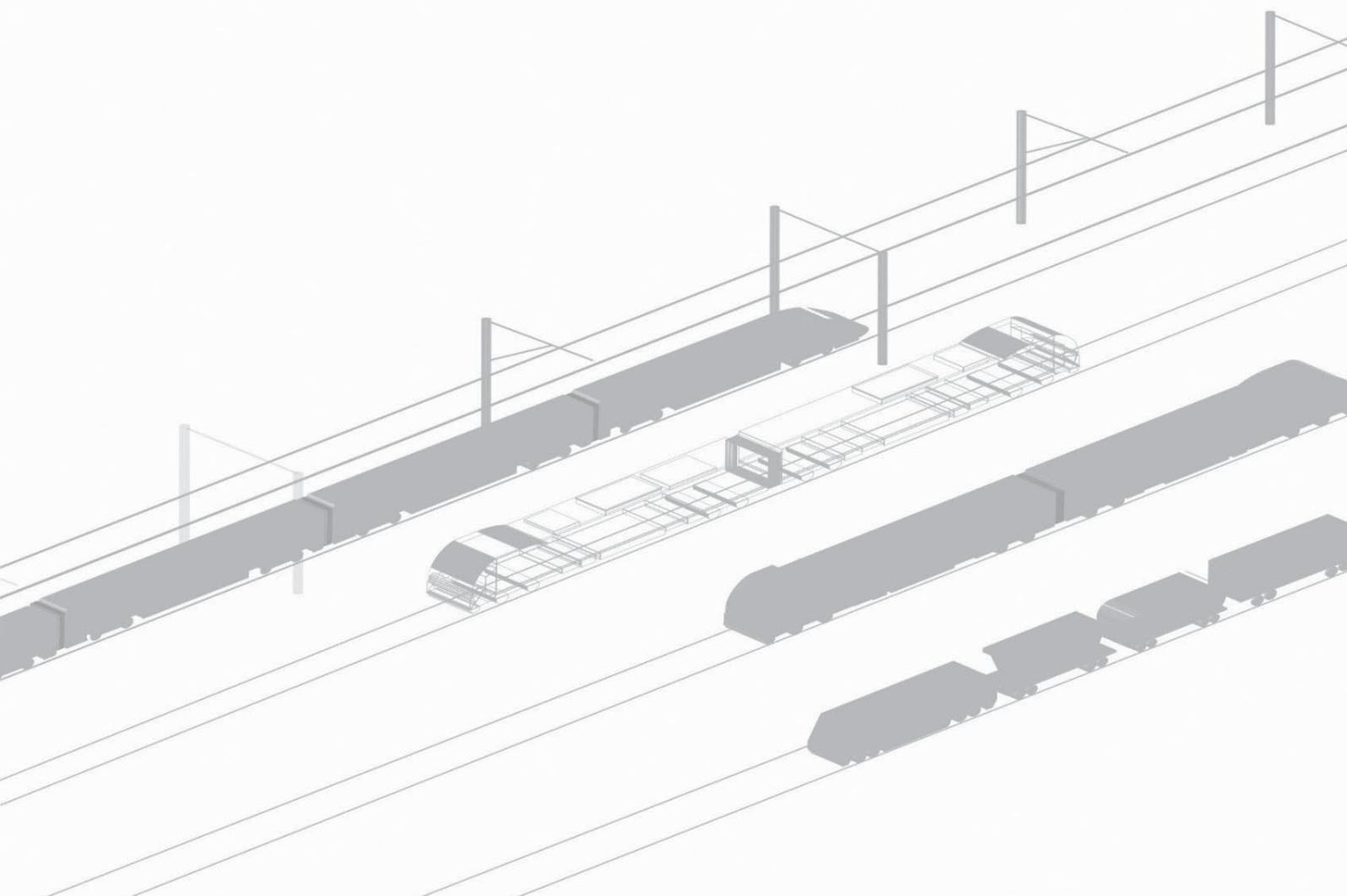
<b>Evaluation of prevailing draft loads in the couplings of the electric trains</b> Vladimir I. Belyaev, Dmitriy V. Gorskiy, Dmitriy A. Stupin, Alexander N. Konyshkov .....	297–305
<b>Development of an on-board system for diagnosing the technical condition of the tread surface of the wheels of wagons</b> Ibragim A. Gadzhiev .....	306–317
<b>Updating the criteria for assessing the state of the railway track according to the data of track measuring equipment</b> Boris N. Zenzinov, Yuriy S. Romen, Maksim V. Krivolapov .....	318–329
<b>Monometallic motor-axial bearings of diesel locomotives: replacing bronze with complex aluminium alloy</b> Alexander E. Mironov, Iosif S. Gershman, Anton A. Krylov, Prokopiyy O. Muserskiy .....	330–338
<b>Development of a new category rails for application in extremely severe operating conditions</b> Ekaterina N. Tokmakova, Ivan E. Perkov, Pavel V. Ivanov, Konstantin L. Zagranichesk .....	339–346

## AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

<b>Study of the waves propagation of lightning overvoltage impulse in the catenary system of electrified railways</b> Konstantin S. Belomestnykh, Alexander N. Bardin, Sergey N. Vechkanov, Anton A. Krylov .....	348–358
<b>Methodological provisions for determining the main parameters of the organisation of the transportation process during the introduction of cars with increased axial and linear load</b> Mikhail I. Mekhedov, Evgeniy A. Sotnikov, Pavel S. Kholodnyak, Aleksey A. Kapyrin, Natalya V. Kornienko .....	359–369
<b>Practical use of on-board fuel metering systems of diesel locomotives</b> Kirill M. Popov .....	370–382
<b>Contents of the Journal for 2022 .....</b>	383–384

# ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT



## ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья  
УДК 629.4.028:620.178.35  
DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-297-305  
EDN: <https://elibrary.ru/fdnctq>



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ СЦЕПНЫХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ

**В. И. Беляев**✉, **Д. В. Горский**, **Д. А. Ступин**, **А. Н. Коньшков**

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

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** До настоящего времени требования к сцепным и автосцепным устройствам пассажирских вагонов локомотивной тяги и электропоездов были полностью идентичными, несмотря на значительно более низкий уровень продольных сил при движении моторвагонного подвижного состава с распределенной тягой. С появлением специализированных конструкций сцепных устройств для электропоездов были разработаны требования к прочности, позволяющие создавать новые модели с меньшими габаритами и массой. Опыт эксплуатации показал возможность разрушения деталей сцепок, приводящего к расцеплению поездов. Причиной произошедших случаев могли быть усталостные повреждения. Однако результатов исследований нагруженности сцепок электропоездов в эксплуатации, на основании которых можно было разработать нормативные требования к специализированным сцепным устройствам, не существовало.

**Материалы и методы.** Проведены измерения сил, действующих в сцепках электропоездов различных категорий и типов при штатной эксплуатации, определены частоты возникновения сил различного уровня. По результатам обработки полученных данных построены гистограммы распределения размахов продольных сил, действующих на межвагонные сцепки, и параметра, характеризующего накопление усталостных повреждений, на 100 тыс. км пробега.

**Результаты.** По результатам обработки экспериментальных данных выполнен расчет накопления усталостных повреждений сцепок и установлены требования к их ресурсу. Также разработаны методики испытаний по определению прочности и сопротивлению усталости при многоцикловых и малоцикловых режимах нагружения. Дано обоснование введения в методику обработки результатов испытаний поправочного коэффициента, позволяющего выполнять ресурсные испытания на оборудовании с различными значениями коэффициента асимметрии цикла нагружения.

**Обсуждение и заключение.** Определена нагруженность сцепных устройств при эксплуатации электропоездов, на основании которой разработаны технические требования и методики испытаний, утвержденные ОАО «РЖД». В соответствии с этими нормативными документами будет осуществляться разработка и приемка всех новых моделей сцепных устройств для электропоездов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** электропоезда, сцепные устройства электропоездов, силы при штатной эксплуатации, требования к прочности, требования к сопротивлению усталости, методика испытаний

**Для цитирования:** Беляев В. И., Горский Д. В., Ступин Д. А., Коньшков А. Н. Определение нагруженности сцепных устройств электропоездов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 4. С. 297–305. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-297-305>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.4.028:620.178.35

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-297-305

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



## EVALUATION OF PREVAILING DRAFT LOADS IN THE COUPLINGS OF THE ELECTRIC TRAINS

Vladimir I. Belyaev✉, Dmitriy V. Gorskiy,  
Dmitriy A. Stupin, Alexander N. Konyshkov

Railway Research Institute,  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Until now, the requirements for manual and automatic couplers for locomotive-hauled passenger carriages and electric trains have been completely identical, despite the significantly lower level of longitudinal forces during the movement of multi-unit rolling stock with distributed traction. The introduction of specialised designs of coupling devices for electric trains led to the development of strength requirements that enable the creation of new models with smaller dimensions and weight. Operating experience has shown that parts of couplings may be destroyed, leading to the uncoupling of trains. Fatigue damage may cause accidents. However, there were studies of the draft loads of electric trains couplers in operation, on the basis of which it was possible to develop regulatory requirements for specialised coupling devices.

**Materials and methods.** The authors measured the forces acting in the couplings of electric trains of various categories and types during normal operation, as well as the frequencies of the occurrence of forces of various levels. The article includes histograms based on the results of processing the received data showing the distribution of longitudinal forces acting on the inter-car couplers and the parameter characterising the accumulation of fatigue damage per 100,000 km.

**Results.** According to the results of processing of the experimental data, the calculation of the accumulation of fatigue damage to the couplers was carried out and the requirements for their expected service life were established. Test procedures have also been developed to evaluate strength and fatigue resistance under high-cycle and low-cycle loading conditions. The article provides ground for introducing a correction factor into the procedure for processing test results, which makes it possible to perform life tests on equipment with different values of the load cycle asymmetry factor.

**Discussion and conclusion.** The authors have evaluated the draft loads in coupling devices during the operation of electric trains, on the basis of which technical requirements and test methods were developed and approved by JSC Russian Railways. Development and acceptance of all new models of coupling devices for electric trains will be carried out in accordance with these regulatory documents.

**KEYWORDS:** electric trains, electric train couplers, normal operation forces, strength requirements, fatigue resistance requirements, testing methodology

**For citation:** 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>.

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

© Belyaev V. I., Gorskiy D. V., Stupin D. A.,  
Konyshkov A. N., 2022

**Введение.** При проведении приемочных и сертификационных испытаний сцепных и автосцепных устройств необходимым является экспериментальное подтверждение соответствия требованиям ТР ТС 001/2011 [1] по обеспечению безопасности в течение назначенного срока службы или ресурса при воздействии нагрузок, которым они могут подвергаться в процессе эксплуатации. Однако до настоящего времени отсутствовали какие-либо нормативные документы, устанавливающие требования к усталостной прочности сцепных/автосцепных устройств, предназначенных для эксплуатации в электропоездах. Также отсутствовали и стандартизированные методики проведения испытаний по этому показателю. Вследствие этого определение соответствия сцепок требованиям ТР ТС 001/2011 зависело от испытательного центра, т. е. не являлось объективным.

Вместе с тем в последнее десятилетие на пассажирском подвижном составе ОАО «РЖД» появилось несколько разнообразных конструкций специализированных сцепных устройств, которые не обладают таким огромным запасом по прочности и сопротивлению усталости, как было ранее при повсеместном использовании автосцепки СА-3 на пассажирских вагонах локомотивной тяги и электропоездов. С появлением новых сцепных устройств уже произошло несколько случаев разрушения деталей сцепок, вызвавших расцепление вагонов в поезде. Такие события, даже единичные, вызывают более серьезные проблемы, чем обрывы автосцепок в грузовых поездах, поскольку создают угрозу жизни и здоровью людей. Эти обстоятельства обосновали необходимость проведения работы по изучению нагруженности сцепок в эксплуатации электропоездов.

На зарубежных железных дорогах также обращают внимание на возможность повреждений сцепок электропоездов вследствие несогласованности работы тормозов или тяговых двигателей, для исключения чего предложена сложная многоуровневая система активного гашения продольной вибрации [2].

Целью проведенной работы было определение нагруженности сцепных устройств при эксплуатации электропоездов и построение зависимостей статистического распределения действующих сил. Полученное распределение явилось основанием для создания нормативного документа, в котором установлены требования к прочности и особенно к сопротивлению усталости сцепных устройств электропоездов (ранее такие требования полностью отсутствовали: их не было ни в стандартах, ни в ведомственных документах, ни в результатах исследований), а также унифицированных методик испытаний.

Необходимо отметить, что выполненные исследования относятся только к продольным силам, переда-

ваемым через сцепки, хотя в штатных эксплуатационных режимах движения электропоездов при проходе горизонтальных и вертикальных кривых, а также относительных колебаниях вагонов возникают отклонения сцепки от продольной оси вагона. Однако отклонения в горизонтальной плоскости не вызывают значимых сил (все сцепки в расцепленном состоянии могут быть отклонены вручную), а уровни сил в вертикальной плоскости и частота (статистическая вероятность) их возникновения зависят от конструкции крепления сцепки, т. е. не могут быть стандартизованы в качестве единых для всех моделей сцепок, и в данной работе не рассматривались.

#### **Определение нагруженности сцепок в эксплуатации.**

На первом этапе работы определена нагруженность межвагонных сцепок электропоездов в эксплуатации. С этой целью была разработана программа и методика измерения сил, передаваемых через сцепки электропоездов в процессе эксплуатации.

В соответствии с этой программой было проведено измерение сил в сцепках четырех электропоездов различных категорий и типов:

- двенадцативагонном пригородном электропоезде ЭТ2М с автосцепками СА-3, эксплуатируемом на участке Москва — Конаково ГРЭС;
- пятивагонном городском электропоезде ЭС2Г, эксплуатируемом на Московском центральном кольце (МЦК);
- пятивагонном электропоезде ЭС2ГП дальнего следования, эксплуатируемом на участках Москва — Орел и Москва — Белгород (в сдвоенном режиме);
- пятивагонном электропоезде ЭС2ГП дальнего следования, эксплуатируемом на участке Москва — Иваново, включая движение по участку Владимир — Иваново с тепловозом ТЭП70БС в голове поезда.

С каждым электропоездом проведено по две поездки — при отрицательных и положительных температурах. Регистрация сил осуществлялась при штатной эксплуатации электропоездов с пассажирами. Частота регистрации сигнала составляла 50 Гц. Суммарный пробег электропоездов с регистрацией сил составил 9628 км.

Образцы записей скорости движения и реализации сил в межвагонных сцепках электропоезда ЭС2Г в поездке по МЦК показаны на рис. 1, 2, 3. Запись приведена для участка движения продолжительностью 4 ч 45 мин (по шкале абсцисс указаны порядковые номера точек опроса), сжимающие силы указаны с положительным знаком, растягивающие — с отрицательным.

Движение электропоезда состоит из частых разгонов, преимущественно до скорости 60–100 км/ч, и торможений (рис. 1).

Приведенные записи силы не являются шумом, что можно проиллюстрировать фрагментом записи

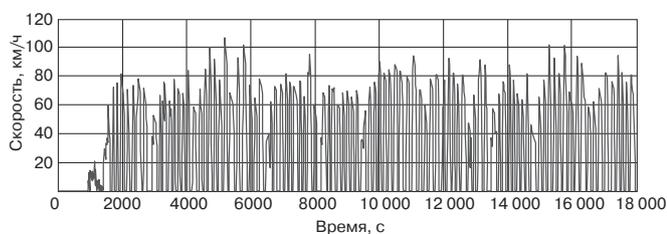


Рис. 1. Фрагмент записи скорости движения электропоезда ЭС2Г в поездке по МЦК

Fig. 1. Fragment of the speed recording of an ES2G electric train on a trip around the Moscow Central Circle

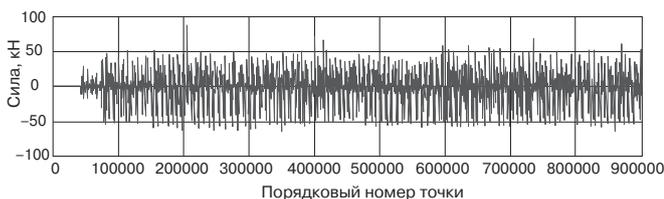


Рис. 2. Фрагмент записи реализации силы между головным моторным и прицепным вагонами (1 и 2 с головы состава) электропоезда ЭС2Г при движении по МЦК

Fig. 2. Fragment of the recording of the realisation of force between the head rail motor wagon and trailer car (1st and 2nd from the head of the train) of the ES2G electric train when moving along the Moscow Central Circle

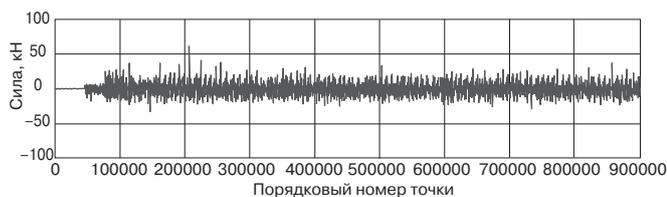


Рис. 3. Фрагмент записи реализации силы между прицепными вагонами (3 и 4 с головы состава) электропоезда ЭС2Г при движении по МЦК

Fig. 3. Fragment of the recording of the realisation of force between trailer cars (3rd and 4th from the head of the train) of the ES2G electric train when moving along the Moscow Central Circle

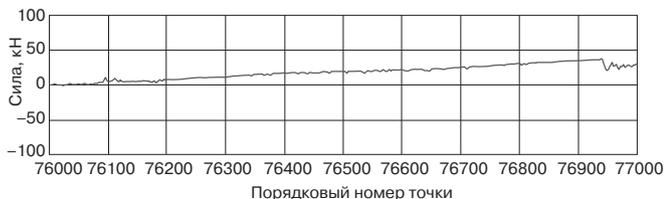


Рис. 4. Фрагмент записи реализации силы длительностью 20 с между вагонами 1 и 2 с головы состава электропоезда ЭС2Г по МЦК

Fig. 4. Fragment of the recording of the realisation of force with a duration of 20 s between cars 1 and 2 from the head of the ES2G electric train along the Moscow Central Circle

реализации силы с увеличенным масштабом по горизонтальной оси длительностью 20 с, приведенным на рис. 4.

Из рис. 2 и 3 видно, что уровень наиболее часто возникающих сил в сцепках между головным моторным и прицепным вагонами (номера 04 и 05) значительно выше, чем между двумя прицепными вагонами (номера 02 и 03):  $\pm 50$  и  $\pm 25$  кН соответственно. Это объясняется схемой формирования электропоездов ЭС2Г и ЭС2ГП, в которой только головные вагоны являются моторными, а промежуточные — прицепными. Поэтому в средней части состава усилия растяжения от головного моторного вагона близки к значению усилия сжатия, передаваемого от хвостового моторного вагона. На больший уровень размахов сил в межвагонной сцепке головного вагона и сцепленной с ней сцепки прицепного вагона может оказывать влияние совокупность нескольких факторов: непосредственное приложение нагрузки от моторного вагона, неодновременность возникновения растягивающих и сжимающих сил от головного и хвостового вагонов (даже при синхронном включении их двигателей) вследствие затрат времени на передачу сил через три прицепных вагона с поглощающими аппаратами. То же наблюдается у сцепок хвостового вагона (со сменой знаков нагрузки).

Максимальные силы в межвагонных сцепках пригородных электропоездов имели более высокий уровень, несмотря на то, что каждый прицепной вагон находился между двумя моторными. Фрагмент записи реализации силы в сцепке показан на рис. 5. Запись приведена для участка движения продолжительностью 5 ч 30 мин.

Приведенный на рис. 6 фрагмент записи реализации силы с увеличенным масштабом по горизонтальной оси длительностью 20 с (1000 точек с частотой регистрации 50 Гц) показывает значительные отличия от аналогичной диаграммы, приведенной на рис. 4 для электропоезда ЭС2Г, — здесь зарегистрированы кратковременные скачки силы (например, точки 1, 2 и 3). Это вызвано установкой между передним и задним упорами поглощающего аппарата на пригородных электропоездах в соответствии с ГОСТ 3475–81 [3] с усилием начальной затяжки, равным 25–80 кН (поглощающие аппараты Р-5П, которыми преимущественно оборудованы пригородные электропоезда прежних лет выпуска, имеют усилие начальной затяжки ближе к верхней границе этого диапазона). Вследствие этого при всех изменениях режима движения поезда (трогании, наборе тяги, торможении) сила увеличивается вплоть до 60–70 кН (точка 3 на рис. 6) практически скачкообразно, без какого-либо демпфирования. Установка поглощающих аппаратов между упорами без начальной затяжки запрещена всеми действующими нормативными документами.

Поглощающие аппараты модели Т-8П, установленные на электропоездах ЭС2Г и ЭС2ГП, имеют другую конструкцию и другой способ установки на вагоне, при котором обеспечивается демпфирование любых малых сил.

Влияние роста усилия начальной затяжки на увеличение продольных ускорений в пассажирских поездах было отмечено по результатам математического моделирования уже ранее [4]. Тем не менее установка поглощающих аппаратов на подвижной состав в соответствии с ГОСТ 3475–81, но без предварительного поджатия, при эксплуатации приведет к появлению продольных зазоров, что является браковочным признаком. Наличие и высокий уровень начальной затяжки пассажирских поглощающих аппаратов (входящих в состав сцепных устройств пассажирских вагонов локомотивной тяги, электро- и дизель-поездов) приводит к разнонаправленным результатам: увеличивает энергоемкость, что повышает защиту вагонов и пассажиров в нештатных ситуациях, а также исключает отбраковку аппаратов по причине появления зазоров между аппаратом и упорами, но ухудшает виброкомфорт пассажиров при действии продольных ускорений в эксплуатации и в некоторой степени усложняет условия продольной нагруженности сцепок в эксплуатации (как будет показано по результатам данных исследований).

**Статистическая обработка результатов.** Реализации зарегистрированных в поездках сил в сцепках являются случайными процессами, в связи с чем для проведения статистической обработки результатов была выполнена их схематизация методом «дождя», предусмотренная ГОСТ 25.101–83 [5].

Результатом проведенной статистической обработки стало построение гистограммы распределения размахов (двойных амплитуд) сил в сцепках и их количества в каждой поездке, приведенных к 100 тыс. км пробега. На рис. 7 приведена гистограмма распределения размахов продольных сил при эксплуатации пригородного электропоезда ЭТ2М, на рис. 8 — при эксплуатации городского электропоезда ЭС2Г на МЦК. Все гистограммы построены с логарифмической шкалой по оси ординат.

Распределение сил в сцепках электропоездов дальнего следования ЭС2ГП показало, что количество размахов сил уровня более 45–50 кН значительно ниже, чем в сцепках городского электропоезда ЭС2Г (рис. 8). Данное обстоятельство определяется значительно меньшим количеством остановок и троганий поезда на 100 тыс. км пробега, при которых возникают силы относительно высокого уровня. Вместе с тем эти поезда оборудуются сцепными устройствами одинаковых моделей, в связи с чем они должны отвечать более строгим требованиям, т. е. определенным условиям эксплуатации городского электропоезда.

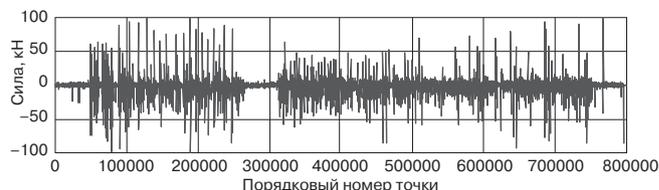


Рис. 5. Фрагмент записи реализации силы между вагонами электропоезда ЭТ2М при движении по участку Крюково — Москва — Конаково ГРЭС

Fig. 5. Fragment of the recording of the realisation of force between the cars of the ET2M electric train when moving along the Kryukovo — Moscow — Konakovo GRES section

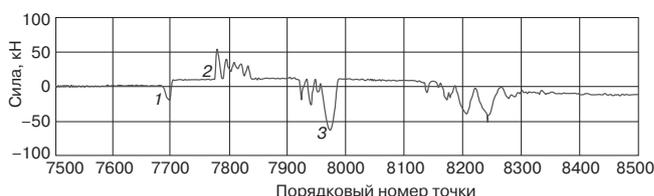


Рис. 6. Фрагмент записи реализации силы длительностью 20 с электропоезда ЭТ2М при движении по участку Крюково — Москва — Конаково ГРЭС: 1, 2, 3 — точки кратковременных скачков силы

Fig. 6. Fragment of the recording of the realisation of force with a duration of 20 s of the ET2M electric train when moving along the Kryukovo — Moscow — Konakovo GRES section: 1, 2, 3 — points of short-term power surges

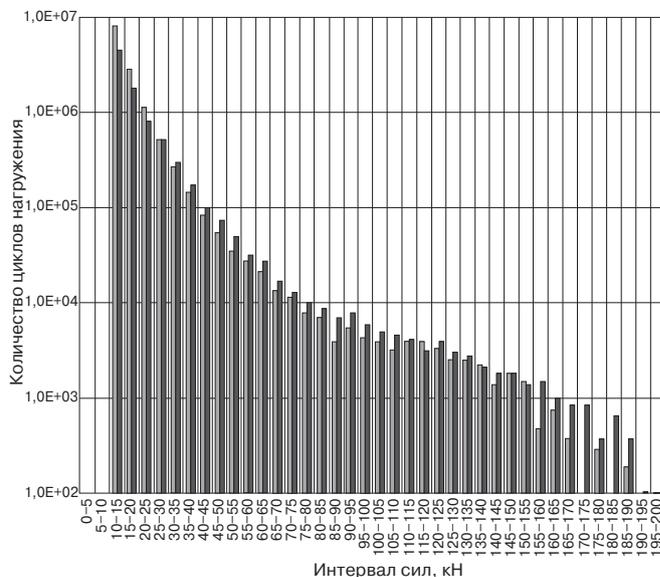


Рис. 7. Гистограмма распределения размахов продольных сил, действующих на межвагонные сцепки пригородного электропоезда ЭТ2М, на 100 тыс. км пробега: ■ — вагоны 02 и 03; ■ — вагоны 07 и 08

Fig. 7. Distribution histogram of the ranges of longitudinal forces acting on the inter-car couplers of the ET2M suburban electric train, per 100,000 km of run: ■ — cars 02 and 03; ■ — cars 07 and 08

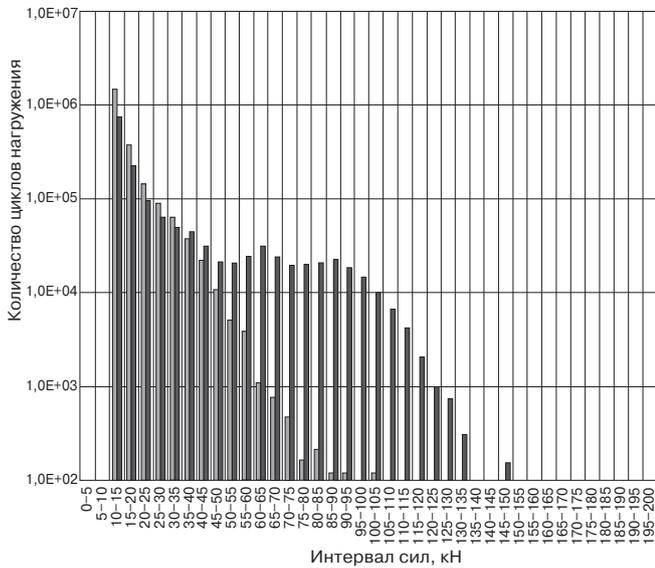


Рис. 8. Гистограмма распределения размахов продольных сил, действующих на межвагонные сцепки городского электропоезда ЭС2Г, на 100 тыс. км пробега:  
 ■ — вагоны 02 и 03; ■ — вагоны 04 и 05

Fig. 8. Distribution histogram of the ranges of longitudinal forces acting on the inter-car couplers of the ES2G urban electric train, per 100,000 km of run:  
 ■ — cars 02 and 03; ■ — cars 04 and 05

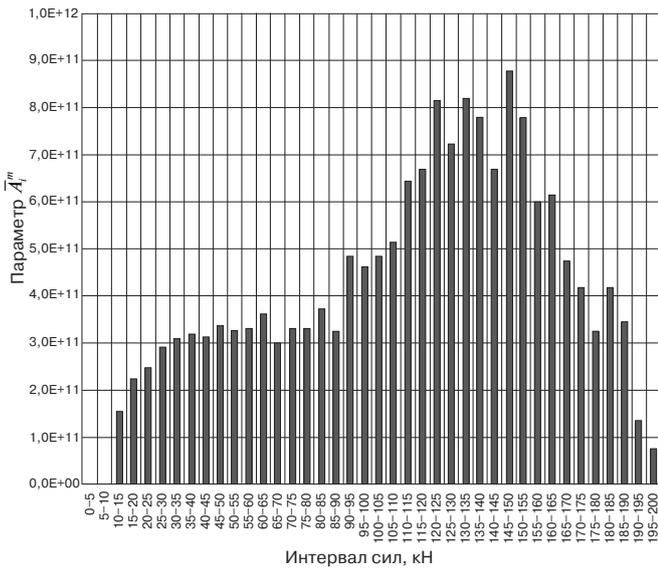


Рис. 9. Гистограмма распределения параметра  $\bar{A}_i^m$ , характеризующего накопление усталостных повреждений, для каждого диапазона размахов продольных сил на 100 тыс. км пробега (с линейной шкалой) в пригородном поезде

Fig. 9. Distribution histogram of the parameter  $\bar{A}_i^m$ , which characterises the accumulation of fatigue damage, for each range of longitudinal forces per 100,000 km of run (with a linear scale) in a suburban train

Накопление усталостных повреждений сцепки происходит вследствие воздействия переменных нагрузок всех уровней. Причем степень влияния дей-

ствующих напряжений  $\sigma$  определяется кривой усталости, которая во всем диапазоне долговечности в соответствии с нормами расчетов вагонов на прочность в редакции 1996 г. [6] имеет вид

$$\sigma_i^m N_i = \text{const}, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$ ,  $N_i$  — средний уровень напряжений класса  $i$  и их количество соответственно;  $m$  — показатель степени для кривой усталости, зависящий от вида термообработки: при нормализации  $m = 4$ , при закалке с отпуском  $m = 5$ .

Других нормативов в данной области не установлено, поэтому в работе были приняты указанные выше показатели степени для кривой усталости. Исходя из того, что сцепки могут подвергаться или нормализации, или закалке с отпуском, в расчете нагруженности сцепок учтены оба допускаемых варианта.

С учетом влияния нагрузок различных классов в степени  $m = 4$  и  $m = 5$  значимость нагрузок высокого уровня значительно возрастает. Гистограмма распределения параметра  $\bar{A}_i^m$ , характеризующего накопление усталостных повреждений, для сцепок с нормализацией в пригородном поезде имеет вид, приведенный на рис. 9.

Накопление усталостных повреждений соответствует площади приведенной гистограммы. Таким образом, для всего диапазона нагрузок и срока службы подвижного состава, для которого предназначена сцепка, требование к ресурсу сцепки  $T_p$  можно определить по формуле

$$T_p = \sum_{i=1}^k (\bar{A}_i^m N_i) T_c L_r 10^{-5} [n]^m, \quad (2)$$

где  $\bar{A}_i$  — среднее значение действующих сил класса нагрузки  $i$ , кН;  $T_c$  — срок службы подвижного состава, для которого предназначена сцепка (принимается равным 40 годам);  $L_r$  — средний годовой пробег подвижного состава, для которого предназначена сцепка (принимается равным 130 тыс. км для электропоездов с конструкционной скоростью 120 км/ч и 170 тыс. км для электропоездов с конструкционной скоростью 160 км/ч);  $[n]$  — допускаемый коэффициент запаса сопротивления усталости (принимается равным 1,7).

Для сцепок, эксплуатируемых на городских электропоездах, значение параметра  $\sum_{i=1}^k (\bar{A}_i^m N_i)$  ниже, чем для пригородного электропоезда. Однако разница их средних годовых пробегов (130 тыс. км у пригородного и 170 тыс. км у городского электропоезда) сокращает разницу между нагруженностью их сцепок за срок службы электропоезда (40 лет). Тем не менее наиболее тяжелые условия эксплуатации сцепок по показателю усталостной прочности наблюдаются на пригородных электропоездах, и параметры нагружен-

ности сцепок, зафиксированные на этих электропоездах, были приняты в качестве базовых при разработке требований к усталостной прочности.

Исходя из изложенного, значения требований к ресурсу сцепных устройств по нагруженности  $T_p$ , рассчитанные по формуле (2), составили:

- $7,38 \cdot 10^{15}$  кН<sup>4</sup> (для сцепок с нормализацией);
- $1,43 \cdot 10^{18}$  кН<sup>5</sup> (для сцепок с закалкой и отпуском).

Значения и размерности данного параметра не имеют понятного физического смысла, но устанавливают конкретные требования к сопротивлению усталости сцепок, которые возможно подтвердить испытаниями.

#### Методика испытаний на усталостную прочность.

Для подтверждения соответствия сцепок по показателю усталостной прочности разработана типовая методика таких испытаний, которые следует проводить путем циклического нагружения по одному из вариантов — с коэффициентом асимметрии цикла нагружения  $R = P_{\min} / P_{\max}$ , равным  $-1$ ;  $0$ ;  $0,1$  или  $0,2$  (где  $P_{\min}$  и  $P_{\max}$  — минимальное и максимальное значение силы при циклическом нагружении). Значения размаха (двойной амплитуды) сил и количества циклов нагружения, соответствующих значению требуемого ресурса сцепки по нагруженности, рассчитывают по формуле

$$A_s^m N_s = T_p K_R, \quad (3)$$

где  $A_s$  — эквивалентный размах сил, кН;  $N_s$  — эквивалентное количество циклов нагружения с амплитудой сил  $A_s$ ;  $T_p$  — значение требования к ресурсу сцепки по нагруженности, рассчитанное по формуле (2);  $K_R$  — поправочный коэффициент, учитывающий влияние коэффициента асимметрии цикла нагружения  $R$ .

Цель введения поправочного коэффициента заключается в следующем.

Предел выносливости при циклическом нагружении зависит не только от количества и размаха сил, но и от коэффициента асимметрии цикла нагружения. Наиболее тяжелым с точки зрения сопротивления усталости является симметричный знакопеременный цикл ( $R = -1$ ), которому преимущественно соответствуют продольные силы, передаваемые через сцепки электропоездов в эксплуатации.

Вместе с тем существовавшие ранее методики усталостных испытаний сцепных устройств не устанавливали требований к проведению испытаний с конкретными значениями коэффициента асимметрии цикла нагружения (так как это накладывало бы значительные ограничения на оснащённость испытательным оборудованием). Однако это не препятствовало проведению испытаний в различных условиях, значительно влияющих на их результаты. Значение поправочного коэффициента  $K_R$  показывает требуемое увеличение количества нагружений при измене-

нии коэффициента асимметрии цикла  $R$  для обеспечения равного усталостного воздействия.

Исходя из соотношения значений предела выносливости стали  $\sigma_R$  при различных значениях коэффициента асимметрии цикла нагружения  $R$ , представленного в [7], поправочный коэффициент в общем случае можно описать уравнением

$$K_R = \frac{\sigma_R}{\sigma_{-1}} = \frac{2}{(1-R) + \psi(1+R)}, \quad (4)$$

где  $\psi$  — коэффициент влияния асимметрии цикла нагружения, зависящий от предела прочности стали  $\sigma_B$ . В диапазоне  $-1 \leq R \leq 0,5$  он может быть определен по формуле, рекомендованной в ГОСТ 25.504–82 [8]:

$$\psi = 0,02 + 2 \cdot 10^{-4} \sigma_B. \quad (5)$$

Расчеты показали, что более чем двукратная разница пределов прочности сталей, применяемых при изготовлении деталей сцепных устройств, незначительно (по сравнению с коэффициентом асимметрии цикла нагружения) влияет на значения поправочного коэффициента.

В связи с этим, а также с учетом возможности применения в конструкции сцепных устройств сборочных единиц, изготовленных из разных марок сталей, в разработанной методике установлены следующие значения поправочного коэффициента  $K_R$ , учитывающего влияние коэффициента асимметрии цикла  $R$ :

$$K_{-1} = 1,00 \text{ при } R = -1;$$

$$K_0 = 1,70 \text{ при } R = 0;$$

$$K_{0,1} = 1,80 \text{ при } R = 0,1;$$

$$K_{0,2} = 1,95 \text{ при } R = 0,2.$$

Такие испытания позволяют подтвердить соответствие требованиям к сопротивлению усталости при многоцикловых режимах нагружения.

Проведенные измерения сил в сцепках электропоездов подтвердили, что максимальные зарегистрированные значения продольных сил, действующих на сцепки ( $+117/-128$  кН при сжатии/растяжении), намного ниже уровня, соответствующего нормативным требованиям к прочности сцепок ( $+1500/-1000$  кН при сжатии/растяжении). Следовательно, повышение существующих нормативов не требуется.

Снижение требований к прочности сцепок также нецелесообразно по следующим причинам:

- поглощающие аппараты, входящие в состав сцепных устройств электропоездов, реализуют требуемую энергоёмкость при нормативной силе  $1000$  кН. Уменьшение этой силы приведет к соответствующему снижению энергоёмкости существующих аппаратов,

потребуется изменения действующих нормативов и параметров аппаратов;

- некоторые модели вагонов электропоездов имеют в своем составе крэш-элементы с усилением срабатывания в интервале 1500–2500 кН. Следовательно, сцепки не должны разрушаться при таких силах и обеспечивать их передачу на крэш-элементы;

- допускается движение сцепки вагонов электропоезда в составе другого поезда локомотивной тяги, где уровень сил выше;

- в соответствии с Правилами технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [9] при сцеплении допускается подход локомотива к вагонам со скоростью 3 км/ч. Возникающая при этом сила определяется массой локомотива и параметрами поглощающих аппаратов сцепных устройств локомотива и электропоезда.

Указанный низкий уровень продольных сил в сцепках подтверждает, что их упругопластического деформирования в эксплуатации не происходит. Следовательно, усталостные повреждения могут возникать только при упругом деформировании, т. е. при многоцикловых режимах нагружения. Соответствие требованиям по сопротивлению усталости при малоцикловых режимах нагружения подтверждается результатами испытаний сцепок на прочность и специальных испытаний не требует.

Разработанные по результатам исследования технические требования к сцепным устройствам электропоездов и типовые методики их испытаний утверждены в качестве нормативного документа ОАО «РЖД» [10], что позволяет проводить исследовательские, предварительные и приемочные испытания этих устройств на соответствие единым нормативам по непротиворечивым типовым методикам.

**Заключение.** Результаты экспериментальных исследований показали, что наибольшей нагруженности подвергаются автосцепки СА-3, установленные на двенадцативагонном пригородном электропоезде ЭТ2М в соответствии с ГОСТ 3475–81.

Проведенный анализ спектра продольных сил в эксплуатации позволил установить нормативное распределение сил растяжения и сжатия для сцепных устройств электропоездов.

Для оценки соответствия сцепок электропоездов требованиям по показателю сопротивления усталости разработана типовая методика усталостных испытаний сцепных устройств на оборудовании с различными значениями коэффициента асимметрии цикла нагружения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О безопасности железнодорожного подвижного состава [Электронный ресурс]: технический регламент Таможенного союза (ТР ТС 001/2011): принят решением Комиссии Таможенного союза

от 15 июля 2011 г. № 710 (в редакции решения Совета Евразийской экономической комиссии от 14 сентября 2021 г. № 90). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902293438> (дата обращения: 15.08.2022).

2. Jackiewicz J. Coupler force reduction method for multiple-unit trains using a new hierarchical control system // *Railway Engineering Science*. 2021. Vol. 29. P. 163–182.

3. 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, утвержденными в августе 1986 г., феврале 1991 г. (ИУС 11–86, 5–91). М.: Изд-во стандартов, 1998. 6 с.

4. Беляев В.И., Ступин Д.А. Сцепные и автосцепные устройства железнодорожного подвижного состава. М.: ТрансИнфо, 2012. 414 с.

5. 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. 25 с.

6. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 316 с.

7. Жуков В.А., Михайлов Ю.К. Механика. Основы расчета и проектирования деталей машин: учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 2014. 348 с.

8. ГОСТ 25.504–82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости: дата введения 1983-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1982. 55 с.

9. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [Электронный ресурс]: утв. приказом Минтранса России от 23 июня 2022 г. № 250. URL: <https://docs.cntd.ru/document/351240235?marker=6560Ю> (дата обращения: 15.08.2022).

10. Технические требования к прочности и сопротивлению усталости при малоцикловых и многоцикловых режимах нагружения сцепных устройств электропоездов и методики испытаний [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 7 апреля 2022 г. № 934/п // АСПИЖТ (дата обращения: 15.08.2022).

## REFERENCES

1. O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [On the safety of railway rolling stock]. Technical regulations of the Customs Union (TR TS 001/2011): adopted by the decision of the Commission of the Customs Union dated July 15, 2011 No. 710 (as amended by the decision of the Council of the Eurasian Economic Commission dated September 14, 2021 No. 90). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902293438> (access date: 15.08.2022). (In Russ.).

2. Jackiewicz J. Coupler force reduction method for multiple-unit trains using a new hierarchical control system. *Railway Engineering Science*. 2021;(29):163-182.

3. GOST 3475–81. Ustroystvo avtostsepnogo podvizhnogo sostava zheleznnykh dorog kolei 1520 (1524) mm. Ustanovochnye razmery [Automatic coupling device for rolling stock of 1520 (1524) mm gauge railways. Installation dimensions]. Introduction date 1982-01-01. Reissue. Moscow: Publ. house of standards; 1998. 6 p. (In Russ.).

4. Belyaev V.I., Stupin D.A. Stsepnnye i avtostsepnnye ustroystva zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Manual and automatic coupling devices of railway rolling stock]. Moscow: Transinfo Publ.; 2012. 414 p. (In Russ.).

5. GOST 25.101–83. Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody skhematizatsii sluchaynykh protsessov nagruzheniya elementov mashin i konstruksiy i statisticheskogo predstavleniya rezul'tatov [Calculations and strength tests. Methods for schematization of random processes of loading of machine elements and structures and statistical presentation of results]. Introduction date 1984-07-01. Moscow; 1983. 25 p. (In Russ.).

6. Normy rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznnykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Calculation and Design Norms for

1520 mm Gauge Railway Cars of the Ministry of Railways (non-self-propelled)]. Moscow: GosNIIV-VNIIZhT Publ.; 1996. 316 p. (In Russ.).

7. Zhukov V.A., Mikhaylov Yu. K. Mekhanika. Osnovy rascheta i proektirovaniya detaley mashin [Mechanics. Fundamentals of calculation and design of machine parts]. Textbook. Moscow: INFRA-M Publ.; 2014. 348 p. (In Russ.).

8. GOST 25.504–82. Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody rascheta kharakteristik soprotivleniya ustalosti [Calculations and strength tests. Methods for calculating fatigue resistance characteristics]. Introduction date 1983-07-01. Moscow: Publ. house of standards; 1982. 55 p. (In Russ.).

9. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznikh dorog Rossiyskoy Federatsii [Rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation]. Approved by order of the Ministry of Transport of Russia dated June 23, 2022 No. 250. URL: <https://docs.cntd.ru/document/351240235?marker=656010> (access date: 15.08.2022). (In Russ.).

10. Tekhnicheskie trebovaniya k prochnosti i soprotivleniyu ustalosti pri malotsiklovyykh i mnogotsiklovyykh rezhimakh nagruzheniya stsepykh ustroystv elektropoezdov i metodiki ispytaniy [Technical requirements for endurance and fatigue resistance under low-cycle and high-cycle loading modes of electric train coupling devices and testing methods]. Order of Russian Railways Company dated April 7, 2022 No. 934/r. ASPIZH database (access date: 15.08.2022). (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### 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>

### Дмитрий Вячеславович ГОРСКИЙ,

технический эксперт, научный центр «Нетяговый подвижной состав и автотормозные системы поезда», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 957048, <https://orcid.org/0000-0002-9060-3432>

### Дмитрий Алексеевич СТУПИН,

канд. техн. наук, заведующий лабораторией, Центр испытаний и моделирования, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 444575, <https://orcid.org/0000-0002-2929-4087>

### Александр Николаевич КОНЬШКОВ,

заместитель директора научного центра «Динамика и прочность тягового подвижного состава», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), <https://orcid.org/0000-0001-6083-1840>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Vladimir I. BELYAEV,

Cand. of Sci. (Engineering), 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>

### Dmitriy V. GORSKIY,

Technical Expert, Non-Traction Rolling Stock and Automatic Brake Systems of Trains Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 957048, <https://orcid.org/0000-0002-9060-3432>

### Dmitriy A. STUPIN,

Cand. of Sci. (Engineering), Head of Laboratory, Centre for Testing and Modelling, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 444575, <https://orcid.org/0000-0002-2929-4087>

### Alexander N. KONYSHKOV,

Deputy Director of Dynamics and Strength of Traction Rolling Stock Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), <https://orcid.org/0000-0001-6083-1840>

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Владимир Игоревич БЕЛЯЕВ.** Руководство работой, организация, проведение испытаний, обработка и анализ результатов (25%).

**Дмитрий Вячеславович ГОРСКИЙ.** Проведение испытаний, обработка результатов (25%).

**Дмитрий Алексеевич СТУПИН.** Анализ результатов испытаний (25%).

**Александр Николаевич КОНЬШКОВ.** Разработка методики и проведение статистической обработки результатов испытаний (25%).

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Vladimir I. BELYAEV.** Work guidance, organisation and performing of testing, processing and analysis of the results (25%).

**Dmitriy V. GORSKIY.** Conducting the tests, processing the results (25%).

**Dmitriy A. STUPIN.** Analysis of the test results (25%).

**Alexander N. KONYSHKOV.** Development of a methodology and statistical processing of the test results (25%).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The authors have read and approved the final manuscript.*

**Прозрачность финансовой деятельности:** авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

**Financial transparency:** the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 23.08.2022, рецензия от первого рецензента получена 01.11.2022, рецензия от второго рецензента получена 03.11.2022, принята к публикации 15.11.2022.

The article was submitted 23.08.2022, first review received 01.11.2022, second review received 03.11.2022, accepted for publication 15.11.2022.



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.463:681.518.5

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-306-317

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



## РАЗРАБОТКА БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ КОЛЕС ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

**И. А. Гаджиев**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),  
Омск, Российская Федерация

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Целью исследования является разработка базовой конфигурации бортовой системы диагностирования технического состояния поверхности катания колес грузового вагона на ходу поезда и моделирование ее работы.

**Материалы и методы.** Теоретические исследования основаны на методах аналитической механики Лагранжа, теории колебаний и классической электродинамики. Моделирование проведено для плоской расчетной схемы с использованием численных методов. Обработка результатов выполнена с помощью разработанного алгоритма, реализованного на языке программирования системы Mathcad.

**Результаты.** Рассмотрена проблема негативного влияния локальных износов поверхности катания колес на состояние ходовой части вагона и рельсового пути, а также на безопасность движения поездов. Предложена базовая конфигурация бортовой системы диагностирования колесных пар грузового вагона с автономным источником электропитания мощностью до 10 Вт, одновременно выполняющим роль датчика. Построена математическая модель диагностических сигналов для локальных износов колеса, на основе результатов которой разработан алгоритм их выявления. Сформулирован критерий оценки геометрических параметров износов, и рассчитаны его пороговые значения для ползунов различной глубины. Определены сигналы тревоги, предполагающие снижение скорости движения поезда.

**Обсуждение и заключение.** Решение заявленной проблемы является важным как при эксплуатации существующих вагонов, так и при разработке новых, инновационных вагонов с нагрузкой на ось 27–30 тс и скоростями движения до 140 км/ч. Своевременное выявление локальных износов поверхности катания колес вагона позволит повысить уровень безопасности движения и сократить расходы на ремонт вагонов и рельсового пути.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** грузовой вагон, стратегия развития 2030, умный вагон, бортовая система диагностирования, колесная пара, неисправности поверхности катания, локальные износы, критерии неисправности, безопасность движения

**Благодарности:** автор выражает благодарность научному руководителю Ю. И. Матяшу и рецензентам за полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению статьи. С 2022 г. исследования выполняются при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках грантовой программы «УМНИК».

**Для цитирования:** Гаджиев И. А. Разработка бортовой системы диагностирования технического состояния поверхности катания колес грузовых вагонов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 4. С. 306–317. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-306-317>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.463:681.518.5

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-306-317

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

## DEVELOPMENT OF AN ON-BOARD SYSTEM FOR DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF THE TREAD SURFACE OF THE WHEELS OF WAGONS

**Ibragim A. Gadzhiev**

Omsk State Transport University,  
Omsk, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The aim of the study is to develop a basic configuration of the on-board system for diagnosing the technical condition of the wheels tread surface of a wagon while the train is running and to model its operation.

**Materials and methods.** The theoretical studies are based on the methods of Lagrange's analytical mechanics, the theory of oscillations and classical electrodynamics. The simulation was carried out for a flat design scheme using numerical methods. The results were processed using the developed algorithm implemented in the programming language of the Mathcad system.

**Results.** This article studies the problem of the negative impact of local wear of the wheel tread surface on the state of the carriage chassis of the car and the rail track, as well as on the safety of train traffic. The authors propose a basic configuration of an on-board system for diagnosing wheel pairs of a wagon with an autonomous power supply with a power of up to 10 W, which simultaneously acts as a sensor. A mathematical model of diagnostic signals for local wheel wear has been constructed, and an algorithm for their detection has been developed based on the results. A criterion for estimating the geometric parameters of wear is formulated and its threshold values for slots of various depths are calculated. Alarms have been identified that suggest a reduction in the speed of the train.

**Discussion and conclusion.** The solution of the stated problem is important both in the operation of existing cars and in the development of new, innovative cars with an axle load of 27–30 tf and speeds of up to 140 km/h. Timely detection of local wear of the tread surface of wagon wheels will increase the level of traffic safety and reduce the cost of repairing cars and rail tracks.

**KEYWORDS:** wagon, development strategy 2030, smart car, on-board diagnostic system, wheel pair, tread surface failures, local wear, failure criteria, traffic safety

**Acknowledgments:** The author expresses his gratitude to his scientific advisor Yu. I. Matyash and the reviewers for useful comments and advice that contributed to the improvement of the article. Since 2022, research has been carried out with the financial support of the Innovation Promotion Fund under the UMNİK grant programme.

**For citation:** Gadzhiev I.A. Development of an on-board system for diagnosing the technical condition of the tread surface of the wheels of wagons. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(4):306-317. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-306-317>.

**В**ведение. Величина минимального межремонтного пробега является одним из основных критериев отнесения грузового вагона к инновационным. Однако, несмотря на значительно возросшую за последние 9 лет долю таких вагонов в эксплуатации (с 0,5% от парка на конец 2013 г. до 17%, или 210 тыс. ед., на июль 2022 г.) [1], ежегодное поступление грузовых вагонов в текущий отцепочный ремонт (ТОР) на протяжении этого времени остается стабильно высоким [2, 3]. В период 2008–2015 гг. произошло увеличение количества отцепок на 103% с последующим сохранением этого уровня до настоящего времени. При этом рост грузооборота в 2008–2021 гг. происходил плавно и составил лишь 25%, т. е. не являлся фактором, вызвавшим рост отцепок в ТОР.

Наибольшее число отцепок происходит по причине неисправности колесных пар (40,8% в 2021 г.) [2], причем колеса повышенной твердости, в том числе широко применяемые и на инновационных вагонах, оказываются более подверженными локальным износам поверхности катания (ПК), чем обычные (рис. 1) [4].

Также стоит отметить факт значительного «омоложения» парка в течение последних 12 лет, в том числе за счет приобретения новых вагонов и массового исключения старых в период 2014–2017 гг. [3]. Однако и это не привело к снижению количества отцепок. Динамика изменения величины общего парка грузовых вагонов России приведена на рис. 2 [5].

В современных условиях интенсификации грузоперевозочного процесса несвоевременное выявление неисправностей колесных пар у планируемых к внедрению инновационных вагонов с нагрузкой на ось 27–30 тс станет причиной длительных повышенных динамических нагрузок на их узлы и верхнее строение пути. Таким образом, существующий «точечный» контроль напольными и постовыми средствами диагностирования

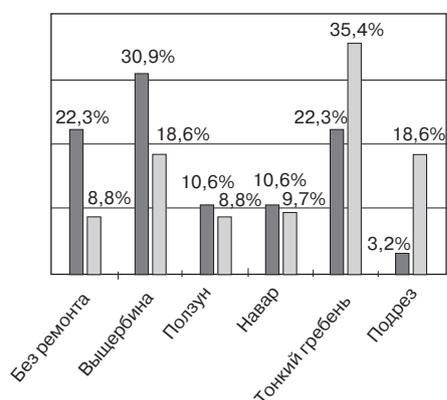


Рис. 1. Распределение повреждений цельнокатанных колес:

■ — колесо повышенной твердости; □ — колесо обычной твердости

Fig. 1. Damage distribution of whole-rolled wheels:

■ — increased hardness wheel; □ — normal hardness wheel

становится недостаточным, так как эксплуатируемые системы и комплексы располагаются на крупных станциях и не способны сообщать актуальную информацию о техническом состоянии грузовых вагонов на протяжении всего маршрута следования поезда. Разработка бортовой системы диагностирования ходовой части грузового вагона становится одним из наиболее актуальных путей повышения безопасности движения поездов.

При разработке базовой конфигурации системы диагностирования возникает задача определения узла для первоочередного контроля. С целью ее решения был проведен анализ неисправностей грузовых вагонов, оказывающих значительное влияние на уровень безопасности движения.

**Актуальность проблемы своевременного выявления локальных износов ПК колес на ходу поезда.**

При проведении анализа установлено, что в соответствии с Правилами технической эксплуатации железных дорог РФ (ПТЭ) при обнаружении в пути следования на колесе ползуна или наvara глубиной от 2 до 6 мм разрешается довести такой вагон без отцепки от поезда со скоростью не выше 15 км/ч до ближайшей железнодорожной станции, где колесная пара должна быть заменена. Таким образом, пройденный путь от места возникновения повреждения до контрольного пункта или ПТО, где повреждение будет зафиксировано, может достигать 100 км и более [6, с. 13], что проиллюстрировано схемой на рис. 3. При этом каждые 3 м будет происходить ударное взаимодействие колеса и рельса, разрушающее подшипник буксового узла, заклинивание которого приведет к скорому излому оси колесной пары и сходу вагона.

Из результатов разных исследований взаимодействия в системе «колесо — рельс» известно о влиянии ползуна на следующие элементы:

- ходовая часть: при наличии на ПК колес повреждений в виде ползунов и наваров от 3 мм возникают импульсные ударные силы величиной 525 кН, превышающие в 2 раза и более силы статического воздействия колеса на рельс [7];

- обод колеса: процесс образования ползунов размером более 0,7–0,9 мм напрямую приводит к изменению структуры металла и упрочнению поверхностного слоя в 1,5–3 раза. Наличие таких высокотвердых слоев в процессе эксплуатации колесной пары приводит к образованию подповерхностных трещин и отслаиванию металла, а ударное взаимодействие ползуна с рельсом — к образованию выщербин [8];

- боковые рамы: при наличии ползунов глубиной более 3 мм и скорости движения 40–70 км/ч в зоне R55 буксового проема рамы возникают напряжения до 50–65 МПа, превышающие предел выносливости для боковой рамы  $\sigma_{-1} = 45$  МПа [9];

- рельсы: для величины ползуна глубиной 2 мм при жесткости пути более  $200 \cdot 10^6$  Н/м в диапазо-

не скоростей выше 25 км/ч величины контактных давлений превышают предел контактной выносливости поверхности рельсов, который составляет  $\sigma_{\text{конт}} = (1250 \pm 60)$  МПа [10].

**Анализ статистических данных.** В соответствии с методикой ПКБ ЦВ [11] общее количество обтачиваемых колес в период 2016–2020 гг. в пересчете на год составило 5704 тыс. шт., в том числе при ТОР среднее количество обточек составляет 2053 тыс., при плановых видах ремонта — 3651 тыс. колес. В связи с тем, что при выявлении ползунов и наваров свыше 1 мм вагон должен быть передан в текущий ремонт при первой возможности, примем допущение, что при плановых видах ремонта обточек по этим неисправностям не производится. Это допущение также основано на том, что износы размером менее 1 мм будут при эксплуатации вагона затираться тормозными колодками, а также, пластически деформируясь, переходить в неравномерный прокат.

Исходя из статистических данных различных публикаций, например [4], ежегодно среднее количество обточек в период с 2017 по 2021 г. по ползунам и наварам в сумме составляет около 18 %. Так как в этих источниках нет прямого указания на то, является ли эта доля частью всего объема обточек или лишь произведенных при ТОР, то примем меньшее значение, или 369,5 тыс. колес.

Таким образом, каждый год должно было происходить от 46,2 тыс. до 92,4 тыс. отцепок четырехосных вагонов, в зависимости от того, были ли износы выявлены на колесных парах (КП) обеих тележек или только одной. При этом в 2021 г. по ползунам и наварам было произведено всего около 2,7 тыс. отцепок (0,5 % от всех отцепок по неисправностям КП) [2], т. е. отличие в 17 раз и более. Для сравнения: в период с 2004 по 2015 г. в среднем производилось 17,4 тыс. отцепок в год по ползунам (5–10 % от всех отцепок по неисправностям КП), после чего начался спад, который не имел никаких предпосылок. Напротив, массово появившиеся колеса повышенной твердости оказались более подвержены локальным износам [4].

Из публикации [12] известно, что в 2020 г. в Узбекистане ползуны составляли около 9 % отцепок по неисправностям колес, тогда как в России всего около 0,7 %. Такое значительное отличие не может объясняться ни разницей в размерах парков вагонов, ни их техническим состоянием, так как по остальным видам износов КП соответствующие доли примерно равны.

Заслуживает внимания еще и тот факт, что в 2013 г. одновременно с резким снижением числа отцепок по ползунам начался рост отцепок по выщербинам (с 79,3 тыс. до 157,6 тыс. вагонов к 2021 г., или +98,7 %), что отражено на рис. 4 [2, 13, 14].

Из этого следует, что на каком-то из этапов формирования статистических данных происходит их искажение. Можно предположить, что выявленные ползуны

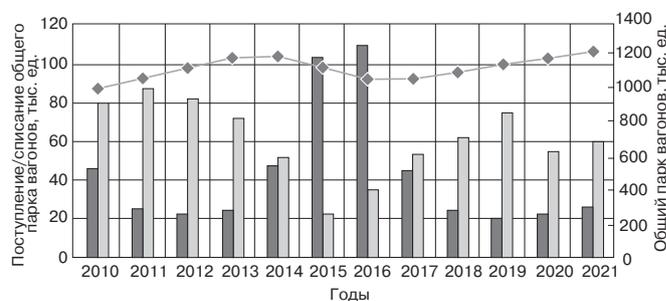


Рис. 2. Динамика списания и закупок грузовых вагонов за период с 2010 по 2021 г.:

■ — списание; □ — поступление; ◆ — парк на конец года

Fig. 2. Dynamics of checkings and purchases of wagons for the period from 2010 to 2021 г.:

■ — checking; □ — acquisition; ◆ — freight car fleet at the end of the year



Рис. 3. Условная схема гарантийного участка: ПТО — пункт технического обслуживания; КП — контрольный пост

Fig. 3. Conditional diagram of the guarantee section: ПТО — maintenance point; КП — control post

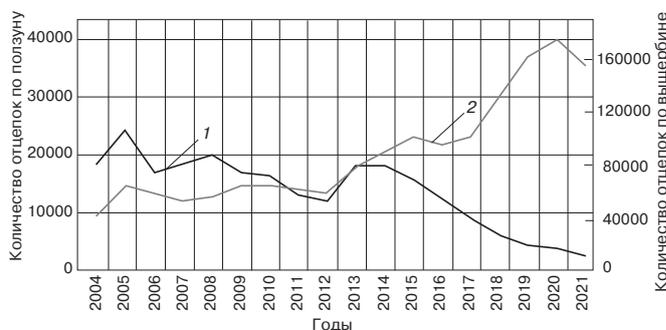


Рис. 4. Статистика отцепок в ТОР грузовых вагонов по ползунам и выщербинам за период с 2004 по 2021 г.: 1 — ползуны; 2 — выщербины

Fig. 4. Statistics of uncouplings for the current uncoupling repair of wagons for slots and dents for the period from 2004 to 2021: 1 — slots; 2 — dents

регистрируются как выщербины, например, с кодом неисправности 611 (выщербины по светлым пятнам, ползунам, наварам) [15], так как факт выявления ползуна может повлечь за собой необходимость установления виновных в причине его возникновения, или какая-то доля КП с ползунами допускается в эксплуатацию до тех пор, пока на их поверхности не образовывается выщербина.

Опираясь на приведенные разнородные данные, можно утверждать, что в реальности количество

отцепок по ползунам в статистике занижено более чем на порядок, и эта неисправность является довольно частой.

С учетом того, какое негативное влияние оказывают ползуны на путь и ходовую часть вагона, а также время, в течение которого они могут оставаться не обнаруженными, рассматриваемая проблема своевременного выявления локальных износов колеса является актуальной для железнодорожного транспорта, а также приоритетной при разработке средств бортового диагностирования. Решение данной проблемы

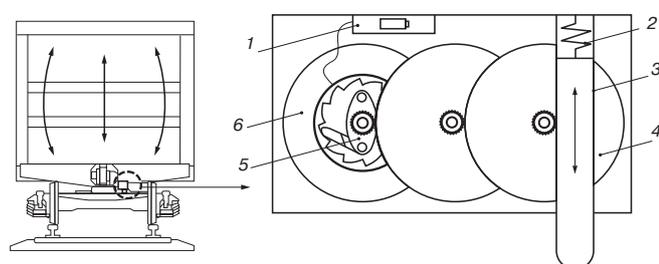


Рис. 5. Схема электромеханической части бортовой системы технического диагностирования ПК колес грузовых вагонов в базовой конфигурации:

1 — аккумулятор с контроллером заряда; 2 — пружина; 3 — шток с зубчатой рейкой; 4 — мультипликатор; 5 — храповой механизм; 6 — генераторная часть

Fig. 5. Diagram of the electromechanical part of the on-board system for technical diagnostics of the wheels tread surface of wagons in the basic configuration:

1 — battery with charge controller; 2 — spring; 3 — stock with gear rack; 4 — multiplier; 5 — ratchet mechanism; 6 — generator part

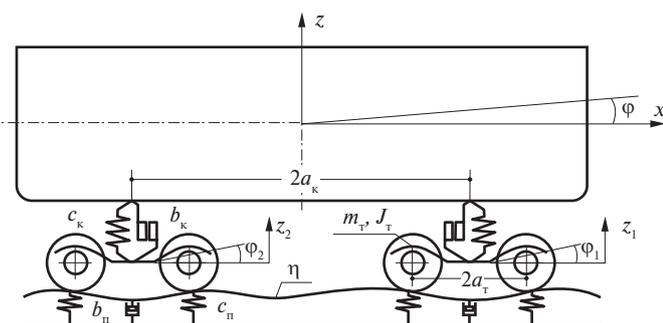


Рис. 6. Расчетная схема четырехосного полувагона:

$c_k, c_n$  — жесткость рессорного подвешивания кузова и пути;  $b_k, b_n$  — показатели демпфирования кузова и пути;  $a_k, a_t$  — половина длин баз кузова и тележек;  $m_t, J_t$  — масса тележки;  $J_t$  — момент инерции тележки;  $\varphi, \varphi_1, \varphi_2$  — угловые перемещения кузова и тележек;  $z, z_1, z_2$  — вертикальные перемещения кузова и тележек;  $\eta$  — неровность пути

Fig. 6. Calculation model of a four-axle open-box wagon:

$c_k, c_n$  — stiffness of the spring suspension of the body and the track;  $b_k, b_n$  — damping indicators of the body and the track;  $a_k, a_t$  — half lengths of bases of the body and the bogies;  $m_t$  — mass of the bogie;  $J_t$  — the moment of inertia of the bogie;  $\varphi, \varphi_1, \varphi_2$  — angular movements of the body and the bogies;  $z, z_1, z_2$  — vertical movements of the body and the bogies;  $\eta$  — track irregularity

особенно важно при производстве новых грузовых вагонов с нагрузкой на ось 27–30 тс и скоростями движения до 140 км/ч.

**Предлагаемое техническое решение.** Автономность разрабатываемой бортовой системы достигается за счет преобразования механической энергии колебания кузова вагона в электрическую. Как следствие, генерируемое напряжение напрямую зависит от амплитуды и частоты этих колебаний, что теоретически позволяет использовать устройство в режиме датчика, например, для контроля ходовых частей вагона.

Такой подход позволит сделать базовую конфигурацию устройства беспроводной с размещением под кузовом (по одному устройству над каждой тележкой), сохранив при этом возможность дальнейшего расширения спектра выявляемых неисправностей. Процесс внедрения системы минимально усложнит технологию обслуживания и ремонта грузовых вагонов, а также их конструкцию.

Принцип работы устройства (рис. 5) заключается в следующем: при движении грузового вагона по рельсовой колее происходят колебания его кузова, и, как следствие, происходят колебания самого устройства, жестко закрепленного на хребтовой балке рамы вагона. В результате этого подпружиненный шток 3, упирающийся в балочку авторежима, начинает совершать возвратно-поступательные движения, которые через мультипликатор 4 приводят во вращение вал генераторной части 6, что в свою очередь обуславливает наведение электродвижущей силы (ЭДС) в катушках. Использование в конструкции храпового механизма 5 обеспечивает одностороннее вращение вала. На устройство получен патент на полезную модель [16].

Таким образом, регистрация выходного напряжения устройства (сигнала) позволяет выявлять локальные износы поверхности катания КП, вызывающие периодическое ударное взаимодействие колеса и рельса: ползуны, навары, различные выщербины, создающие возмущения, аналогичные ползунам. На данном этапе базовая конфигурация системы не будет различать вид неисправности, а сможет лишь определять наличие локального износа ПК и оценивать его размер, исходя из предположения, что это ползун.

**Математическое моделирование регистрируемых сигналов.** На основе энергетического метода Лагранжа сформирована математическая модель, описывающая влияние ползунов на выходное напряжение генераторной части устройства электропитания. В связи с тем, что односторонние ползуны выявляются менее чем в 5% случаев от всех отцепок по этой неисправности [14], принята плоская расчетная схема, представленная на рис. 6.

Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений в матричном виде:

$$M\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = F(t), \quad (1)$$

где  $M, B, C$  — матрицы инерционных, диссипативных и жесткостных коэффициентов соответственно;  $q, \dot{q}, \ddot{q}$  — обобщенная координата, ее первая и вторая производные по времени соответственно;  $F(t)$  — внешнее возмущение.

Уравнения движения кузова и тележек представляют собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} m_k \ddot{z}_k + b_k (2\dot{z}_k - \dot{z}_1 - \dot{z}_2) + c_k (2z_k - z_1 - z_2) &= 0; \\ J_k \ddot{\phi}_k + a_k b_k (2a_k \dot{\phi}_k - \dot{z}_1 + \dot{z}_2) + \\ &+ a_k c_k (2a_k \phi_k - z_1 + z_2) = 0; \\ m_n \ddot{z}_1 - b_n (\dot{z}_k - \dot{z}_1 + a_n \dot{\phi}_k) - c_n (z_k - z_1 + a_n \phi_k) + \\ &+ 2b_n \dot{z}_1 + 2c_n z_1 = b_n (\dot{\eta}_1 + \dot{\eta}_2) + c_n (\eta_1 + \eta_2); \\ J_n \ddot{\phi}_1 + 2b_n a_n^2 \dot{\phi}_1 + 2c_n a_n^2 \phi_1 = \\ &= a_n (b_n (\dot{\eta}_1 - \dot{\eta}_2) + c_n (\eta_1 - \eta_2)); \\ m_n \ddot{z}_2 - b_n (\dot{z}_k - \dot{z}_2 - a_n \dot{\phi}_k) - c_n (z_k - z_2 - a_n \phi_k) + \\ &+ 2b_n \dot{z}_2 + 2c_n z_2 = b_n (\dot{\eta}_3 + \dot{\eta}_4) + c_n (\eta_3 + \eta_4); \\ J_n \ddot{\phi}_2 + 2b_n a_n^2 \dot{\phi}_2 + 2c_n a_n^2 \phi_2 = \\ &= a_n (b_n (\dot{\eta}_3 - \dot{\eta}_4) + c_n (\eta_3 - \eta_4)), \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где  $m_k, m_n$  — масса кузова и тележек соответственно, кг;  $b_k, b_n$  — показатели демпфирования кузова и пути, Н·с/м;  $c_k, c_n$  — жесткость рессорного подвешивания кузова и пути, Н/м;  $z_k, z_1, z_2$  — вертикальные перемещения кузова и тележек, м;  $\phi_k, \phi_1, \phi_2$  — угловые перемещения кузова и тележек, м;  $\eta_1 \dots \eta_4$  — неровность под каждой из КП, м;  $a_k, a_n$  — половина длин баз кузова и тележек, м;  $J_k, J_n$  — моменты инерции кузова и тележек, кг·м<sup>2</sup>.

При моделировании гаситель колебаний сухого трения заменен на эквивалентный по действию гидравлический. Условный коэффициент демпфирования  $b_k$  был определен исходя из принципа равенства энергии, накапливаемой в системе и расходуемой гасителем за один период колебаний. Также при моделировании принимались следующие допущения и ограничения:

- кузов вагона и тележки представляют собой твердые тела, имеющие по две степени свободы;
- движение колес происходит без отрыва от рельсов;
- неровности на обоих нитях рельсовой колеи одинаковые;
- сила трения в фрикционных гасителях пропорциональна сжатию рессорных комплектов;
- рельсовый путь упруговязкий.

Далее рассматриваются колебания полностью загруженного вагона и порожнего, но модель также позволяет производить расчет для любой загрузки, изменяя входные данные.

В качестве исходной неровности пути принята так называемая двугорбая неровность, предложенная проф. Н. Н. Кудрявцевым [17]. Для каждой КП, кроме первой по ходу движения, она задана со смещением по времени исходя из размеров баз тележек и кузова. Запись функции, описывающей данную неровность, и ее производная будут иметь вид

$$\eta(t) = |A \sin(\omega t) + B \sin(3\omega t)| - 0,0025; \quad (3)$$

$$\frac{d\eta}{dt} = (\text{sign}(A \sin(\omega t) + B \sin(3\omega t))) \times (A \cos(\omega t) \omega + 3B \cos(3\omega t) \omega), \quad (4)$$

где  $A$  и  $B$  — характеристики прогиба рельсового звена, м;  $\omega$  — угловая частота, рад/с.

Для моделирования возмущения от локальных износов на КП используется модель единичной неровности пути, имитирующая воздействие ползуна с закатанными краями [18]. Для ее циклического повторения функция задана рекурсивно с помощью встроенного в систему Mathcad языка программирования. Результат суммируется с функцией, определяющей неровность для четвертой по ходу движения КП вагона, после чего рассчитывается скорость изменения воздействия итоговой неровности. Модели неровностей пути представлены на рис. 7.

По результатам расчетов с помощью метода Рунге — Кутты получены значения скоростей и вертикальных линейных перемещений тележек, кузова и штока устройства при скорости движения 60 км/ч (рис. 8).

Дальнейшее моделирование производится с использованием полученных расчетных данных о движении штока устройства, определенных как разность между перемещениями центра неподрессоренных масс опорной тележки и пятником кузова с учетом его наклона от колебаний галоирования, т. е. при расчете принимается допущение, что шток находится над геометрическим центром тележки. При этом смещение относительно продольно-вертикальной плоскости можно минимизировать, разместив шток ближе к краю корпуса устройства, а также сократив зазор между самим корпусом и хребтовой балкой. Таким образом, колебания боковой качки будут давать небольшую постоянную составляющую по всей длительности сигнала, которая может быть учтена при его обработке (усреднена за счет увеличения длительности регистрации сигнала).

Более критичным может оказаться смещение штока относительно поперечно-вертикальной плоскости тележки, так как один и тот же уровень сигнала будет создаваться различными по глубине ползунами в зависимости от возникновения на той или иной КП одной тележки. Например, при определении системой ползунов глубиной 2 мм это может оказаться либо завышением оценки на 0,3 мм на ближней к штоку КП

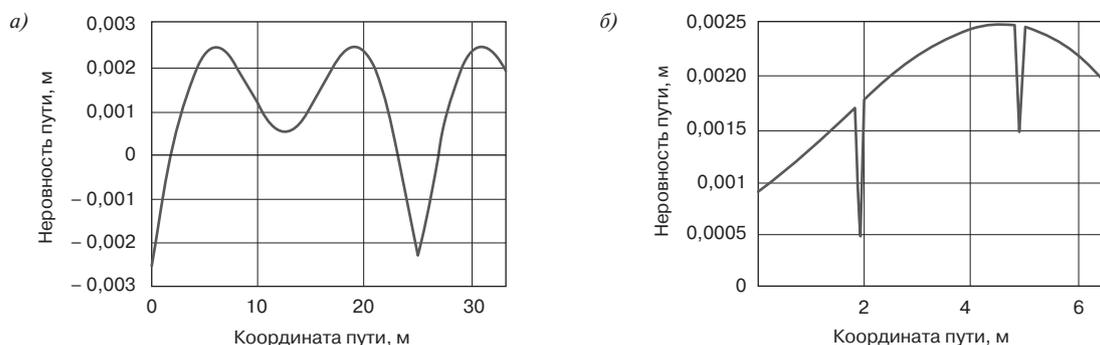


Рис. 7. Графические представления моделей:

*a* — неровности пути; *b* — неровности пути, имитирующей ползуны глубиной 1 мм на четвертой по ходу движения КП (фрагмент)

Fig. 7. Graphical representations of models:

*a* — of the track irregularity; *b* — of the track irregularities, simulating slots 1 mm deep on the fourth wheel pair along the movement path (fragment)

(в действительности 1,7 мм), либо занижением на 0,4 мм на дальней (в действительности 2,4 мм). Так как выявление ползунов глубиной свыше 2 мм является основанием для существенного снижения скорости до 15 км/ч, то эту погрешность можно компенсировать занижением оценки на 0,3–0,4 мм, что не является критичным с учетом одинакового уровня снижения скорости вплоть до 6 мм.

Уравнение, описывающее процесс формирования сигналов, представляет собой выражение для ЭДС обмотки якоря. Для всего генератора при соединении обмоток «звездой» оно принимает вид

$$e_r = Blv \sin \alpha n_{\text{пров.ф}} \sqrt{3}, \quad (5)$$

где  $e_r$  — ЭДС в контуре при частоте вращения 1 об/мин;  $B$  — значение магнитной индукции, Тл;  $l$  — активная длина проводника, м;  $v$  — скорость перемещения проводника, м/с;  $\alpha$  — угол между векторами скорости проводника и магнитной индукции;  $n_{\text{пров.ф}}$  — количество витков на одну фазу.

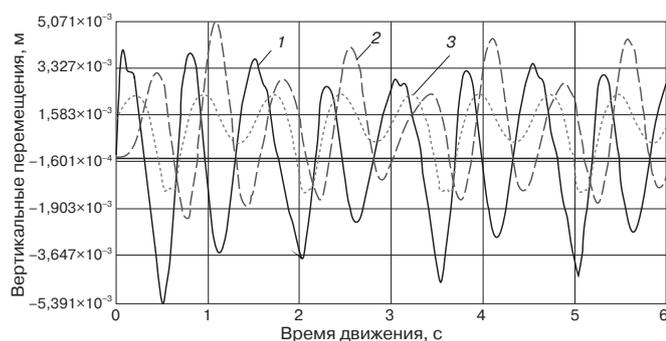


Рис. 8. Результаты моделирования вертикальных колебаний: 1 — штока устройства; 2 — кузова вагона; 3 — опорной тележки

Fig. 8. Results of simulation of vertical oscillations:

1 — of the device rod; 2 — of the wagon bodies; 3 — of the dolly

ЭДС ( $E_r$ , В), выходное напряжение ( $U_r$ , В) и ток генератора ( $I_r$ , А) при этом будут равны

$$E_r = e_r \frac{n_p}{60}; \quad (6)$$

$$U_r = E_r - U_{\text{акк}}; \quad (7)$$

$$I_r = \frac{U_r}{R_r}, \quad (8)$$

где  $n_p$  — частота вращения ротора генератора, об/мин;  $U_{\text{акк}}$  — зарядное напряжение аккумулятора с учетом падения напряжения на диодном мосту, В;  $R_r$  — сопротивление обмоток генератора с учетом соединения «звездой», Ом.

При прекращении механического воздействия на шток мультипликатор и ротор генератора продолжают вращение под действием сил инерции, поэтому необходимо учесть электромагнитный момент якоря, стремящийся замедлить вращение всего механизма (трением в подшипниках и мультипликаторе пренебрежем):

$$M_{\text{эм}} = B l I_r n_{\text{пров.ф}} r_{\text{я}}, \quad (9)$$

где  $r_{\text{я}}$  — радиус якоря по средней линии магнитов, м.

После расчета электромеханических и геометрических параметров устройства смоделированы зависимости частоты вращения ротора, напряжения и тока генератора от времени. На рис. 9 представлены графики сигналов исправных колес и колес с различными ползунами при движении со скоростью 60 км/ч. Из результатов моделирования определена максимальная выходная мощность устройства электропитания, которая составляет 10 Вт.

**Разработка алгоритма обработки сигнала и определение критерия оценки неисправности.** Из анализа зависимостей (рис. 9) следует, что при имитации локальных

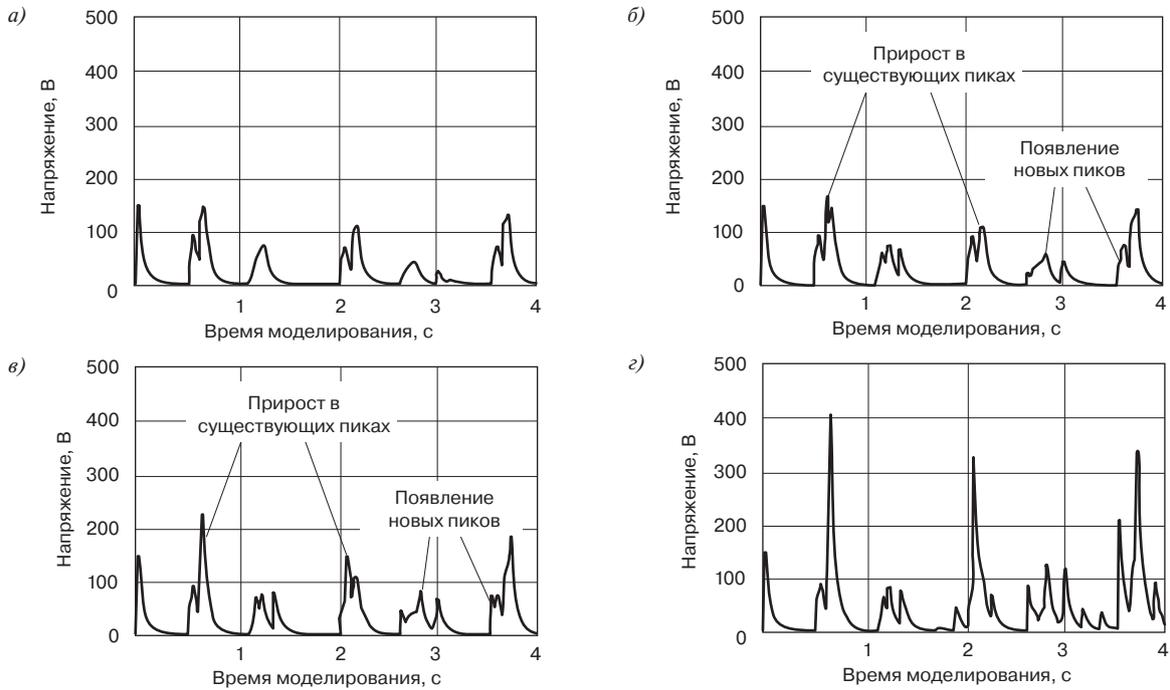


Рис. 9. Изменение выходного напряжения при исправных колесах (а) и колесах с ползунами глубиной 1 мм (б), 2 мм (е) и 4 мм (z)  
 Fig. 9. Change in output voltage with serviceable wheels (a) and wheels with slots 1 mm deep (б), 2 mm deep (e) and 4 mm deep (z)

повреждений колес в выходной характеристике устройства увеличиваются существующие пики электрического напряжения и появляются дополнительные, причем периодичность их равна  $t_{повр} = \pi D / v$ , где  $D$  — диаметр колеса, а  $v$  — скорость движения вагона (рис. 10).

При равном количестве измеренных точек  $n$  в сигналах без неисправности и с неисправностью из рис. 10 справедливо следующее выражение:

$$\sum U'_r > \sum U_r, \quad (10)$$

где  $\sum U_r$  — сумма значений электрического напряжения для сигнала при исправных КП,  $U_r = \sum_{i=1}^n U_i$ , В;  $\sum U'_r$  — аналогичная сумма для сигнала от неисправной КП,  $U'_r = \sum_{i=1}^n U'_i$ , В;  $i$  — порядковый номер значения;  $n$  — количество измеренных значений через интервал  $t_{повр}$ .

Исходя из этого разработан алгоритм для расчета  $\sum U'_r$  и  $\sum U_r$  (рис. 11), выполняющийся следующим образом. После формирования массива  $Ug$  с измеренными значениями напряжения за фиксированный период времени  $t_{изм}$  происходит определение всех локальных максимумов (пиков) напряжения и формируется массив с их временными координатами  $U_p$  (в виде их индексов в массиве  $Ug$ ). Далее для каждого пика производится суммирование значений напряжения для всех моментов времени, удаленных от обрабатываемого пика с периодичностью  $t_{повр}$ , и выбирается максимальная из этих сумм.

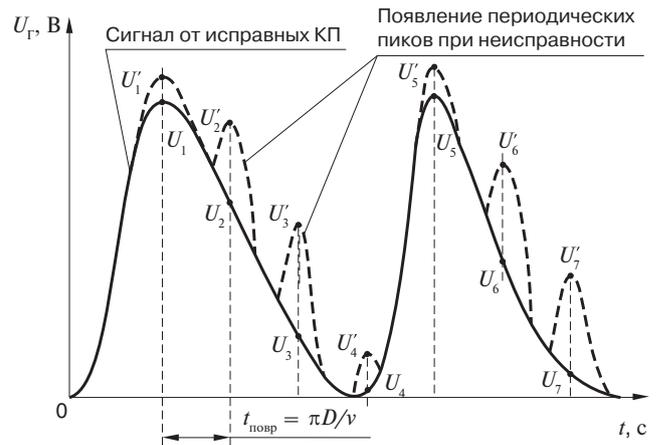


Рис. 10. Периодическое изменение сигнала при наличии неисправности КП:  
 $U'_1...U'_7$  — значения электрического напряжения при наличии неисправности через интервал времени  $t_{повр}$ , соответствующий одному обороту КП (штриховая линия);  $U_1...U_7$  — аналогичные значения сигнала в случае исправных КП (сплошная линия)

Fig. 10. Periodic signal change in the presence of a malfunction of the wheel pair:  
 $U'_1...U'_7$  — the values of the electrical voltage in the presence of a malfunction after a time interval  $t_{повр}$ , corresponding to one revolution of the wheel pair (dashed line);  $U_1...U_7$  — similar signal values in case of serviceable wheel pairs (solid line)

За счет этого импульсы от единичных неровностей пути и стыков будут давать меньшие значения сумм через интервал  $t_{повр}$ , чем сумма более частых пиков от

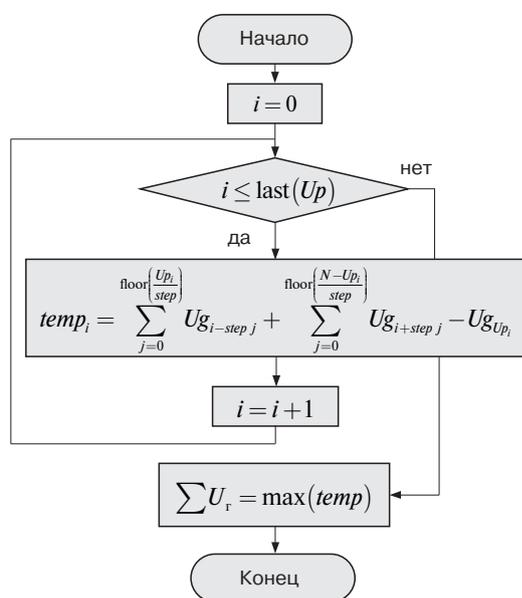


Рис. 11. Блок-схема алгоритма расчета  $\sum U_r'$  и  $\sum U_r$ :  
*i* — индекс элемента массива значений напряжения  $U_g$ ;  
*temp* — временной массив с суммами; *step* — периодичность удара ползуна соответствующая  $t_{повр}$ ; *last()* — функция, определяющая индекс последнего элемента массива; *floor()* — функция округления; *max()* — функция для определения наибольшего элемента массива

Fig. 11. Block diagram of the algorithm for calculating  $\sum U_r'$  and  $\sum U_r$ :  
*i* — element index of the array of voltage values  $U_g$ ;  
*temp* — temporal array with sums; *step* — the periodicity of the impact of the slider corresponding to  $t_{повр}$ ; *last()* — a function that determines the index of the last element of the array; *floor()* — rounding function; *max()* — a function to determine the largest element of the array

ползуна, и, как следствие, они будут проигнорированы алгоритмом (по условию выбора наибольшей из сумм). При возникновении чрезмерно высоких единичных пиков можно дополнительно предусмотреть их фильтрацию.

Таким образом, в качестве критерия оценки размеров локальных износов  $\delta$  принимается прирост  $\sum U_r'$  относительно  $\sum U_r$ , рассчитанных за равные промежутки времени, т. е.

$$\delta = \frac{\sum U_r' - \sum U_r}{\sum U_r} 100\%. \quad (11)$$

Контроль возникновения неисправностей проводится на прямых участках пути при установившемся режиме движения после каждой остановки подвижного состава на перегоне. Нормируемое значение  $\sum U_r$  предлагается определять как усредненное по ближайшим вагонам, так как вероятность одновременного возникновения ползунов у группы вагонов мала. В настоящее время ведется разработка алгоритма, использующего только текущий регистрируемый сигнал для расчета нормируемого  $\sum U_r$ , т. е. без данных от соседних вагонов, что позволит исключить влияние их технического состояния на результат контроля.

После обработки результатов моделирования получены следующие пороговые значения критерия  $\delta$  для грузового вагона при скорости 60 км/ч (табл. 1, рис. 12). Пороговое значение показывает прирост сигнала, при котором происходит распознавание повреждения с глубиной *h* на ПК колеса.

Из графиков следует, что оптимальная длительность регистрации сигнала  $t_{изм}$  составляет около 18–24 с, так как в этом диапазоне для груженого вагона (рис. 12, а) отсутствуют пересечения пороговых значений критерия  $\delta$  для ползунов 1 и 2 мм, что исключает их ошибочное определение. Так как износы до 1 мм допускаются в эксплуатацию, то значения для  $h=1$  в табл. 1 являются верхним пороговым значением для исправного состояния КП.

Полученные данные и алгоритм предлагается использовать при оценке геометрических параметров

Таблица 1

Результаты обработки смоделированных сигналов при различной длительности регистрации сигнала  $t_{изм}$

Table 1

The results of processing simulated signals at different duration of signal registration  $t_{изм}$

<i>h</i> , мм	Пороговые значения критерия $\delta$ , %									
	$t_{изм} = 6$ с		$t_{изм} = 12$ с		$t_{изм} = 18$ с		$t_{изм} = 24$ с		$t_{изм} = 30$ с	
	груз.	порож.	груз.	порож.	груз.	порож.	груз.	порож.	груз.	порож.
1	36,8	13,7	36,5	17,4	29,0	19,1	26,8	11,4	25,3	10,1
2	23,4	89,1	40,4	89,7	66,0	81,0	60,8	72,2	64,3	65,5
4	142,8	331,0	158,2	378,3	216,3	314,3	203,1	299,7	210,7	289,2
6	566,8	599,9	680,6	761,9	539,4	631,9	536,6	597,5	534,8	591,5

Примечание: груз. — груженный вагон; порож. — порожний вагон.

Note: груз. — loaded wagon; порож. — empty wagon.

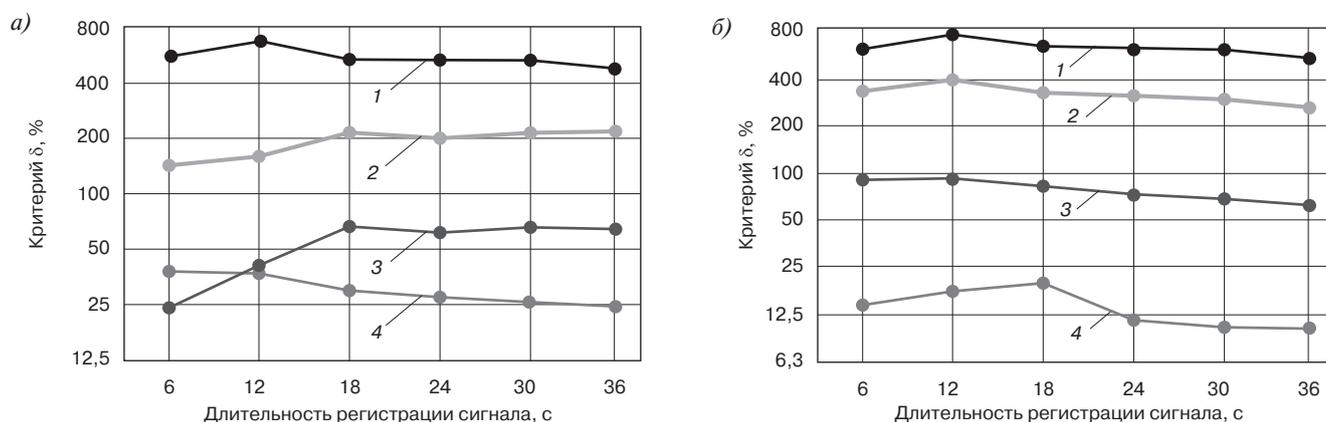


Рис. 12. Пороговые значения критерия оценки глубины ползунов при скорости 60 км/ч (масштаб оси ординат логарифмический): а — грузеный вагон; б — порожний вагон: 1 — 6 мм; 2 — 4 мм; 3 — 2 мм; 4 — 1 мм

Fig. 12. Threshold values of the criterion for estimating the depth of the slots at a speed of 60 km/h (the scale of the y-axis is logarithmic): а — loaded wagon; б — empty wagon: 1 — 6 mm; 2 — 4 mm; 3 — 2 mm; 4 — 1 mm

Таблица 2

Вырабатываемые системой сообщения по результатам диагностирования на ходу поезда

Table 2

System generated messages according to the results of diagnostics during the movement of the train

Сообщение бортовой системы диагностирования	Состояние грузового вагона	Значения критерия $\delta$	Требуемое снижение скорости
«Тревога 1»	Груженный	Свыше 66 %	До 15 км/ч
	Порожний	Свыше 81 %	
«Тревога 2»	Груженный	Свыше 539,4 %	До 10 км/ч
	Порожний	Свыше 631,9 %	

локальных износов ПК колес на ходу поезда, что позволит оперативно выполнять снижение скорости движения в соответствии с ПТЭ и Инструкцией по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (№ 808-2017 ПКБ ЦВ).

**Достоверность предложенного способа контроля, условия применения.** Стоит отметить, что принятые при моделировании допущения могут повлиять на точность результатов диагностирования для износов размером менее 2 мм, а сама конструкция устройства может оказаться нечувствительной к таким небольшим повреждениям, но учитывая, что для этих размеров устанавливается ограничение скорости лишь до 70 км/ч, а скорость движения грузовых поездов на сегодняшний день около 80 км/ч, то это не является критичным и будет усовершенствовано в дальнейшем. Принимая также во внимание погрешности, вызываемые смещением реальной точки контроля

от центра тележки, на данном этапе предлагается вырабатывать сигналы «Тревога 1» и «Тревога 2» (табл. 2) исходя из значений для локальных износов 2 и 6 мм, так как внутри этого диапазона инструкциями устанавливается одинаковое снижение скорости.

В целях повышения точности контроля параллельно исследуется возможность сочетания рассмотренного метода генерирования электроэнергии с вибрационным, в том числе с применением технологий микроэлектромеханических систем (MEMS energy harvesting).

**Заключение.** В результате проведенного исследования установлено, что проблема оперативного выявления локальных износов поверхности катания колес является актуальной, а ее решение приоритетно при разработке бортовых средств диагностирования для грузовых вагонов. Внедрение такой системы позволит повысить уровень безопасности движения поездов, сократить расходы на ремонт вагонов и рельсового пути.

Предложенное техническое решение является одновременно автономным источником электропитания мощностью до 10 Вт и датчиком для оценки технического состояния колесных пар, что упрощает и удешевляет базовую конфигурацию бортовой системы. Подобный подход будет интересен, например, при реализации устройства геолокации вагона, где изначально не предусмотрен отдельный датчик для контроля ходовых частей.

Сформированная математическая модель устройства позволила разработать алгоритм обработки сигнала и оценить требуемую длительность его регистрации. Определен критерий оценки геометрических параметров локальных износов колес и рассчитаны его

пороговые значения для ползунов глубиной 1, 2, 4 и 6 мм. Определены сигналы тревоги, вырабатываемые системой на ходу поезда, предполагающие снижение скорости его движения.

Дальнейшая работа направлена на проведение лабораторных исследований устройства с целью совершенствования его конструкции, алгоритмов и математической модели, а также на изучение вопроса оценки остаточного ресурса колесной пары. В рамках выполнения работы по грантовой программе «УМНИК» будет изготовлен прототип разрабатываемой бортовой системы.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Усов П. Инновации складываются в парк [Электронный ресурс]: специальный проект журнала «РЖД-Партнер» // РЖД-Партнер.ру: [сайт]. URL: <https://spec.rzd-partner.ru/page31411071.html> (дата обращения: 02.09.2022).
2. Агафонов М. С. Отцепки грузовых вагонов в неплановый ремонт за 2021 г. // Вагоны и вагонное хозяйство. 2022. № 1 (69). С. 17–18.
3. Матяш Ю. И., Гаджиев И. А. Разработка бортового устройства мониторинга технического состояния поглощающего аппарата грузового вагона // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2019. Т. 78, № 4. С. 218–226. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-218-226>.
4. Бисерикан М. И., Петроченко С. В., Кашбулина А. Ш. Влияние жесткости технологической системы при лезвийной обработке на качество поверхности катания колеса грузового вагона // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы XVI науч. конф., посвящен. Дню российской науки (Омск, 8 февраля 2022 г.) / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск: ОмГУПС, 2022. С. 110–119.
5. Списание и закупки железнодорожного подвижного состава по итогам 2021 года [Электронный ресурс] // Информационное агентство «INFOLine»: [сайт]. URL: <https://infoline.spb.ru/news/?news=%20%20%20%20%20%20214765> (дата обращения: 02.09.2022).
6. Савченко М. А. Расчетное обоснование протяженности гарантийного участка пункта технического обслуживания с учетом оценки технического состояния тормозной системы грузовых вагонов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Российский университет транспорта. М.: РУТ, 2019. 217 с.
7. Краснов О. Г., Астанин Н. Н. Влияние ударных сил на прочностные характеристики железнодорожного земляного полотна // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2017. Т. 76, № 2. С. 85–93. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-2-85-93>.
8. Демьянов А. А. Исследование влияния размера одностроннего ползуна, образуемого при движении юзом, на характер разрушения кругов катания колесных пар // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2003. № 2. С. 13–19.
9. Краснов О. Г., Ноздрачев Г. С., Гасюк А. С. Нагруженность литых несущих конструкций трехэлементной тележки 18-100 при наличии дефектов на поверхности катания колес // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2016. Т. 75, № 3. С. 161–168. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-3-161-168>.
10. Тимкова А. Ю., Ефимов Р. А., Шорохова Л. С. Оценка контактной нагруженности рельсов при наличии ползунов на поверхности катания колесных пар // Вестник транспорта Поволжья. 2021. № 1 (85). С. 28–32.

11. Методика расчета потребности предприятий вагонного комплекса в цельнокатаных колесах [Электронный ресурс] // Объединение производителей железнодорожной техники: [сайт]. URL: <http://opzt.ru/wp-content/uploads/2017/09/unnamed-file.pdf> (дата обращения: 01.09.2022).

12. Гайипов А. Б., Наркизова Е. А., Белгородцева Т. М. Разработка уточненной методики расчета баланса колесных пар и оценка потребности в колесах и осях для вагонного парка Республики Узбекистан // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. Т. 18, вып. 3. С. 319–334. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2021-3-319-334>.

13. Сапетов М. В. Оценка сложившейся работы вагонов по износу гребня колесной пары [Электронный ресурс] // Интернет-портал о железнодорожном транспорте, логистике и перевозках. Сетевое издание «Вгудок». URL: [https://vgudok.com/sites/default/files/attached/24\\_mm\\_prezentaciya.ppsx](https://vgudok.com/sites/default/files/attached/24_mm_prezentaciya.ppsx) (дата обращения: 03.09.2022).

14. Справочные материалы по причинам поступления грузовых вагонов в текущий отцепочный ремонт [Электронный ресурс] / Проектно-конструкторское бюро вагонного хозяйства ОАО «РЖД». URL: <https://old.pkbcv.ru/docs/%D0%A2%D0%9E%D0%A0%202018-09.pdf> (дата обращения: 01.09.2022).

15. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм: РД ВНИИЖТ 27.05.01-2017 [Электронный ресурс]: утв. Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества. Протокол от 19–20 октября 2017 г. № 67. Приложение № 62. URL: <https://docs.cntd.ru/document/550948959?section=text> (дата обращения: 01.09.2022).

16. Патент № 181774 Российская Федерация, МПК В61К 9/00 (2006.01), В61D 43/00 (2006.01), В60К 25/10 (2006.01), Н02К 7/06 (2006.01). Устройство электропитания для диагностирования технического состояния грузового вагона: № 2017138799: заявл. 07.11.2017: опубл. 26.07.2018 / Матяш Ю. И. [и др.] 7 с.

17. Кудрявцев Н. Н., Белоусов В. П., Бурчак Г. П. Определение вертикальных возмущений, вызывающих колебания обрессоренных частей вагона при движении по рельсовому пути // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1982. № 5. С. 33–37.

18. Сладковский А. В., Погорелов Д. Ю. Исследование динамического взаимодействия в контакте колесо — рельс при наличии ползунов на колесной паре // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2008. № 5 (123). С. 88–95.

## REFERENCES

1. Usov P. Innovatsii skladyvayutsya v park [Innovations add up to a park]. RZhD-Partner website. URL: <https://spec.rzd-partner.ru/page31411071.html> (access date: 02.09.2022). (In Russ.).
2. Agafonov M. S. Ottsepki gruzovykh vagonov v neplanovyy remont za 2021 g. [Freight car uncoupling for unscheduled repairs in 2021]. *Vagony i vagonnoe khozyaystvo = Carriages and Carriage Facilities*. 2022;1(69):17–18. (In Russ.).
3. Matyash Yu. I., Gadzhiev I. A. Razrabotka bortovogo ustroystva monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya pogloshchayushchego apparata gruzovogo vagona [Development of an onboard monitoring device for freight car shock-absorbing device's technical condition]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 2019;78(4):218–226. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-218-226>. (In Russ.).
4. Biserikan M. I., Petrochenko S. V., Kashbulina A. Sh. Vliyanie zhestkosti tekhnologicheskoy sistemy pri lezviynoy obrabotke na kachestvo poverkhnosti kataniya kolesa gruzovogo vagona [Influence of the rigidity of the technological system during blade processing on the quality of the rolling surface of the wheel of a freight car]. *Innovatsionnye proekty*

i technologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte [Innovative projects and technologies in education, industry and transport]. Procs. of the XVI scientific conf. dedicated to Day of Russian Science (Omsk, February 8, 2022). Omsk: OSTU Publ.; 2022. P. 110–119. (In Russ.).

5. Spisanie i zakupki zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava po itogam 2021 goda [Decommissioning and purchases of railway rolling stock at the end of 2021]. Information agency INFOLine website. URL: <https://infoline.spb.ru/news/?news=%20%20%20%20%20%20%20214765> (access date: 02.09.2022). (In Russ.).

6. Savchenko M. A. Raschetnoe obosnovanie protyazhennosti garantynogo uchastka punkta tekhnicheskogo obsluzhivaniya s uchetom otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya tormoznoy sistemy gruzovykh vagonov [Calculation substantiation of the length of the warranty section of the maintenance point, taking into account the assessment of the technical condition of the brake system of freight cars]. Cand. of Sci. (Engineering) thesis: 05.22.07. Russian University of Transport. Moscow: RUT Publ.; 2019. 217 p. (In Russ.).

7. Krasnov O. G., Astanin N. N. Vliyaniye udarnykh sil na prochnostnye kharakteristiki zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna [Influence of impact forces on the strength characteristics of the railway roadbed]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 2017;76(2):85-93. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-2-85-93>. (In Russ.).

8. Dem'yanov A. A. Issledovanie vliyaniya razmera odnostoronnego polzuna, obrazuemogo pri dvizhenii yuzom, na kharakter razrusheniya krugov kataniya kolesnykh par [Investigation of the influence of the size of a one-sided flat, formed during skidding, on the nature of the destruction of rolling circles of wheel pairs]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya = Bulletin of the Rostov State University of Communications*. 2003;(2):13-19. (In Russ.).

9. Krasnov O. G., Nozdrachev G. S., Gasyuk A. S. Nagruzhenost' litykh nesushchikh konstruktivnykh trekhementnoy telezhki 18-100 pri nalichii defektov na poverkhnosti kataniya koles [Loading of cast supporting structures of three-piece bogie 18-100 in the presence of defects on the surface of wheel rolling]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 2016;75(3):161-168. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-3-161-168>. (In Russ.).

10. Timkova A. Yu., Efimov R. A., Shorokhova L. C. Otsenka kontaktnoy nagruzhenosti rel'sov pri nalichii polzunov na poverkhnosti kataniya kolesnykh par [Evaluation of the contact loading of rails in the presence of sliders on the rolling surface of wheel pairs]. *Vestnik transporta Povolzh'ya = Bulletin of Transport of the Volga Region*. 2021;1(85):28-32. (In Russ.).

11. Metodika rascheta potrebnosti predpriyatiy vagonnogo kompleksa v tsel'nokatanykh kolesakh [Methodology for calculating the needs of carriage complex enterprises in solid-rolled wheels]. Association of Railway Equipment Manufacturers website. URL: <http://opzt.ru/wp-content/uploads/2017/09/unnamed-file.pdf> (access date: 01.09.2022). (In Russ.).

12. Gayipov A. B., Narkizova E. A., Belgorodtseva T. M. Razrabotka utochnennoy metodiki rascheta balansa kolesnykh par i otsenka potrebnosti v kolesakh i osyakh dlya vagonnogo parka Respubliki Uzbekistan [Development of an updated methodology for calculating the balance of wheel pairs and assessing the need for wheels and axles for the wagon fleet of the Republic of Uzbekistan]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya = Proceedings of Petersburg Transport University*. 2021;18(3):319-334. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2021-3-319-334>. (In Russ.).

13. Sapetov M. V. Otsenka slozhivsheysya raboty vagonov po iznosu grebnya kolesnoy pary [Evaluation of the current performance of cars by the wear of the wheel pair flange]. Vgudok website. URL: [https://vgudok.com/sites/default/files/attached/24\\_mm\\_prezentaciya.ppsx](https://vgudok.com/sites/default/files/attached/24_mm_prezentaciya.ppsx) (access date: 03.09.2022). (In Russ.).

14. Spravochnye materialy po prichinam postupleniya gruzovykh vagonov v tekushchiy otsepochnyy remont [Reference materials on

the reasons for the receipt of freight cars in the current uncoupling repair]. Design Bureau of the Carriage Facilities of Russian Railways. URL: <https://old.pkbcv.ru/docs/%D0%A2%D0%9E%D0%A0%202018-09.pdf> (access date: 01.09.2022). (In Russ.).

15. Rukovodyashchiy dokument po remontu i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu kolesnykh par s buksovymi uzlamy gruzovykh vagonov magistral'nykh zheleznnykh dorog kolei 1520 (1524) mm: RD VNIIZhT 27.05.01-2017 [Guidance document for the repair and maintenance of wheel sets with axlebox units for freight cars of 1520 (1524) mm gauge mainline railways: RD VNIIZhT 27.05.01-2017]. Approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States. Minutes dated October 19–20, 2017 No. 67. Appendix No. 62. URL: <https://docs.cntd.ru/document/550948959?section=text> (access date: 01.09.2022). (In Russ.).

16. Matyash Yu. I., Gadzhiev I. A., Adadurov A. S., Grigorishin K. E. Patent No. 181774 Russian Federation, MPK B61K 9/00 (2006.01), B61D 43/00 (2006.01), B60K 25/10 (2006.01), H02K 7/06 (2006.01). Ustroystvo elektropitaniya dlya diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya gruzovogo vagona [Power supply device for diagnosing the technical condition of a freight car]: No. 2017138799: appl. 07.11.2017: publ. 26.07.2018. 7 p. (In Russ.).

17. Kudryavtsev N. N., Belousov V. P., Burchak G. P. Opredelenie vertikal'nykh vozmushcheniy, vyzvayuyushchikh kolebaniya obressorenykh chastey vagona pri dvizhenii po rel'sovomu puti [Determination of vertical disturbances causing vibrations of the sprung parts of the car when moving along the rail track]. *Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 1982;(5):33-37. (In Russ.).

18. Sladkovskiy A. V., Pogorelov D. Yu. Issledovanie dinamicheskogo vzaimodeystviya v kontakte koleso—rel's pri nalichii polzunov na kolesnoy pare [Research of dynamic interaction in the contact of a wheel with the rail in the presence of flats on the wheel pair]. *Visnik Skhidnoukraïnskogo natsional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalya = Bulletin of All-Ukrainian National University Named after Volodymyr Dal*. 2008;5(123):88-95. (in Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Ибрагим Азимович ГАДЖИЕВ,

аспирант, кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство», Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС, 644046, г. Омск, пр. Маркса, д. 35), Author ID: 1025714, <https://orcid.org/0000-0002-0113-0371>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

### Ibragim A. GADZHIEV,

Postgraduate, Department of Cars and Carriage Facilities, Omsk State Transport University (644046, Omsk, 35, Marks Ave.), Author ID: 1025714, <https://orcid.org/0000-0002-0113-0371>

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

**Прозрачность финансовой деятельности:** автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

**Financial transparency:** the author has no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 14.09.2022, рецензия от первого рецензента получена 22.09.2022, рецензия от второго рецензента получена 11.11.2022, принята к публикации 28.11.2022.

The article was submitted 14.09.2022, first review received 22.09.2022, second review received 11.11.2022, accepted for publication 28.11.2022.



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 625.03:625.172

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-318-329

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



## АКТУАЛИЗАЦИЯ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПУТИ ПО ДАННЫМ ПУТЕИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Б. Н. Зензинов✉, Ю. С. Ромен, М. В. Криволапов

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Одним из последствий введения в действие Инструкции по оценке состояния рельсовой колеи № 436/р от 28.02.2020 стал рост количества дополнительно выявляемых отступлений от нормы содержания пути и перевод их в неисправности. В результате до трех раз увеличилось количество километров с ограничениями скоростей движения поездов, что может привести к существенным потерям перевозочного процесса и росту затрат на работы по текущему содержанию пути.

**Материалы и методы.** Для анализа фактического распределения видов и величин неисправностей, количества и причин ограничений скорости использовались данные специального проезда диагностического комплекса на действующих линиях ОАО «РЖД». Моделирование с определением динамических показателей вагонов выполнено в соответствии с алгоритмом детерминированного метода расчета движения вагонов по железнодорожному пути.

**Результаты.** Проанализированы последствия для оценки состояния пути от нормативов, указанных в Инструкции 436/р. Приведены результаты математического моделирования взаимодействия «подвижной состав — путь», подтверждающие целесообразность предлагаемых изменений нормативов: увеличения допускаемых скоростей движения пассажирских поездов, оценки уширения колеи в кривых участках, уточнения оценок непогашенного уско-рения.

**Обсуждение и заключение.** Предложено изменение ряда нормативов оценки отступлений от норм содержания пути с целью сокращения количества ограничений скорости.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** безопасность движения поездов, путеизмерительные средства, математическое моделирование, динамика взаимодействия пути и подвижного состава, оценка уширения колеи в кривых, критерии оценки состояния пути

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

**Для цитирования:** Зензинов Б. Н., Ромен Ю. С., Криволапов М. В. Актуализация критериев оценки состояния пути по данным путеизмерительных средств // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 4. С. 318–329. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-318-329>.

✉ zenzinov-vniizht@yandex.ru (Б. Н. Зензинов)



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 625.03:625.172

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-318-329

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



## UPDATING THE CRITERIA FOR ASSESSING THE STATE OF THE RAILWAY TRACK ACCORDING TO THE DATA OF TRACK MEASURING EQUIPMENT

**Boris N. Zenzinov**✉, **Yuriy S. Romen**, **Maksim V. Krivolapov**

Railway Research Institute,  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** One of the consequences of the introduction of the Instructions for Assessing the Condition of the Rail Track (enacted on February 28, 2020 No. 436/r) was an increase in the number of newly detected deviations from the norm of track maintenance and their reassignment as malfunctions. As a result, the number of kilometres with limited train speeds has increased by up to 3 times, which may lead to significant losses in transportation and an increase in the cost of the immediate track maintenance.

**Materials and methods.** Data from a special thoroughfare of a diagnostic complex along the operating lines of Russian Railways were used to analyse the actual distribution of types and magnitudes of malfunctions, the number and causes of the speed limits. The authors used computer simulations to determine the dynamic indicators of cars in accordance with the algorithm of the deterministic method for calculating the movement of cars along the railway track.

**Results.** The consequences for assessing the state of the track from the standards specified in Instruction 436/r are analysed. The authors present the results of mathematical modelling of the rolling stock interaction with the track, confirming the feasibility of the proposed changes in the standards: increasing the permissible speeds of passenger trains, assessing the gauge widening in curved sections, clarifying the estimates of unbalanced acceleration.

**Discussion and conclusion.** It is proposed to change a number of standards for assessing deviations from the norms of track maintenance in order to reduce the number of speed limits.

**KEYWORDS:** train traffic safety, track measuring devices, mathematical modelling, dynamics of track and rolling stock interaction, assessment of gauge widening in curves, criteria for assessing track condition

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

**For citation:** Zenzinov B. N., Romen Yu. S., Krivolapov M. V. Updating the criteria for assessing the state of the railway track according to the data of track measuring equipment. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(4):318-329. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-318-329>.

✉ zenzinov-vniizht@yandex.ru (B. N. Zenzinov)

© Zenzinov B. N., Romen Yu. S.,  
Krivolapov M. V., 2022

**В**ведение. За последние 10 лет в два раза увеличилось количество типов мобильных средств диагностики, применяемых в ОАО «РЖД». Кроме того, в разы увеличилась номенклатура измеряемых и оцениваемых параметров состояния путевой инфраструктуры.

ОАО «РЖД» распоряжением от 28 февраля 2020 г. № 436/р утвердило Инструкцию по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов (далее — Инструкция 436/р), которая заменила Инструкцию ЦП-515, разработанную В. Б. Каменским и В. О. Певзнером и действовавшую с 1997 г.

Для того чтобы бригады не дестабилизировали путь, когда в этом нет объективной необходимости, и не увеличивались затраты на эксплуатацию пути [1], в Инструкции 436/р [2] даны определения основных понятий, уточнен подход к определению самих отступлений и их степеней, в три раза расширена номенклатура контролируемых параметров, введена оценка скоростных участков пути, поднят нижний порог отступлений 2-й степени.

Процесс согласования и утверждения Инструкции 436/р занял несколько лет. Непременным требованием Департамента безопасности движения ОАО «РЖД» было ограничение скорости движения поездов при превышении допусков, записанных в разных нормативных документах РЖД, в том числе по показателям, по которым ранее ограничения не выдавались, а сама «опасность» не была доказана.

Например, положение Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации (ПТЭ) о том, что возвышение в кривых не должно быть больше 150 мм, является нормативным для проектирования железнодорожных линий, но не является критической величиной, угрожающей безопасности движения. Превышать возвышение 150 мм не следует, но это не означает, что при уровне 151 мм надо закрывать движение поездов. Однако в существующей редакции Инструкции 436/р принят именно такой «запретительный» подход.

Увеличение количества контролируемых средствами диагностики характеристик пути в Инструкции 436/р привело к росту отступлений от норм содержания пути, которые раньше не проверялись на регулярной основе. Механический перевод дополнительно выявляемых отступлений в «неисправности» привел к трехкратному росту километров с ограничениями скоростей движения поездов, что может повлечь за собой существенные потери перевозочного процесса за счет необоснованных ограничений скорости движения и рост затрат на работы по текущему содержанию пути. Возникла необходимость оптимизации критериев оценки, исключения выдаваемых средствами диагностики необоснованных ограни-

чений скорости движения поездов при обеспечении безопасности движения.

**Материалы и методы.** Для анализа фактического распределения видов и величин неисправностей, количества и причин ограничений скорости использовались данные специального проезда диагностического комплекса от Москвы до Владивостока и обратно. Результаты, полученные на представительной выборке (более 13 тыс. км), показывают, что для главных путей ОАО «РЖД» основной процент ограничений скорости составляют отступления от норм по перекосам (33 %), уширению колеи (31 %), положению пути в плане или рихтовке (17 %) и просадкам (13 %). По величинам ограничения скорости движения поездов подавляющее количество приходится на 60 км/ч (более 67 %) и 25 км/ч (около 15 %).

Среди неисправностей, приводящих к ограничению скорости до 15 км/ч, первое место занимают перекосы, к ограничению до 25 км/ч — уширения колеи (более 95 %), до 60 км/ч — перекосы и уширения колеи (рис. 1).

Самыми тяжелыми с точки зрения перевозочного процесса являются закрытия движения поездов и ограничения скорости до 15 км/ч. Нормативы, устанавливающие эти ограничения, напрямую связаны с безопасностью движения, они не менялись много лет, несмотря на существенные изменения и подвижного состава, и элементов конструкции пути, но их пересмотр без проведения большого объема экспериментальных и теоретических исследований невозможен. Последние испытания такого рода проводились 40–50 лет назад. На испытательном полигоне создавались неисправности (неровности) величиной до 30–50 мм, по которым со скоростями до 80 км/ч проезжал испытательный поезд, состоящий из грузовых вагонов и цистерн (груженых и порожних), электровозов и тепловозов разных типов, вагонов-лабораторий. Измерялись динамические показатели взаимодействия «подвижной состав — путь» (силы, перемещения элементов конструкции, напряжения в рельсах).

На основании анализа полученных результатов и были установлены допустимые безопасные отклонения от номинальных характеристик геометрии рельсовой колеи. При этом был заложен «запас» не менее 100 %. Например, испытательный поезд проезжал со скоростью 60 км/ч по перекосам величиной 50 мм, но порог ограничения скорости был установлен 20 мм. Обосновывалось такое уменьшение критической величины отступлений тем, что состояние подвижного состава в эксплуатации может отличаться от представленного на испытания, а неблагоприятное сочетание форм и величин отступлений от норм эксплуатации может влиять на динамические процессы и увеличивать опасность схода поезда.

Однако есть ряд вполне очевидных вопросов, не нашедших отражения в существующих нормативных документах, которые могут быть решены на основании методов математического моделирования взаимодействия «подвижной состав — путь», без проведения дорогостоящих испытаний. В частности, речь идет об уточнении нормативов ограничения скорости движения для диапазона 25–80 км/ч. Целесообразно разделить ограничения скорости движения для пассажирских и грузовых поездов — это первый источник сокращения количества ограничений скорости. Сегодня в диапазоне 61–90 км/ч ограничения скорости для пассажирских и грузовых поездов при одних и тех же отступлениях одинаковые, что не оправдано, поскольку пассажирские вагоны существенно легче и имеют лучшую динамику по сравнению с грузовыми вагонами.

Для обоснования возможности увеличения допустимой скорости пассажирских поездов (например, для перекосов и просадок, на которых грузовым поездам разрешена скорость 60 км/ч, допустить пассажирским поездам скорость 80 км/ч) не обязательно проводить испытания. Достаточно проведения математического моделирования. Разделение нормативов ограничения скорости для пассажирских и грузовых поездов даст значительное уменьшение количества предупреждений об ограничении скорости движения пассажирских поездов, поскольку большинство ограничений приходится на них. Согласно предварительной оценке в масштабах сети это даст уменьшение количества ограничений скорости до 10 %.

Вторым источником существенного уменьшения количества ограничений скорости движения поездов может быть уточнение нормативов оценки уширения колеи в кривых участках пути. Предельные значения ширины колеи при эксплуатации пути были установлены более 100 лет назад для других условий эксплуатации (в частности, обеспечения прохождения кривых длиннобазными паровозами) и конструкций пути. Минимальная ширина колеи, при которой колесная пара может провалиться внутрь, — 1574 мм. При норме ширины колеи 1524 мм один дюйм (25 мм) взяли как эксплуатационный допуск, а второй дюйм «про запас» (с учетом возможных деформаций колеи из-за дефектов элементов конструкции).

Ширина колеи является показателем состояния пути, однако сама по себе не является критерием, обуславливающим величину сил взаимодействия. Увеличение ширины колеи при неровностях рельсовых нитей в плане, влияющее на безопасность движения, контролируется и штрафуются при оценке рихтовки пути. Поэтому не обоснованным с точки зрения обеспечения безопасности движения и динамики взаимодействия «подвижной состав — путь» является ограничение скорости до 60 км/ч при ширине 1545 мм

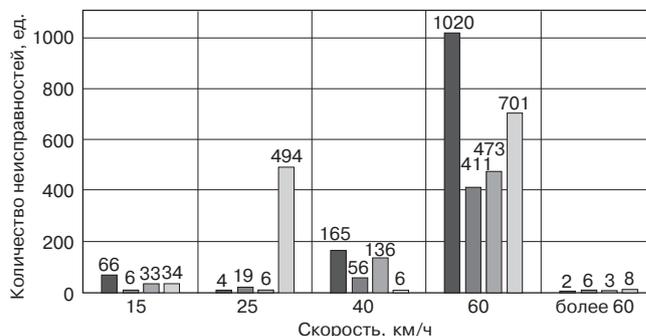


Рис. 1. Распределение неисправностей по видам, являющимся причинами ограничений скорости:

■ — перекосы; ■ — просадки; ■ — рихтовки; ■ — уширения колеи

Fig. 1. Distribution of malfunctions by types that require speed limitation:

■ — distortions; ■ — subsidence; ■ — linings; ■ — gauge widenings

в крутых кривых с большим износом рельсов, а при ширине 1547 мм — ограничение до 25 км/ч.

Третьим источником уменьшения количества ограничений скорости движения поездов может быть уточнение нормативов оценки непогашенного ускорения в кривых участках пути. Величина непогашенного ускорения 0,7 м/с<sup>2</sup> была предложена в 1959 г. В.С. Шаройко [3] и основывалась на анализе реакций пассажиров при поездках в старых типах вагонов на тележках КВЗ-ЦНИИ. Параметр 0,7 м/с<sup>2</sup> касался ощущений человека при движении подвижного состава в кривых и предлагался в качестве нормативов для установления возвышения рельса при максимальной скорости движения пассажирских поездов. С безопасностью движения и интенсивностью расстройств пути автор его не связывал. Этот параметр был принят в качестве рекомендуемой величины при проектировании пути и пассажирских вагонов. Нормативы проектирования и эксплуатации пути допускают непогашенное ускорение 0,7 м/с<sup>2</sup>. Однако осадка наружной рельсовой нити всего на 1–2 мм, дающая приращение непогашенного ускорения 0,001 м/с<sup>2</sup>, формально приводит к ограничению скорости, так как в действующих нормативах вообще не предусмотрены допуски, что нелогично с инженерной точки зрения.

Для теоретического обоснования уточненных величин ограничений скорости поездов при наличии отступлений от норм содержания пути использовался метод математического моделирования взаимодействия «подвижной состав — путь».

Поскольку железнодорожный экипаж является системой масс с большим числом степеней свободы и нелинейными связями, движение которой ограничивается положением рельсовой колеи, изменяющимся во времени и в пространстве, изучение динамических процессов его движения и взаимодействия с путевой

структурой является сложной и трудоемкой задачей, решение которой требует большого количества экспериментальных и теоретических исследований. Общая сложность решения задачи усугубляется принципиальным различием условий движения экипажа в прямых и круговых кривых, а также различием силового взаимодействия в системе «экипаж — рельсовая колея» при движении колесной пары в рельсовой колее с зазором и отступлениями от идеального состояния. Уравнения движения экипажа, учитывающие возможности набегания и отрыва гребня колеса, были записаны М. Ф. Вериго в 1950-х гг. [4]. Однако нелинейность системы «экипаж — рельсовая колея» делала задачу неразрешимой без применения средств вычислительной техники.

В первой половине XX в. методы расчетов динамики экипажей и пути существовали двумя отдельными группами. Отдельно проводили качественные расчеты устойчивости движения в прямых участках пути и независимо — определение сил взаимодействия в крутых круговых кривых. При этих расчетах железнодорожный путь в плане считали гладким и радиусы кривых постоянными. Это обуславливалось отсутствием общей методики расчетов в прямых и кривых разных радиусов с отступлениями от идеального состояния.

Общая методика описания движения экипажа для прямых и кривых участков пути с применением подвижной системы координат была впервые разработана во ВНИИЖТ [5, 6]. На основании разработанной методики во ВНИИЖТ [6] и в Институте технической механики АН УССР [7] были составлены программы математического моделирования взаимодействия «подвижной состав — путь».

Во ВНИИЖТ была разработана программа «ЭКИПАЖ», использованная при определении допустимых скоростей движения новых типов подвижного состава, в частности скоростного электропоезда ЭР200, тепловоза ТЭП80 и экспресса «Сапсан». В 1990 г. методика применения подвижной системы координат при математическом моделировании динамических процессов в движущихся экипажах была использована в Брянском государственном техническом университете при создании комплекса программ «Универсальный механизм» [8].

Для решения задач, поставленных в данной работе, была выбрана программа «ЭКИПАЖ», потому что она позволяет в широком диапазоне менять характеристики геометрии пути, в том числе вводить фактические характеристики по данным путеизмерителей (кривизну в плане, поперечный уровень пути, ширину колеи и неровности обеих рельсовых нитей в профиле и плане) и характеристики вагонов с различными отклонениями от установленных норм содержания.

Моделирование с определением динамических показателей вагонов выполнено в соответствии с алгоритмом

детерминированного метода расчета движения вагонов по железнодорожному пути. Алгоритм расчета неоднократно применялся для выполнения динамических расчетов и определения показателей перемещений тележек и кузова вагона и силовых факторов при движении вагонов по железнодорожному пути и прошел проверку при выполнении работы по опытной эксплуатации с применением программного обеспечения. Сравнительная оценка результатов расчетов по программе «ЭКИПАЖ» с результатами расчетов по программному обеспечению моделей «Универсальный механизм», MEDYNA, ADAMS показала результаты сходимости расчетов. Применяемая математическая модель пространственных колебаний, положенная в основу алгоритма расчета, позволяет определять вертикальные и поперечные силы, а также относительные перемещения тележек и кузова вагона при движении вагонов по прямым и кривым участкам пути с отступлениями в плане и профиле.

Оценка безопасности и динамических качеств вагонов при движении по пути производится в соответствии с действующими нормативными документами для грузовых вагонов — ГОСТ 33211–2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам», для пассажирских вагонов — ГОСТ 34093–2017 «Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Требования к прочности и динамическим качествам» и Нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог колеи 1520 мм [9]. Оценка безопасности выполняется с учетом устойчивости против схода набегающего колеса с рельса.

Оценочным показателем динамических качеств движения вагонов принят показатель максимального коэффициента вертикальной динамики:

- для грузового вагона с максимальной статической осевой нагрузкой оценка «хорошо» при уровне коэффициента не более 0,70, допустимое значение — 0,90;
- для пассажирского вагона допустимое значение 0,40.

При использовании применяемой математической модели выполняется решение системы, состоящей из 45 дифференциальных уравнений второго порядка с последующим численным интегрированием. Применяемый метод исследования движения вагонов по колее позволяет учитывать наиболее характерные конструктивные особенности ходовых частей с учетом их массово-инерционных характеристик. Так как движение экипажа происходит по пути, который является аргументом для всех возмущающих воздействий, то все процессы рассматриваются в функции от пути.

В качестве входных возмущающих воздействий при расчетах использовались путеизмерительные данные, включая координаты пути, ширину колеи, поперечный уровень и кривизну в плане, неровности в профиле и плане по правому и левому рельсу. В качестве выходных данных расчетов динамики взаимодействия

«экипаж — путь» использовались величины боковых и рамных сил, коэффициент вертикальной динамики и коэффициент запаса устойчивости от схода с рельсов.

При расчетах для сравнения динамики взаимодействия грузовых и пассажирских вагонов на расстроенном пути подготовлено несколько тестовых участков для моделирования.

В качестве участка пути неудовлетворительного состояния с наличием неисправностей, требующих ограничения скорости движения, выбран перегон Забайкальской дороги с оценкой километров железнодорожного пути от «хорошо» до «неудовлетворительно». Из файлов путеизмерительных данных получены числовые массивы оцениваемых параметров геометрии колеи (ширина колеи, уровень, просадки и рихтовки). Дополнительно получены «натурные» неровности в плане и профиле, восстановленные по величинам рихтовок и просадок.

Для ввода в модель был сформирован вариант № 1 («плохой» участок), на котором величины неровностей (и, соответственно, просадок, рихтовок и перекосов) были скорректированы увеличивающим коэффициентом. Числовые массивы варианта № 1 были конвертированы в формат «путеизмерительных данных», читаемых программой обработки и оценки параметров рельсовой колеи. Стало возможным перевести числовые данные в наглядный и понятный

путейцам вид — ведомости оценки участка пути по форме ПУ-32 (см. табл. 1) и графические диаграммы геометрии колеи с оценкой по Инструкции 436/р. Величины неровностей превысили пороги неисправностей, требующих ограничения установленной скорости, оценка участка стала «неудовлетворительно», с восемью ограничениями скорости по Инструкции 436/р и двенадцатью неисправностями четвертой степени, балловая оценка — 404 балла.

Выполнено несколько вариантов расчетов движения грузового и пассажирского вагонов со скоростями 60 и 80 км/ч по «плохому» участку пути. Цель этого этапа моделирования заключалась в определении количественных различий параметров силового взаимодействия грузового и пассажирского подвижного состава с неровностями пути.

Оценочными характеристиками при сравнении показателей взаимодействия на каждом километре тестового участка были выбраны максимальные и максимальные средние величины боковых и рамных сил, максимальные величины коэффициента вертикальной динамики и минимальные величины коэффициента запаса устойчивости.

Максимальное значение определяли как среднее значение трех наибольших локальных максимумов из совокупности полученных значений расчетов на километр пути:

Таблица 1

Ведомость оценки участка пути по форме ПУ-32

Table 1

Statement of evaluation of the track section according to the PU-32 form

Количество километров с оценкой и качественная оценка «плохого» участка (вариант № 1)												
№ направления/пути	Всего километров	Количество километров с оценкой				Километры с ограничением скорости	Отступления (шт.)			Средний балл по участку	Величина $N_{уч\ сумм}$	Качественная оценка
		Отл.	Хор.	Уд.	Неуд.		IV степени	Сочетания, кривые, другие	Дополнительные			
12345/1	14,83	1,00	1,00	2,00	10,83	8	14	2		404,5	0,00	Неуд.
Количество отступлений по видам												
Степень	Отступления										Итого	
	Суж.	Уш.	У	П	Пр	Р	Сочетания	Кривые	Другие			
I	4	725	10	39	140	104						1022
II		84	29	153	207	79						552
III		36	2	20	21	14						93
IV		2		8		4						14
							2					2
Всего	4	847	41	220	368	201	2					1683

Примечание. Суж. — сужение; Уш. — уширение; У — уровень; П — перекосы; Пр — просадки; Р — рихтовки.

Note. Суж. — gauge narrowing; Уш. — gauge widening; У — level; П — distortions; Пр — subsidences; Р — linings.

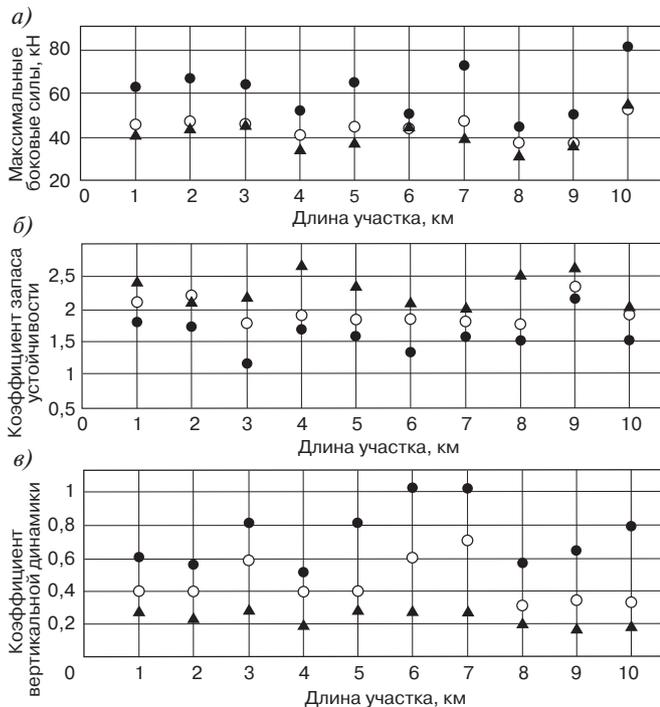


Рис. 2. Результаты расчетов динамических показателей по длине участка № 1:

- а — максимальные боковые силы по длине участка, кН;
- б — коэффициент запаса устойчивости; в — коэффициент вертикальной динамики;
- — грузовой поезд, 80 км/ч; ▲ — пассажирский поезд, 80 км/ч;
- — грузовой поезд, 60 км/ч

Fig. 2. Calculation results of dynamic indicators along the length of the section No. 1:

- a — maximum lateral forces along the length of the section, kN;
- б — stability factor; в — vertical dynamics factor;
- — goods train, 80 km/h; ▲ — passenger train, 80 km/h;
- — goods train, 60 km/h

$$x_{\max} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 x_{i\max}, \quad (1)$$

где  $x_{i\max}$  — локальные максимумы из совокупности значений, ранжированные от максимальных значений к минимальным, т. е.  $x_{1\max} > x_{2\max} > \dots > x_{n\max}$ .

Максимальное среднее значение определяли как среднее значение всех локальных максимумов из совокупности полученных значений расчетов на километровых отрезках пути:

$$\bar{x}_{\max} = \frac{1}{n_{\max}} \sum_{i=1}^{n_{\max}} x_{i\max}, \quad (2)$$

где  $n_{\max}$  — количество локальных максимумов из совокупности значений.

Результаты моделирующих расчетов движения грузового и пассажирского вагонов по тестовому участку показали, что при скоростях до 80 км/ч условия безопасности движения соблюдаются. То обстоятельство, что на тестовом участке пути есть неис-

правности, требующие ограничения скорости, не противоречит полученным результатам — в нормативах всегда заложен «запас» на неблагоприятное сочетание отступлений от норм содержания как пути, так и подвижного состава при разных режимах ведения поезда.

**Результаты исследования.** При скорости 80 км/ч параметры силового взаимодействия грузового подвижного состава с путем неудовлетворительного состояния от 1,5 до 3 раз больше по сравнению с пассажирским, в частности:

- максимальные боковые силы составляют 61 и 41 кН соответственно;
- максимальные рамные силы 38 и 23 кН соответственно;
- максимальный коэффициент вертикальной динамики 0,73 и 0,24 соответственно;
- минимальный коэффициент запаса устойчивости 1,62 и 2,33 соответственно.

Результаты расчетов динамики движения на участке по варианту № 1 показаны на рис. 2.

В диапазоне скоростей 60–80 км/ч максимальные и среднеквадратичные величины параметров силового воздействия на путь у грузового вагона по величинам вертикальных нагрузок в 1,5–3 раза больше, чем у пассажирского, а боковых и рамных сил в 1,5–2 раза. Показатель запаса устойчивости для пассажирского вагона был выше на 16–20% по сравнению с грузовым.

Параметры силового взаимодействия грузового подвижного состава с путем неудовлетворительного состояния при скорости 60 км/ч на 15–20% больше, чем параметры силового взаимодействия пассажирского подвижного состава при скорости 80 км/ч.

Для моделирующих расчетов динамики взаимодействия в кривых участках пути грузового вагона при различной ширине колеи подготовлен тестовый участок (вариант № 2), состоящий из кривых разного радиуса, с неровностями рельсовых нитей и возвышением, соответствующим исходным параметрам участка по варианту № 1 (изменялась только ширина колеи в кривых — от 1520 до 1550 мм). В каждой кривой вводились 3 варианта уширения, отличающиеся на 3–5 мм (табл. 2).

Результаты моделирования влияния уширения колеи в кривых на параметры взаимодействия с целью определения различий в динамических показателях при ширине колеи до 1550 мм приведены в табл. 3.

В диапазоне скоростей до 60 км/ч на участке по варианту № 2 обеспечивалась безопасность движения (коэффициенты запаса устойчивости и вертикальной динамики с «запасом» укладывались в нормативы). Установлена малая зависимость динамических процессов (величин боковых и вертикальных сил, действующих на грузовой вагон) от величин уширения колеи в кривых участках пути. Проведенное моделирование подтвердило, что уширение колеи в кривых до 1552 мм

при скоростях до 40–60 км/ч практически не влияет на показатели взаимодействия «подвижной состав— путь».

Это же было установлено в многочисленных испытаниях, проведенных специалистами ВНИИЖТ. Если обеспечена устойчивость колесной пары от вкатывания на рельс или от провала внутрь колеи, уширение колеи в кривых не критично [10].

Для моделирования влияния непогашенного ускорения в кривых на динамику взаимодействия «пассажирский вагон— путь» подготовлен тестовый участок (вариант № 3). Участок состоит из кривых радиусом от 1200 до 350 м с разным возвышением. Величина возвышения отличается и подобрана таким образом, чтобы при скоростях 140, 120, 100 и 80 км/ч непогашенное ускорение попадало в интервал от 0,65 до 0,75 м/с<sup>2</sup>. При этом неровности рельсовых нитей и ширина колеи не изменялись. Движение грузового вагона не рассматривается, поскольку цель моделирования заключается в обосновании возможности уточнения нормативов оценки для пассажирских поездов, скорость которых на подавляющей части главных путей ОАО «РЖД» больше скорости грузовых поездов, и почти все ограничения скорости по непогашенному ускорению приходится на пассажирские поезда.

Характеристиками силового взаимодействия «экипаж— путь» в кривых при различном непогашенном ускорении являются величины боковых сил набегающих колесных пар и коэффициентов вертикальной динамики.

Величины боковых сил (рис. 3) и коэффициентов вертикальной динамики при непогашенных ускорениях  $a_{\text{нп}} = 0,65$ ,  $a_{\text{нп}} = 0,7$  и  $a_{\text{нп}} = 0,75$  практически одинаковые, отличия составляют доли процента.

Проведенное моделирование подтвердило, что величина непогашенного ускорения в пределах от 0,65 до 0,75 м/с<sup>2</sup> при скоростях до 140 км/ч практически не влияет на силовые динамические показатели пассажирского вагона.

Таблица 2

## Характеристики тестового участка (вариант № 2)

Table 2

## Characteristics of the test section (option No. 2)

Радиус кривой, м	Возвышение, мм	Ширина колеи 1, мм		Ширина колеи 2, мм		Ширина колеи 3, мм	
		Средние значения	Максимальные значения	Средние значения	Максимальные значения	Средние значения	Максимальные значения
450	75	1531,9	1536,7	1534,4	1540,5	1537,3	1544,6
340	91	1536,8	1539,5	1540,6	1544,0	1544,7	1548,8
500	75	1533,9	1536,7	1537,0	1540,3	1540,5	1544,4
525	90	1519,9	1522,5	1519,5	1522,7	1519,4	1523,3
290	90	1539,1	1541,8	1543,4	1546,4	1547,2	1550,9

Результаты проведенных моделирующих расчетов позволяют рекомендовать следующие предложения по оценке состояния пути:

- разделить нормативы оценки геометрии колеи для пассажирских и грузовых поездов при скоростях до 80 км/ч, увеличив допустимые скорости для пассажирских поездов;
- случаи превышения непогашенным ускорением порога 0,7 м/с<sup>2</sup> рассматривать как «неисправности», назначать штрафные баллы, но скорость движения пассажирских поездов ограничивать, только если непогашенное ускорение превысит 0,75 м/с<sup>2</sup>;
- изменить допустимое уширение колеи в кривых участках пути, не ограничивать в кривых участках пути скорость до 60 км/ч при ширине колеи 1545 мм и до 25 км/ч при ширине колеи 1547 мм.

Структура и числовые показатели степеней отступлений по уширению колеи практически не менялись

Таблица 3

## Среднеквадратичные величины боковой силы набегающей колесной пары, кН

Table 3

## Root-mean-square values of the lateral force of the oncoming wheel pair, kN

Радиус кривой, м	При скорости 40 км/ч			При скорости 25 км/ч			При скорости 15 км/ч		
	Вариант ширины колеи 1	Вариант ширины колеи 2	Вариант ширины колеи 3	Вариант ширины колеи 1	Вариант ширины колеи 2	Вариант ширины колеи 3	Вариант ширины колеи 1	Вариант ширины колеи 2	Вариант ширины колеи 3
450	3,64	3,89	3,96	2,44	2,50	2,73	2,12	2,28	2,45
340	4,10	4,14	4,14	2,65	2,75	2,93	2,27	2,25	2,32
500	5,49	5,30	5,12	3,81	3,66	3,64	3,06	2,90	2,96
525	3,91	3,89	3,85	2,71	2,77	2,77	2,44	2,45	2,48
290	3,05	2,93	3,01	1,95	2,08	2,06	1,77	1,69	1,67

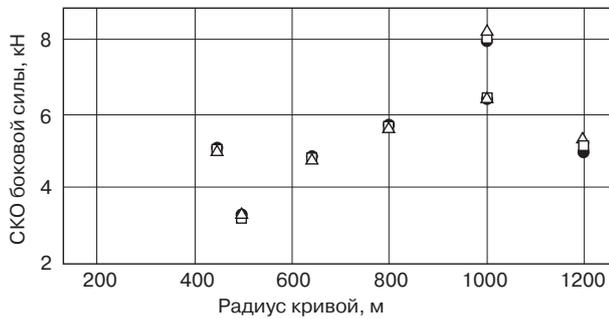


Рис. 3. Среднеквадратичное отклонение величины боковых сил в кривых разного радиуса при разном непогашенном ускорении:  
● —  $a_{нн}=0,65$ ; □ —  $a_{нн}=0,7$ ; △ —  $a_{нн}=0,75$

Fig. 3. Root-mean-square deviation of the magnitude of lateral forces in curves of different radii for different unbalanced acceleration:  
● —  $a_{нн}=0,65$ ; □ —  $a_{нн}=0,7$ ; △ —  $a_{нн}=0,75$

Таблица 4

**Фактическая ширина колеи в кривых разного радиуса**

Table 4

**Actual track width in curves of different radii**

Диапазон радиусов, м	Средняя ширина колеи, мм	Из ПТЭ-1952	
		Радиус, м	Номинальный размер ширины колеи
2500–1200	1524,8	650 и более	1524
1200–800	1527,9		
800–650	1530,9		
650–450	1531,9	650–451	1530
450–350	1533,1	450–351	1535
до 350	1536,0	350 и менее	1540

50 лет. Тогда преобладали звеньевые пути при ширине колеи 1524 мм. Все кривые были разбиты на 4 диапазона, соответственно было 4 номинальных значения ширины колеи. Номинальный размер ширины колеи 1524 мм был установлен в прямых участках пути и в кривых радиусом более 650 м, а в более крутых кривых были установлены следующие номинальные значения:

- при радиусе от 650 м до 450 м — 1530 мм;
- при радиусе от 449 м до 350 м — 1535 мм;
- при радиусе 349 м и менее — 1540 мм.

Переход на колею 1520 мм привел к тому, что остались только диапазоны радиусов: более 350, 349–300 и менее 299 м. Фактическая ширина колеи в кривых больше зависит не от «номинала», а от величины радиусов. В кривых с нормой 1520 мм после пропуска миллиона тонн происходит уширение колеи за счет выборки люфтов, а затем уширение продолжается за счет износа рельсов и узлов креплений. Несмотря на одинаковый номинальный размер 1520 мм, фактическая средняя ширина колеи в кривых разного радиуса приближается к нормативам ПТЭ 1952 г. [11] (табл. 4).

Целесообразно нормативы оценки связать не с отклонениями от «номинала», а с самими величинами ширины колеи в увязке с радиусом кривой (табл. 5).

Надо уточнить критерии при назначении ограничения скорости движения поездов, разделить штрафные санкции за выявленные средствами диагностики нарушения установленных ОАО «РЖД» требований и выдачу предупреждений по ограничению скорости движения поездов при нарушении условий безопасности. Это разные сущности, но исторически, еще со времен МПС СССР их часто смешивают.

Таблица 5

**Степени отступлений по уширению колеи в кривых**

Table 5

**Track width deviations in curves**

Установленные скорости, км/ч, пассажирские/грузовые	Степень	Уширение колеи, мм		
		Прямые и кривые радиусом до 650 м	Кривые радиусом 649–350 м	Кривые радиусом менее 350 м
101–140	I	От 1529 до 1534	От 1529 до 1536	—
	II	От 1535 до 1538	От 1537 до 1542	—
	III	От 1539 до 1542	От 1543 до 1546	—
	IV	Более 1542	Более 1546	—
26–100 / 26–90	I	От 1529 до 1536	От 1538 до 1540	—
	II	От 1537 до 1542	От 1541 до 1543	От 1544 до 1546
	III	От 1543 до 1546	От 1544 до 1548	От 1547 до 1548
	IV	Более 1546	Более 1548	Более 1548
25 и менее	I	От 1529 до 1538	От 1538 до 1540	—
	II	От 1539 до 1544	От 1541 до 1545	От 1544 до 1546
	III	От 1545 до 1548	От 1546 до 1548	От 1547 до 1548
	IV	Более 1548	Более 1548	Более 1548

Выше был приведен пример — возвышение наружного рельса в кривых более 150 мм. Поскольку в ПТЭ записано, что возвышение не должно превышать 150 мм, нарушение этого требования, следовательно, должно быть классифицировано как неисправность, но закрытие из-за этого движения поездов, как указано в Инструкции 436/р, ничем не оправдано.

**Заключение.** Все выявленные нарушения установленных ОАО «РЖД» требований должны фиксироваться в соответствующих ведомостях, путевые подразделения, обслуживающие эти участки пути, должны получать штрафные баллы и предписания об устранении неисправностей, но совсем не обязательно при этом выдавать ограничения скорости.

В то же время есть отступления от норм содержания пути и его элементов, по которым выдаются предупреждения об ограничении скорости, но путевые подразделения (участки, дистанции), обслуживающие эти участки пути, не должны получать штрафные баллы, так как устранение этих неисправностей лежит вне сферы их возможностей. Например, сверхнормативный боковой износ рельсов может быть устранен заменой рельсов, но получение новых рельсов не может быть обеспечено мастером участка или начальником дистанции пути.

Должен быть разработан и утвержден ОАО «РЖД» перечень таких параметров и показателей. При оценке отдельных отступлений от норм содержания пути и назначении величин ограничения скорости движения в большей степени следует учитывать особенности конструкции пути и условий эксплуатации. Причем может быть как ужесточение, так и послабление оценок. Например, Инструкция 436/р предусматривает ужесточение оценок на мостах, в изолирующих стыках, на стрелочных переводах.

Надо более строго оценивать уширения колеи на участках с большим количеством дефектных шпал или скреплений. С другой стороны, в крутых кривых с большим износом рельсов и их малыми отжатиями при ширине колеи от 1549 до 1551 мм следовало бы вместо закрытия движения давать ограничение скорости до 15 км/ч.

При оценке выявленных неисправностей и определении величин ограничения скорости надо в большей степени учитывать сочетания и последовательности отдельных отступлений. Например, отдельная просадка величиной 20 мм наверняка не опасна для скоростного поезда «Сапсан», а вот последовательности просадок и перекосов или сочетания с рихтовками даже меньшей величины приводят к повышенным колебаниям поезда, дискомфорту пассажиров, хотя и не угрожают безопасности.

Для пассажирских и скоростных линий целесообразно оценку состояния пути производить не только по критериям безопасности (они за редчайшими исключениями выполняются), но и по показателям плавности хода поезда и комфорта пассажиров.

Перечень дополнительных условий и показателей оценки неисправностей должен быть определен по результатам большой отдельной работы.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зензинов Б.Н. Новая Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 1. С. 2–6.
2. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 28 февраля 2020 г. № 436/р. URL: <https://rzd-puteetz.ru/instruktsiya-po-otsenke-sostoyaniya-relsovoj-kolei-puteizmeritelnyimi-sredstvami> (дата обращения: 12.08.2022).
3. Шаройко В.С. К вопросу о комфортабельности езды на железных дорогах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00. Л.: ЛИИЖТ им. акад. В.Н. Образцова, 1960. 19 с.
4. Вериго М.Ф. Основные этапы и проблемы взаимодействия пути и подвижного состава // Развитие науки и техники на железнодорожном транспорте: [сб. ст.] / под ред. А.Д. Каретникова. М.: Транспорт, 1968. С. 61–72. (Труды Всесоюзного ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. ЦНИИ МПС пятьдесят лет; вып. 360).
5. Ромен Ю.С. О движении железнодорожных экипажей в кривых участках пути // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1964. № 6. С. 16–20.
6. Ромен Ю.С. Взаимодействие пути и экипажа в рельсовой колее. М.: РАС, 2019. 160 с.
7. Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств / В.Ф. Ушкалов [и др.]; под ред. В.Ф. Ушкалова. Киев: Наукова думка, 1989. 240 с.
8. Погорелов Д.Ю. Введение в моделирование динамики систем тел: учеб. пособие. Брянск: Изд-во БГТУ, 1997. 155 с.
9. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 317 с.
10. Певзнер В.О., Ромен Ю.С. Основы разработки нормативов содержания пути и установления скоростей движения. М.: Интекст, 2013. 224 с. (Труды ОАО «ВНИИЖТ»).
11. Зензинов Б.Н. Анализ фактических величин ширины колеи и износа рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 11. С. 7–10.

## REFERENCES

1. Zenzinov B.N. Novaya Instruktsiya po otsenke sostoyaniya rel'sovoy kolei puteizmeritel'nymi sredstvami [New Instructions for assessing the state of the rail gauge by means of track measuring equipment]. *Put' i putevoe khozyaystvo = Railway Track and Facilities*. 2022;(1):2-6. (In Russ.).
2. Instruktsiya po otsenke sostoyaniya rel'sovoy kolei puteizmeritel'nymi sredstvami i meram po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya poezdov [Instructions for assessing the state of rail track by

means of track measuring equipment and measures to ensure the safety of train traffic], approved by order of Russian Railways Company dated February 28, 2020 No. 436/r. URL: <https://rzd-puteetz.ru/instruktsiya-po-otsenke-sostoyaniya-relsovoj-kolei-puteizmeritelnyimi-sredstvami> (access date: 12.08.2022). (In Russ.).

3. Sharoyko V. S. K voprosu o komfortabel'nosti ezdy na zheleznykh dorogakh [To the question of the comfort of riding on railways]. Cand. of Sci. (Engineering) thesis synopsis: 05.00.00. Leningrad: LIIZhT Publ.; 1960. 19 p. (In Russ.).

4. Verigo M. F. Osnovnye etapy i problemy vzaimodeystviya puti i podvizhnogo sostava [Main stages and problems of interaction between the track and rolling stock]. *Razvitie nauki i tekhniki na zheleznodorozhnom transporte* [Development of science and technology in railway transport]. (Collection of articles). Ed. by A. D. Karetnikov. Moscow: Transport Publ.; 1968. P. 61–72. (Proceedings of the All-Union Order of the Red Banner of Labor of the Railway Research Institute. Central Research Institute of the Ministry of Railways for fifty years; Issue 360). (In Russ.).

5. Romen Yu. S. O dvizhenii zheleznodorozhnykh ekipazhey v krivykh uchastkakh puti [On the movement of railway vehicles in curved sections of the track]. *Vestnik All-Union nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 1964;(6):16–20. (In Russ.).

6. Romen Yu. S. Vzaimodeystvie puti i ekipazha v rel'sovoy kolee [Interaction of the path and the crew in the rail track]. Moscow: RAS Publ.; 2019. 160 p. (In Russ.).

7. Ushkalov V. F., Reznikov L. M., Ikkol V. S. et al. Matematicheskoe modelirovaniye kolebaniy rel'sovykh transportnykh sredstv [Mathematical modeling of vibrations of rail vehicles]. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1989. 240 p. (In Russ.).

8. Pogorelov D. Yu. Vvedenie v modelirovaniye dinamiki sistem tel [Introduction to modeling the dynamics of systems of bodies]. Textbook. Bryansk: BGTU Publ.; 1997. 155 p. (In Russ.).

9. Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [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 Publ.; 1996. 317 p. (In Russ.).

10. Pevzner V. O., Romen Yu. S. Osnovy razrabotki normativov soderzhaniya puti i ustanovleniya skorostey dvizheniya [Fundamentals of the development of standards for the maintenance of the path and the establishment of speeds of movement]. Moscow: Intext Publ.; 2013. 224 p. (Proceedings of the Railway Research Institute) (In Russ.).

11. Zenzinov B. N. Analiz fakticheskikh velichin shiriny kolei i iznosa rel'sov [Analysis of the actual values of track width and wear of rails]. *Put' i putevoe khozyaystvo = Railway Track and Facilities*. 2008;(11):7–10. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Борис Николаевич ЗЕНЗИНОВ,

канд. техн. наук, руководитель группы «Диагностика путевой инфраструктуры», научный центр «Путевая инфраструктура и вопросы взаимодействия колесо — рельс», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 775980, <https://orcid.org/0000-0003-1925-365X>

### Юрий Семёнович РОМЕН,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, научный центр «Путевая инфраструктура и вопросы взаимодействия колесо — рельс», Научно-исследовательский

институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, [uromen@mail.ru](mailto:uromen@mail.ru)), Author ID: 764126, <https://orcid.org/0000-0002-0113-4305>

### Максим Владимирович КРИВОЛАПОВ,

канд. техн. наук, технический эксперт, научный центр «Путевая инфраструктура и вопросы взаимодействия колесо — рельс», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, [krivolapov.maksim@vniizht.ru](mailto:krivolapov.maksim@vniizht.ru)), Author ID: 649771, <https://orcid.org/0000-0002-4845-789X>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Boris N. ZENZINOV,

Cand. of Sci. (Engineering), Head of the Track Infrastructure Diagnostics Group, Track Infrastructure and Issues of Rail – Wheel Interaction Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 775980, <https://orcid.org/0000-0003-1925-365X>

### Yuriy S. ROMEN,

Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher, Track Infrastructure and Issues of Rail – Wheel Interaction Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St., [uromen@mail.ru](mailto:uromen@mail.ru)), Author ID: 764126, <https://orcid.org/0000-0002-0113-4305>

### Maksim V. KRIVOLAPOV,

Cand. of Sci. (Engineering), Technical Expert, Track Infrastructure and Issues of Rail – Wheel Interaction Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St., [krivolapov.maksim@vniizht.ru](mailto:krivolapov.maksim@vniizht.ru)), Author ID: 649771, <https://orcid.org/0000-0002-4845-789X>

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Борис Николаевич ЗЕНЗИНОВ.** Анализ и разработка методов и нормативов оценки состояния железнодорожного пути мобильными средствами диагностики, мониторинг характеристик состояния пути и их прогнозирование. Оптимизация нормативов оценки фактического состояния пути в зависимости от скоростей движения поездов и условий эксплуатации (50%).

**Юрий Семёнович РОМЕН.** Теоретические вопросы взаимодействия пути и экипажа в рельсовой колее, разработка математической модели такого взаимодействия, разработка нормативов содержания пути и установления допустимых скоростей движения (30%).

**Максим Владимирович КРИВОЛАПОВ.** Анализ основных отечественных и зарубежных работ, относящихся к тематике настоящего исследования, проведение моделирующих расчетов взаимодействия пути и экипажа в рельсовой колее (20%).

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Boris N. ZENZINOV.** Analysis and development of methods and standards for assessing the state of the railway track by mobile diagnostic tools, monitoring the characteristics of the state of the track and their prediction. Optimisation of standards for assessing the actual state of the track, depending on the speed of trains and operating conditions (50%).

**Yuriy S. ROMEN.** Solving theoretical issues of the interaction of the track and the crew in the rail track, the development of a mathematical model of such interaction, the development of standards for the maintenance of the track and the establishment of permissible speeds (30%).

**Maksim V. KRIVOLAPOV.** Analysis of the main Russian and foreign works related to the subject of this study, simulation calculations of the interaction between the track and the cab in the rail track (20%).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The authors have read and approved the final manuscript.*

**Прозрачность финансовой деятельности:** авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

**Financial transparency:** the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 23.08.2022, рецензия от первого рецензента получена 26.09.2022, рецензия от второго рецензента получена 19.10.2022, принята к публикации 01.11.2022.

The article was submitted 23.08.2022, first review received 26.09.2022, second review received 19.10.2022, accepted for publication 01.11.2022.

## 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
- Изучения 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





ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 629.4.23:673.8

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-330-338

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



## МОНОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МОТОРНО-ОСЕВЫЕ ПОДШИПНИКИ ТЕПЛОВЗОВ: ЗАМЕНА МАТЕРИАЛА С БРОНЗЫ НА КОМПЛЕКСНО-ЛЕГИРОВАННЫЙ АЛЮМИНИЕВЫЙ СПЛАВ

А. Е. Миронов, И. С. Гершман✉, А. А. Крылов, П. О. Мусерский

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Замена материала монометаллических моторно-осевых подшипников, изготавливаемых в настоящее время, с бронзы на алюминиевый сплав целесообразна для повышения безопасности движения в связи с более высокой надежностью и экономичностью таких подшипников.

**Материалы и методы.** Рассмотрены материалы монометаллических моторно-осевых подшипников — бронзы и предлагаемых комплексно-легированных алюминиево-оловянных сплавов. Стандартными методами определены механические свойства: предел прочности на растяжение, относительное удлинение (пластичность), твердость по Бринеллю, ударная вязкость. Антифрикционные свойства (прирабатываемость, задиростойкость, износостойкость антифрикционного сплава и сопряженной с ним стали, температура нагрева поверхности стали и коэффициент трения) определялись по методикам ВНИИЖТ, утвержденным ОАО «РЖД», на машине трения СМЦ-2. С дизельным маслом М-14В<sub>2</sub> испытаны бронза и три марки алюминиевых сплавов, а с осевым маслом — бронза, баббит Б16 и одна марка алюминиевого сплава.

**Результаты.** В результате исследований показана возможность замены бронзы на комплексно-легированные алюминиевые сплавы как по экономическим показателям, так и по антифрикционным свойствам. Проведено сравнение механических свойств, по большинству из которых алюминиевые сплавы превосходят или не уступают бронзе. Исключением является пластичность, по значениям которой бронза превосходит предлагаемые сплавы.

**Обсуждение и заключение.** По комплексу служебных характеристик, полученных при лабораторных исследованиях, представляется целесообразной замена бронзы на комплексно-легированный алюминиевый антифрикционный сплав. Окончательное решение о подобной замене может быть принято после стендовых и эксплуатационных испытаний моторно-осевых подшипников на тепловозах.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** моторно-осевые подшипники тепловозов, бронза, алюминиевые сплавы, механические свойства, антифрикционные свойства, экономическая эффективность, стендовые и эксплуатационные испытания

**Для цитирования:** Миронов А. Е., Гершман И. С., Крылов А. А., Мусерский П. О. Монометаллические моторно-осевые подшипники тепловозов: замена материала с бронзы на комплексно-легированный алюминиевый сплав // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 4. С. 330–338. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-330-338>.

✉ [gershman.iosif@vniizht.ru](mailto:gershman.iosif@vniizht.ru) (И. С. Гершман)

© Миронов А. Е., Гершман И. С., Крылов А. А.,  
Мусерский П. О., 2022



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.4.23:673.8

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-330-338

EDN: <https://elibrary.ru/zfxyd1>



## MONOMETALLIC MOTOR-AXIAL BEARINGS OF DIESEL LOCOMOTIVES: REPLACING BRONZE WITH COMPLEX ALUMINIUM ALLOY

Alexander E. Mironov, Iosif S. Gershman✉,  
Anton A. Krylov, Prokopy O. Muserskiy

Railway Research Institute,  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Replacing the material of monometallic motor-axial bearings currently manufactured from bronze to aluminium alloy is advisable to improve traffic safety due to the higher reliability and efficiency of such bearings.

**Materials and methods.** This article studies the materials of monometallic motor-axial bearings, bronze and the proposed complex aluminium-tin alloys. Mechanical properties are determined by standard methods: tensile strength, relative elongation (ductility), Brinell hardness, impact strength. Antifriction properties (abradability, score resistance, wear resistance of the antifriction alloy and the steel associated with it, the heating temperature of the steel surface and the coefficient of friction) were determined according to the methods of the Railway Research Institute approved by JSC Russian Railways on the SMTs-2 friction machine. Bronze and three grades of aluminium alloys were tested with M-14V<sub>2</sub> diesel oil, and bronze, B16 babbitt and one grade of aluminium alloy were tested with axial oil.

**Results.** This research shows the possibility of replacing bronze with complex-alloyed aluminium alloys both in terms of economic indicators and antifriction properties. A comparison of mechanical properties is carried out, in most of which aluminium alloys are found superior or not inferior to bronze. The exception is ductility, in terms of which bronze surpasses the proposed alloys.

**Discussion and conclusion.** According to the complex of service characteristics obtained in laboratory studies, it seems expedient to replace bronze with complex aluminium antifriction alloy. The final decision on such a replacement could be made after bench and operational tests of motor-axial bearings on diesel locomotives.

**KEYWORDS:** motor-axial bearings of diesel locomotives, bronze, aluminium alloys, mechanical properties, antifriction properties, economic efficiency, bench and operational tests

**For citation:** Mironov A. E., Gershman I. S., Krylov A. A., Muserskiy P. O. Monometallic motor-axial bearings of diesel locomotives: replacing bronze with complex aluminium alloy. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(4):330-338. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-330-338>.

✉ gershman.iosif@vniizht.ru (I. S. Gershman)

© Mironov A. E., Gershman I. S., Krylov A. A.,  
Muserskiy P. O., 2022

**Введение.** Среди нескольких типов моторно-осевых подшипников (МОП) широко распространены монометаллические вкладыши, изготовленные из бронзы марки БрО4Ц4С17 в соответствии с ГОСТ 613–79 [1]. По данным Н. М. Рудницкого [2], бронза этой марки наиболее подходит для литейного изготовления монометаллических подшипников скольжения, так как она менее других бронз изнашивается сама и минимально изнашивает стальное контртело при наличии прочности, достаточной для моторно-осевых подшипников. В работах [3–5] рассмотрены все возможные случаи условий эксплуатации данных бронзовых МОП. При этом особое внимание уделено работе бронзы в аварийных условиях, когда отмечается появление на стальной поверхности осей сетки трещин или даже полного разрушения оси по эффекту Ребиндера [6]. П. А. Ребиндер в начале XX в. открыл и теоретически обосновал эффект адсорбционного снижения прочности твердых тел под действием поверхностно-активных веществ. Н. А. Буше [7], основываясь на теории Ребиндера, доказал, что для стали таким поверхностно-активным веществом является расплавленная медь, а алюминий и его сплавы поверхностной активностью для стали не обладают. Было установлено, что при наличии растягивающих напряжений и расплавленной меди идет процесс проникновения меди по межзеренным границам в сталь. Чем больше образуется расплавленной меди, тем существеннее трещинообразование, вплоть до полного разрушения стальной детали. При меньшем количестве расплавленной меди образуются омедненные трещины, служащие концентраторами напряжений, от которых развиваются усталостные трещины, а наличие самих трещин повышает износ сопряженных деталей, в данном случае — вкладышей МОП.

Следовательно, замена материала МОП с бронзы на алюминиевый сплав целесообразна для безопасности движения, так как в этом случае омедненные трещины не образуются.

Бронзовые МОП смазываются осевым маслом с помощью польстера, что не может гарантировать гидродинамического режима трения при знакопеременных нагрузках [8–10], поэтому одним из основных требований к материалу подшипников является способность выдерживать эти нагрузки без разрушений [8, 9], т. е. обладать необходимым комплексом механических свойств.

В работах [2, 8, 11–14] сформулированы основные требования к антифрикционным материалам:

- достаточная усталостная прочность, выражающаяся в способности выдерживать знакопеременные нагрузки во всем диапазоне рабочих температур;
- низкий коэффициент трения в условиях смешанного и граничного трения;

- высокая износостойкость подшипникового материала и способность в минимальной степени изнашивать и повреждать стальную ось в аварийной ситуации;

- способность поглощать и удерживать посторонние твердые абразивные частицы без повреждения поверхности трения оси;

- высокая коррозионная стойкость в среде смазочного масла;

- способность компенсировать неточности изготовления и сборки за счет хорошей прирабатываемости;

- экономичность материала подшипника.

Очевидно, что некоторые из указанных требований противоречивы и в ряде случаев являются взаимоисключающими. Например, увеличение прочности и износостойкости материала обычно достигается повышением твердости, а это, в свою очередь, ведет к ухудшению прирабатываемости, снижает способность удерживать или поглощать абразив, а также приводит к увеличению износа стального контртела. Поэтому выбор материала подшипника является определением необходимых компромиссов для максимально возможного удовлетворения всех противоречивых требований, к ним предъявляемых, и получения наилучших соотношений цена/потребительские качества.

По мере снижения стоимости алюминия были проведены работы по замене бронз в монометаллических подшипниках на алюминиевые сплавы, легированные медью, сурьмой, никелем, железом и кремнием [5, 15]. Новые сплавы интенсивно изнашивали стальное контртело. Выход был найден применением сплавов системы Al–Sn–Cu [16, 17], но данные сплавы имеют ограниченную усталостную прочность. Высокая стоимость олова обусловила поиск других мягких металлов для алюминиевых сплавов, в первую очередь свинца [18, 19]. Эти сплавы имели значительную ликвацию элементов по высоте слитка.

В настоящее время наибольшее развитие получили разработки комплексно-легированных алюминиевых сплавов, таких как системы Al–Si–Cu–Sn–Pb, Al–Cu–Sn–Pb [20, 21], Al–Sn–Si–Cu–Bi, Al–Sn–Si–Cu–Pb–Bi [22], предложенные специалистами Московского института стали и сплавов (МИСиС) и Института проблем механики РАН (ИПМех РАН).

Авторами данной статьи в содружестве со специалистами МГТУ «СТАНКИН» разработана гамма сплавов системы Al–Sn–Pb–Cu–Si–Mg–Zn–Ti [23–25], способная, по мнению разработчиков, заменить бронзу БрО4Ц4С17 в качестве материала монометаллических МОП.

**Материалы и методы.** Химический состав бронзы марки БрО4Ц4С17 и трех исследуемых комплексно-легированных алюминиевых сплавов приведен в табл. 1.

Таблица 1

## Химический состав бронзы и исследуемых алюминиевых сплавов

Table 1

## Chemical composition of bronze and the proposed aluminium alloys

№ п/п	Марка сплава	Содержание элементов, % масс.							
		Sn	Pb	Zn	Cu	Mg	Si	Ti	Al
1	Бронза БрО4Ц4С17	4,6	17,2	4,7	Ост.	—	—	—	—
2	Сплав А09М3,5Ц3С3МгКТ	8,7	3,2	2,9	3,4	0,4	0,5	0,03	Ост.
3	Сплав А06М2,5С2,5Ц4Мг1,5К1,5Т	5,8	2,7	4,1	2,3	1,5	1,5	0,04	Ост.
4	Сплав А05,5М3,5С2,5Ц2,5Мг1,5КТ	5,4	2,6	2,3	3,5	1,7	0,8	0,04	Ост.

Исследования антифрикционных свойств с осевым маслом «В» (всесезонным) проводились для бронзы, одного алюминиевого сплава и баббита Б16 (Pb + 16,2 % Sn + 16,1 % Sb + 1,9 % Cu), с дизельным маслом марки М-14В<sub>2</sub> — для бронзы и трех алюминиевых сплавов.

Сплавы выплавлялись в индукционных печах и разливались в чугунные изложницы. После отливки для снятия внутренних напряжений и глобулизации выделений легкоплавких фаз слитки подвергались отжигу при 350 °С в течение 3 ч с охлаждением на воздухе. Из термообработанных слитков изготавливались образцы. Твердость сплавов определялась по Бринеллю. Испытания на растяжение с определением предела прочности и относительного удлинения проводились по ГОСТ 1497–84 [26] на цилиндрических образцах диаметром  $d_0 = 6$  мм и расчетной длиной  $l_0 = 30$  мм.

Испытания на ударную вязкость образцов проводились в соответствии с ГОСТ 9454–78 [27] на образцах квадратного сечения 10×10×55 мм с U-образным надрезом глубиной 2 мм.

Все трибологические испытания сплавов и бронзы проводились по схеме «вал—колодка» на серийной машине СМЦ-2. Звездочки из антифрикционных материалов для проведения испытаний на прирабатываемость имели увеличенный до 22,5 мм радиус скругления рабочей поверхности, в то время как образцы для определения износо- и задиростойкости имели радиус 20 мм. В качестве контртела использовались стальные ролики радиусом 20 мм и шириной 10 мм. При испытаниях с маслом М-14В<sub>2</sub> они изготавливались из стали 38ХН3МА, а при работе с осевым всесезонным маслом — из осевой стали колесных пар тепловоза.

Масло М-14В<sub>2</sub> в процессе испытаний подавалось на стальной ролик капельным способом с интенсивностью две капли в минуту (0,02 л/ч), а смазывание осевым маслом «В» (всесезонным) производилось окунанием нижнего края стального ролика в масля-

ную ванну. В первом случае капельная смазка обеспечивала граничный режим, а во втором — смешанный режим смазывания.

Скорость вращения стального ролика во всех случаях испытаний составила 500 об/мин.

Испытания на прирабатываемость заключались в периодическом измерении фактической площади контакта трущихся поверхностей образца в процессе постепенного увеличения нагрузки. Нагрузка ступенчато увеличивалась через каждые 10 мин на 137–187 Н. Начальная нагрузка составляла 304 Н, а завершались испытания при нагрузке 1058 Н. За значение приработки принималось среднее значение площади пятна контакта по трем испытаниям.

При испытаниях на износостойкость каждая пара трения проходила этап приработки в течение 30 мин при нагрузке 304 Н до достижения контурной площади не менее 90–95 % от номинальной. После приработки колодка и ролик снимались с испытательной машины, промывались, обезжиривались, сушились и взвешивались. После повторной установки на СМЦ-2 испытания проводились в течение 40 ч при постоянной нагрузке (617 Н) и скорости вращения (500 об/мин). После 40 ч трения образцы повторно снимались, промывались, обезжиривались, сушились и взвешивались. Разница в весе после 40 ч трения в сравнении с весом после приработки показывала весовой износ колодки и ролика.

Испытания на задиростойкость начинали с нагрузки 304 Н, после чего через каждые 10 мин нагрузку ступенчато увеличивали на 97–147 Н. Испытания продолжались до нагрузки, при которой происходило скачкообразное повышение момента трения или появлялось интенсивное дымление масла. Данная нагрузка считалась моментом наступления задира, а среднее значение по трем испытаниям принималось за нагрузку заедания, характеризующую задиростойкость пары трения.

**Результаты и обсуждение.** Проведенные исследования показали, что варьируя химический состав

алюминиевых сплавов, можно в широких диапазонах изменять их механические и трибологические характеристики. При этом наиболее непонятная ситуация наблюдается с уровнем механических свойств бронзы и рассматриваемых алюминиевых сплавов (табл. 2). Так, по пределу прочности данные материалы имеют близкие показатели, а сплав А09М3,5Ц3С3МгКТ даже превосходит бронзу более чем на 10 %.

В то же время бронза значительно пластичнее всех трех алюминиевых сплавов и незначительно тверже. Ударная вязкость, характеризующая работу на зарождение и развитие трещин, может быть у алюминиевых сплавов как почти в 1,5–2 раза ниже, чем у бронзы, так и более чем в 2 раза превосходить бронзу (А09М3,5Ц3С3МгКТ). Это не позволяет заранее предугадать работоспособность алюминиевых МОП по сравнению с бронзовыми на основе сопоставления их механических свойств.

Трибологические испытания с дизельным маслом М-14В<sub>2</sub> (табл. 3) дают более однозначную картину в пользу алюминиевых антифрикционных сплавов. Все три рассматриваемых сплава превосходят бронзу по задиростойкости (в 2–2,5 раза), по прирабатываемости (до 25 %), по меньшему весовому износу антифрикционных материалов (до 6,75 раза), по меньшему износу стального контртела (в 5–6,5 раза).

При трении двух из трех алюминиевых сплавов нагрев стального контртела происходит слабее, чем с бронзой. Однако по значениям коэффициента трения бронза превосходит все три алюминиевых сплава. Данные эксперименты были проведены для проверки материалов монометаллических подшипников дизелей тепловозов (втулок компрессоров). Стендовые испытания опытной партии подшипников из алюминиевых сплавов подтвердили возможность замены ими бронзовых подшипников [22].

Таблица 2

Механические свойства бронзы и алюминиевых сплавов

Table 2

Mechanical properties of bronze and aluminium alloys

№ п/п	Механические свойства	Бронза БрО4Ц4С17	Сплав А09М3,5Ц3С3МгКТ	Сплав А06М2,5С2,5Ц4Мг1,5К1,5Т	Сплав А05,5М3,5С2,5Ц2,5Мг1,5КТ
1	Предел прочности при растяжении $\sigma_b$ , МПа	148	168	140	144
2	Относительное удлинение при растяжении $\sigma_s$ , %	8,8	5,5	1,9	2,9
3	Твердость по Бринеллю, НВ	65	60	55	53
4	Ударная вязкость КСv, КДж/м <sup>2</sup>	40	83	24	32

Таблица 3

Трибологические свойства бронзы и алюминиевых сплавов по результатам лабораторных трибологических испытаний с дизельным маслом марки М-14В<sub>2</sub>

Table 3

Tribological properties of bronze and aluminium alloys according to the results of laboratory tribological tests with М-14V<sub>2</sub> diesel oil

№ п/п	Трибологическая характеристика	Бронза БрО4Ц4С17	Сплав А09М3,5Ц3С3МгКТ	Сплав А06М2,5С2,5Ц4Мг1,5К1,5Т	Сплав А05,5М3,5С2,5Ц2,5Мг1,5КТ
1	Нагрузка задира, Н	1081	2407	2330	2846
2	Прирабатываемость, мм <sup>2</sup>	39	50	40	50
3	Износ материала, мг	2,7	2,4	0,4	0,5
4	Износ стального контртела, мг	4,0	0,8	0,6	0,7
5	Коэффициент трения	0,016	0,022	0,018	0,017
6	Нагрев поверхности стального контртела, °С	38	32	40	36

В моторно-осевом блоке тепловозов используются другие масла, наиболее распространенным из которых является осевое масло «В» (всесезонное), которое подается на ось польстером, обеспечивая более щадящий режим трения — смешанную, а не граничную смазку. Так как в настоящее время МОП имеют антифрикционный слой либо из баббита марки Б16, либо из бронзы БрО4Ц4С17, трибологические испытания с маслом осевым «В» были для сравнения проведены именно с этими материалами и со сплавом А09М3,5Ц3С3МгКТ, который имеет наилучший комплекс механических свойств, что чрезвычайно важно для материала монометаллического МОП. При этом данный сплав даже при трении с маслом М-14В<sub>2</sub> превосходит бронзу по задиристости, прирабатываемости, меньше изнашивает и нагревает стальное контртело. Результаты трибологических испытаний материалов при смазке осевым маслом «В» (всесезонным) приведены в табл. 4.

Смена масла и условий трения существенно изменила картину трибологических характеристик.

По сравнению с бронзой задиристость сплава А09М3,5Ц3С3МгКТ еще больше повысилась, а прирабатываемость относительно снизилась, но все равно осталась лучше, чем у бронзы. Следовательно, в аварийной ситуации вероятность задира уменьшилась. Ожидается уменьшение времени обкатки подшипников после их установки на тепловоз. С осевым маслом алюминиевый сплав стал меньше изнашиваться сам, причем разница с бронзой составила 15 раз. Однако при этом алюминиевый сплав в 3 раза больше, чем бронза, стал изнашивать стальное контртело, хотя коэффициент трения у него значительно снизился в сравнении с бронзой, а нагрев стали оказался на одном уровне с бронзой.

Не вызывает сомнения целесообразность замены материала МОП с бронзы на алюминиевый сплав с точки зрения экономичности. Ведь удельный вес алюминиевых сплавов ниже, чем у бронзы, почти в 2,5 раза, а стоимость единицы веса на 30–45% меньше (табл. 5). Соответственно, только благодаря этому стоимость одного вкладыша МОП снизится в 3–4 раза при такой замене.

Таблица 4

Трибологические свойства бронзы, баббита и алюминиевого сплава при работе с осевым маслом «В» (всесезонное)

Table 4

Tribological properties of bronze, babbitt and aluminium alloy when working with axle oil V (all-weather)

№ п/п	Трибологическая характеристика	Бронза БрО4Ц4С17	Баббит Б16	Сплав А09М3,5Ц3С3МгКТ
1	Нагрузка задира, Н	1201	936	2700
2	Прирабатываемость, мм <sup>2</sup>	42	43	35
3	Весовой износ материала, мг	3,2	3,1	0,21
4	Весовой износ стального контртела, мг	5,0	15,0	4,6
5	Коэффициент трения	0,027	0,025	0,023
6	Нагрев поверхности стального контртела, °С	42	40	41

Таблица 5

Оценка физических свойств и экономических показателей трех алюминиевых сплавов относительно бронзы

Table 5

Evaluation of the physical properties and economic performance of three aluminium alloys relative to bronze

№ п/п	Показатель	Бронза БрО4Ц4С17	Сплав А09М3,5Ц3С3МгКТ	Сплав А06М2,5С2,5Ц4Мг1,5К1,5Т	Сплав А05,5М3,5С2,5Ц2,5Мг1,5КТ
1	Удельный вес, %	100	43	43	41
2	Стоимость единицы веса, %	100	70	55	56
3	Вес единицы продукции, %	100	43	43	41
4	Стоимость единицы продукции, %	100	30	24	23

Дополнительный эффект можно ожидать за счет уменьшения энергозатрат на плавку алюминиевого сплава, так как температура плавления алюминия на 300 °С ниже, чем у меди. Возможно получить экономию и при механической обработке данных сплавов, так как трудозатраты для алюминиевых сплавов обычно ниже, чем для бронз.

Кроме повышения безопасности эксплуатации при такой замене материалов можно ожидать и увеличения межремонтных пробегов и уменьшения сменяемости МОП в эксплуатации. Данный вывод обусловлен повышенными трибологическими свойствами сплавов.

**Заключение.** Авторы данной статьи считают, что представленные материалы доказывают возможность и целесообразность замены материала МОП с бронзы на комплексно-легированный алюминиевый сплав. При этом, как показывают итоги стендовых испытаний монометаллических подшипников скольжения турбокомпрессоров тепловозов из подобного сплава, необходимо установить оптимальные размеры масляного зазора между МОП и моторной осью, так как коэффициент линейного расширения алюминиевых сплавов значительно больше, чем у бронзы и, следовательно, при нагреве от трения такой зазор будет сильнее уменьшаться. Определить этот параметр можно при стендовых и эксплуатационных испытаниях. АО «ВНИИЖТ» приглашает к сотрудничеству все заинтересованные организации.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ 613–79. Бронзы оловянные литейные. Марки [Электронный ресурс]: дата введения 1980-01-01. URL: <https://rags.ru/gosts/gost/31486> (дата обращения: 12.09.2022).
- Рудницкий Н. М. Материалы автотракторных подшипников скольжения. М.: Машиностроение, 1965. 164 с.
- Никифоров В. А. Состав и свойства трущихся деталей из цветных металлов на тепловозах и повышение их качества с учетом структурной самоорганизации: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. М., 2003. 30 с.
- Миронов А. Е., Никифоров В. А. О качестве бронзовых вкладышей моторно-осевых подшипников тепловозов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2003. № 1. С. 35–40.
- Буше Н. А. Подшипниковые сплавы для подвижного состава. М.: Транспорт, 1967. 224 с.
- Ребиндер П. А., Лихтман В. А., Масленников В. В. Облегчение деформации металлических монокристаллов под влиянием адсорбции поверхностно-активных веществ // Доклады Академии наук СССР. 1941. Т. 32, № 2. С. 125.
- Буше Н. А. Трение, износ и усталость в машинах. М.: Транспорт, 1987. 223 с.
- Khonsari M. M., Booser E. R. Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication. 3rd Edition. New York: Wiley, 2017. 672 p.
- Основы трибологии (трение, износ, смазка): учеб. для технических вузов / А. В. Чичинадзе [и др.]; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. 2-е изд. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.

- Lorenz N., Offner G., Knaus O. Thermal analysis of hydrodynamic lubrication journal bearings in internal combustion engines // Proceedings of the Institution of mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics. 2017. Vol. 231 (3). P. 406–419. <https://doi.org/10.1177/146441931769387>.
- Скрябин В. А. Особенности применения подшипников скольжения в технологических машинах // Машиностроитель. 2015. № 8. С. 8–21.
- Анализ путей совершенствования и технологии изготовления подшипников коленчатого вала тепловозных дизелей / С. М. Захаров [и др.] // Тяжелое машиностроение. 2015. № 6. С. 11–18.
- Захаров С. М., Никитин А. П., Загорянский Ю. А. Подшипники коленчатых валов тепловозных дизелей. М.: Транспорт, 1981. 181 с.
- Cheng K., Rowe W. B. A selection strategy for the design of externally pressurized journal bearings // Tribology International. 2007. Vol. 28, no. 7. P. 465–474. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(95\)00011-R](https://doi.org/10.1016/0301-679X(95)00011-R).
- Алюминиевые сплавы антифрикционного назначения / Н. А. Белов [и др.]; под ред. А. Е. Миронова [и др.]. М.: Изд. Дом «МИСиС», 2016. 222 с.
- Pratt G. C. Materials for plain bearings // International Metallurgical Reviews. 1973. Vol. 18 (2). P. 62–88.
- Буше Н. А. Трение, износ и усталость в машинах: Транспортная техника: учеб. для вузов ж.-д. транспорта. М.: Транспорт, 1987. 223 с.
- Рассадин Ю. А., Рудницкий Н. М., Авинян Ю. Л. Повышение качества алюминиевых антифрикционных сплавов введением в них свинца // Повышение качества и надежности биметаллических подшипников: [сб. ст.] / [под ред. В. А. Ротенберга]. М.: ЦНИИТЭИ Тракторсельхозмаш, 1972. С. 30–35. (Технология и автоматизация производственных процессов).
- Маркова Т. Ф. Антифрикционные материалы системы Al–Pb–Sn для подшипников скольжения транспортных дизелей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. М., 1986. 23 с.
- Tribological and Structural study of new aluminum based antifriction material / I. I. Kurbatkin [et al.] // Journal of Friction and Wear. 2014. Vol. 35, no. 2. P. 93–97. <https://doi.org/10.3103/S106836661402007X>.
- Phase composition and structure of aluminum Al–Cu–Si–Sn–Pb alloys / N. A. Belov [et al.] // The physics of metals and metallography. 2016. Vol. 117 (6). P. 570–587. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0031918X16040025>.
- Столярова О. О. Обоснование состава и структуры литейных антифрикционных алюминиевых сплавов, легированных легкоплавыми металлами: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. М., 2016. 217 с.
- Миронов А. Е., Котова Е. Г. Разработка новых марок литейных алюминиевых антифрикционных сплавов для замены бронз в узлах трения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. С. 1136–1140.
- Новые антифрикционные алюминиевые сплавы с повышенной способностью к адаптации при трении для монометаллических подшипников скольжения взамен бронз / С. Н. Григорьев [и др.]. М.: МГУ «СТАНКИН», 2021. 136 с.
- Новые антифрикционные алюминиевые сплавы для литых монометаллических подшипников скольжения. Стендовые испытания / А. Е. Миронов [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79, № 4. С. 217–223. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-4-217-223>.
- ГОСТ 1497–84 (ИСО 6892–84). Металлы. Методы испытаний на растяжение [Электронный ресурс]: дата введения 1986-01-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004888> (дата обращения: 12.09.2022).

27. ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах [Электронный ресурс]: дата введения 1979-01-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005045> (дата обращения: 12.09.2022).

## REFERENCES

- GOST 613–79. Bronzy olovyannye liteynye. Marki [Tin foundry bronzes. Grades]. Introduction date: 1980-01-01. URL: <https://rags.ru/gosts/gost/31486> (access date: 12.09.2022). (In Russ.).
- Rudnitskiy N. M. Materialy avtotraktornykh podshipnikov skol'zheniya [Materials of autotractor plain bearings]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1965. 164 p. (In Russ.).
- Nikiforov V. A. Sostav i svoystva trushchikhysya detaley iz tsvetnykh metallov na teplovozhakh i povyshenie ikh kachestva s uchetom strukturnoy samoorganizatsii [Composition and properties of rubbing parts made of non-ferrous metals on diesel locomotives and improving their quality, taking into account structural self-organization]. Cand. of Sci (Engineering) thesis synopsis: 05.02.01. Moscow; 2003. 30 p. (In Russ.).
- Mironov A. E., Nikiforov V. A. O kachestve bronzovykh vkladyshey motorno-osevykh podshipnikov teplovozov [On the quality of bronze liners of motor-axial bearings for diesel locomotives]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 2003;(1):35-40. (In Russ.).
- Bushe N. A. Podshipnikovyie splavy dlya podvizhnogo sostava [Bearing alloys for rolling stock]. Moscow: Transport Publ.; 1967. 224 p. (In Russ.).
- Rebinder P. A., Likhtman V. A., Maslennikov V. V. Oblegchenie deformatsii metallicheskih monokristallov pod vliyaniem adsorbtsii poverkhnostno-aktivnykh veshchestv [Facilitation of deformation of metal single crystals under the influence of adsorption of surface-active substances]. *Doklady Akademii nauk SSSR = Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 1941;32(2):125. (In Russ.).
- Bushe N. A. Trenie, iznos i ustalost' v mashinakh [Friction, wear and fatigue in machines]. Moscow: Transport Publ.; 1987. 223 p. (In Russ.).
- Khonsari M. M., Booser E. R. Applied Tribology: Vearing Design and Lubrication. 3rd Edition. New York: Wiley; 2017. 672 p.
- Chichinadze A. V., Braun E. D., Bushe N. A. et al. Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka) [Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication)]. Textbook. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2001. 664 p. (In Russ.).
- Lorenz N., Offner G., Knaus O. Thermal analysis of hydro-dynamic lubrication journal bearings in internal combustion engines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics*. 2017;231(3):406-419. <https://doi.org/10.1177/146441931769387>. (In Russ.).
- Skryabin V. A. Osobennosti primeneniya podshipnikov skol'zheniya v tekhnologicheskikh mashinakh [Features of the use of plain bearings in technological machines]. *Mashinostroitel' = Mechanic Engineer*. 2015;(8):8-21. (In Russ.).
- Zakharov S. M., Mironov A. E., Ermolaev A. A., Skvortsov A. E. Analiz putey sovershenstvovaniya i tekhnologii izgotovleniya podshipnikov kolenchatogo vala teplovozhnykh dizeley [Analysis of ways to improve and the technology for the manufacture of crankshaft bearings for diesel locomotives]. *Tyazheloe mashinostroenie = Heavy Engineering*. 2015;(6):11-18. (In Russ.).
- Zakharov S. M., Nikitin A. P., Zagoryanskiy Yu. A. Podshipniki kolenchatykh valov teplovozhnykh dizeley [Bearings of crankshafts of diesel locomotives]. Moscow: Transport Publ.; 1981. 181 p. (In Russ.).
- Cheng K., Rowe W. B. A selection strategy for the design of externally pressurized journal bearings. *Tribology International*. 2007;28(7):465-474. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(95\)00011-R](https://doi.org/10.1016/0301-679X(95)00011-R).
- Belov N. A., Gershman E. I., Gershman I. S. et al. Alyuminievyie splavy antifriktsionnogo naznacheniya [Aluminum antifriction alloys]. Moscow: MISiS Publ.; 2016. 222 p. (In Russ.).
- Pratt G. C. Materials for plain bearings. *International Metallurgical Reviews*. 1973;18(2):62-88. (In Russ.).
- Bushe N. A. Trenie, iznos i ustalost' v mashinakh: Transportnaya tekhnika [Friction, wear and fatigue in machines: Transport technology]. Textbook. Moscow: Transport Publ.; 1987. 223 p. (In Russ.).
- Rassadin Yu. A., Rudnitskiy N. M., Avinyan Yu. L. Povyshenie kachestva alyuminievykh antifriktsionnykh splavov vvedeniem v nikh svintsa [Improving the quality of aluminum antifriction alloys by introducing lead into them]. Povyshenie kachestva i nadezhnosti bimetallicheskih podshipnikov [Improving the quality and reliability of bimetallic bearings]. Collection of articles, ed. by V. A. Rotenberg. Moscow: TsNIITEI Traktorsel'khoz mash Publ.; 1972. P. 30–35. (In Russ.).
- Markova T. F. Antifriktsionnye materialy sistemy Al–Pb–Sn dlya podshipnikov skol'zheniya transportnykh dizeley [Anti-friction Al–Pb–Sn materials for plain bearings of transport diesel engines]. Cand. of Sci. (Engineering) thesis synopsis: 05.02.01. Moscow; 1986. 23 p. (In Russ.).
- Kurbatkin I. I., Belov N. A., Ozerskiy O. N. et al. Tribological and Structural study of new aluminum based antifriction material. *Journal of Friction and Wear*. 2014;35(2):93-97. <https://doi.org/10.3103/S106836661402007X>.
- Belov N. A., Stolyarova O. O., Murav'eva T. I., Zagorskii D. L. Phase composition and structure of aluminum Al–Cu–Si–Sn–Pb alloys. *The physics of metals and metallography*. 2016;117(6):570-587. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0031918X16040025>.
- Stolyarova O. O. Obosnovanie sostava i struktury liteynykh antifriktsionnykh alyuminievykh splavov, legirovannykh legkoplavkami metallami [Substantiation of the composition and structure of cast antifriction aluminium alloys alloyed with low-melting metals]. Cand. of Sci. (Engineering) thesis: 05.16.01. Moscow; 2016. 217 p. (In Russ.).
- Mironov A. E., Kotova E. G. Razrabotka novykh marok liteynykh alyuminievykh antifriktsionnykh splavov dlya zameny bronz v uzlakh treniya [Development of new grades of cast aluminium antifriction alloys to replace bronzes in friction units]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Izvestia RAS SamSC)*. 2011;(13):1136-1140. (In Russ.).
- Grigor'ev S. N., Mironov A. E., Podrabinnik P. A. et al. Novye antifriktsionnye alyuminievyie splavy s povyshennoy sposobnost'yu k adaptatsii pri trenii dlya monometallicheskih podshipnikov skol'zheniya v zameny bronz [New antifriction aluminium alloys with increased ability to adapt to friction for monometallic plain bearings instead of bronzes]. Moscow: MGTU STANKIN Publ.; 2021. 136 p. (In Russ.).
- Mironov A. E., Antyukhin G. G., Gershman E. I. et al. Novye antifriktsionnye alyuminievyie splavy dlya litykh monometallicheskih podshipnikov skol'zheniya. Stendovye ispytaniya [New anti-friction aluminum alloys for cast monometallic plain bearings. Bench tests]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 2020;79(4):217-223. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-4-217-223>. (In Russ.).
- GOST 1497–84 (ISO 6892–84). Metally. Metody ispytaniya na rastyazhenie [Metals. Tensile test methods]. Introduction date: 1986-01-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004888> (access date: 12.09.2022). (In Russ.).
- GOST 9454–78. Metally. Metod ispytaniya na udarnyy izgib pri ponizhennykh, komnatnoy i povyshennykh temperaturakh [Metals. Test method for impact bending at low, room and elevated temperatures]. Introduction date: 1979-01-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005045> (access date: 12.09.2022). (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Александр Евгеньевич МИРОНОВ,**

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, научный центр «Электрификация и теплоэнергетика», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 987209, <https://orcid.org/0000-0002-4406-145X>

### **Иосиф Сергеевич ГЕРШМАН,**

д-р техн. наук, главный научный сотрудник, научный центр «Электрификация и теплоэнергетика», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 600051, <https://orcid.org/0000-0002-6370-1440>

### **Антон Александрович КРЫЛОВ,**

директор научного центра «Электрификация и теплоэнергетика», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1140127, <https://orcid.org/0000-0001-9473-5435>

### **Прокопий Олегович МУСЕРСКИЙ,**

ведущий технолог, научный центр «Электрификация и теплоэнергетика», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1147285, <https://orcid.org/0000-0001-6038-3435>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Alexander E. MIRONOV,**

Cand. of Sci. (Engineering), Leading Researcher, Electrification and Thermal Power Engineering Researcher Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 987209, <https://orcid.org/0000-0002-4406-145X>

### **Iosif S. GERSHMAN,**

Dr. of Sci. (Engineering), Chief Researcher, Electrification and Thermal Power Engineering Researcher Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 600051, <https://orcid.org/0000-0002-6370-1440>

### **Anton A. KRYLOV,**

Director of the Electrification and Thermal Power Engineering Researcher Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1140127, <https://orcid.org/0000-0001-9473-5435>

### **Prokopi O. MUSERSKIY,**

Leading Technologist, Electrification and Thermal Power Engineering Researcher Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10,

3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1147285, <https://orcid.org/0000-0001-6038-3435>

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Александр Евгеньевич МИРОНОВ.** Проведение механических и трибологических испытаний и адаптация изложения в структуру статьи (45%).

**Иосиф Сергеевич ГЕРШМАН.** Формирование научной концепции статьи, анализ технической литературы (30%).

**Антон Александрович Крылов.** Определение структуры и логики подачи материала, формирование выводов (10%).

**Прокопий Олегович Мусерский.** Работа с массивом данных, химический анализ (15%).

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Alexander E. MIRONOV.** Carrying out mechanical and tribological tests and adapting the presentation to the structure of the article (45%).

**Iosif S. GERSHMAN.** Formation of the scientific concept of the article, analysis of technical literature (30%).

**Anton A. KRYLOV.** Determination of the structure and logic of the presentation of the material, formulating conclusions (10%).

**Prokopi O. MUSERSKIY.** Working with the data array, chemical analysis (15%).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The authors have read and approved the final manuscript.*

**Прозрачность финансовой деятельности:** авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

**Financial transparency:** the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 19.09.2022, рецензия от первого рецензента получена 05.10.2022, рецензия от второго рецензента получена 10.11.2022, принята к публикации 14.11.2022.

The article was submitted 19.09.2022, first review received 05.10.2022, second review received 10.11.2022, accepted for publication 14.11.2022.

## ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

### ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

На сайте [www.elibrary.ru](http://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](http://www.journal-vniizht.ru) контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



## ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 625.143.2

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-339-346

EDN: <https://elibrary.ru/velnys>**РАЗРАБОТКА РЕЛЬСОВ НОВОЙ КАТЕГОРИИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ  
В ОСОБО ТЯЖЕЛЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ****Е. Н. Токмакова**✉, **И. Е. Перков**, **П. В. Иванов**, **К. Л. Заграничек**Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),  
Москва, Российская Федерация**АННОТАЦИЯ**

**Введение.** В условиях ежегодного повышения грузонапряженности на дорогах Восточного полигона эффективным техническим решением проблемы повышенного количества сходов подвижного состава по причине излома рельсов является разработка новой категории рельсов для условий холодного климата, обладающих повышенной твердостью для увеличения износостойкости и контактной выносливости с одновременно высокими значениями ударной вязкости. Такой комплекс свойств может быть достигнут при использовании отдельного нагрева под закалку и охлаждении закалочной средой с высокой охлаждающей способностью. Рельсы, изготовленные по такой технологии, будут относиться к новой категории. В связи с этим целью работы являлось создание новой категории рельсов для их применения в особо тяжелых условиях эксплуатации.

**Материалы и методы.** В работе исследовалось влияние отдельного индукционного нагрева перед дифференцированной закалкой сжатым воздухом контролируемой влажности на микроструктуру и механические свойства рельсов типа Р65: твердость, механические свойства при испытаниях на растяжение и удар, предел выносливости, циклическую трещиностойкость.

**Результаты.** Приведен сравнительный анализ полученных результатов с аналогичными показателями для рельсов категорий ДТ350, ДТ370ИК и ДТ350НН по ГОСТ Р 51685–2013. Исследования химического состава, механических свойств, твердости на поверхности катания головки рельсов и по сечению, а также микроструктуры рельсов опытной партии показали их соответствие требованиям ГОСТ Р 51685–2013 для рельсов категорий ДТ350, ДТ370ИК, ДТ350НН.

**Обсуждение и заключение.** Показано, что в результате применения дифференцированного термического упрочнения рельса с использованием сжатого воздуха контролируемой влажности в качестве закалочной среды получена новая категория рельсов ДТО350НН, характеризующаяся благоприятным сочетанием прочностных свойств, характеристик пластичности и показателей сопротивления хрупкому разрушению. Рельсы новой категории могут быть рекомендованы для применения в особо тяжелых условиях эксплуатации (в кривых участках пути малого радиуса при пониженных температурах), в том числе на дорогах Восточного полигона.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** железнодорожные рельсы, эксплуатационная стойкость, дифференцированное термоупрочнение, сжатый воздух контролируемой влажности, индукционный нагрев, механические свойства, микроструктура

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

**Для цитирования:** Токмакова Е. Н., Перков И. Е., Иванов П. В., Заграничек К. Л. Разработка рельсов новой категории для применения в особо тяжелых условиях эксплуатации // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 4. С. 339–346. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-339-346>.

✉ tokmakova.ekaterina@vniizht.ru (Е. Н. Токмакова)

© Токмакова Е. Н., Перков И. Е., Иванов П. В.,  
Заграничек К. Л., 2022



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 625.143.2

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-339-346

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



## DEVELOPMENT OF A NEW CATEGORY RAILS FOR APPLICATION IN EXTREMELY SEVERE OPERATING CONDITIONS

Ekaterina N. Tokmakova✉, Ivan E. Perkov, Pavel V. Ivanov,  
Konstantin L. Zagranichek

Railway Research Institute,  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** In the context of the annual increase in traffic on the railways of the Eastern Polygon, an effective technical solution to the problem of an increased number of rolling stock derailments caused by rail failure is the development of a new category of rails for cold climate conditions, which have increased hardness to increase wear resistance and contact endurance while simultaneously providing high impact strength. Such a combination of properties can be achieved by using a separate heating process for quenching and cooling with a quenching medium of high cooling capacity. Rails made using this technology will belong to a new category. In this regard, the aim of the work was to create a new category of rails for their use in particularly severe operating conditions.

**Materials and methods.** This article studies the influence of separate induction heating before differential hardening with compressed air of controlled humidity on the microstructure and mechanical properties of P65 type rails: hardness, mechanical properties during tensile and impact tests, endurance limit, cyclic crack resistance.

**Results.** The authors present a comparative analysis of the obtained results with similar indicators for rails of categories DT350, DT370IK and DT350NN according to GOST R 51685–2013. Studies of the chemical composition, mechanical properties, hardness on the tread surface of the railhead and in cross section, as well as the microstructure of the experimental batch of the rails showed their compliance with the requirements of GOST R 51685–2013 for rails of categories DT350, DT370IK, DT350NN.

**Discussion and conclusion.** It is shown that as a result of the use of differentiated thermal hardening of the rail using compressed air of controlled humidity as a quenching medium, a new category of rails DTO350NN was obtained, characterised by a favourable combination of strength properties, plasticity characteristics and brittle fracture resistance indicators. Rails of the new category could be recommended for use in particularly difficult operating conditions (in curved sections of track with a small radius at low temperatures), including on the roads of the Eastern Polygon.

**KEYWORDS:** rails, operational durability, differential heat strengthening, compressed air of controlled humidity, induction heating, mechanical properties, microstructure

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

**For citation:** Tokmakova E. N., Perkov I. E., Ivanov P. V., Zagranichek K. L. Development of a new category rails for application in extremely severe operating conditions. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(4):339-346. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-339-346>.

✉ tokmakova.ekaterina@vniizht.ru (E. N. Tokmakova)

**Введение.** Анализ количества сходов подвижного состава по причине излома рельсов в период с 2010 по 2021 г. показал, что 52% сходов были допущены на железных дорогах Восточного полигона, которые характеризуются особо тяжелыми условиями, в том числе высокой грузонапряженностью (свыше 100 млн т·км брутто/км в год), повышенными осевыми нагрузками, кривыми участками пути малого радиуса (менее 650 м), наличием участков с неоднородным ландшафтом, затяжными подъемами и спусками, а также длительным воздействием пониженных температур. Грузонапряженность на дорогах Восточного полигона за последние десять лет выросла почти на 40%.

Для решения проблемы повышенного износа рельсов в таких условиях была разработана новая категория рельсов повышенной износостойкости и контактной выносливости — ДТ370ИК. Однако рельсы данной категории, уложенные на сложных участках сети РЖД, показали недостаточно высокий эксплуатационный ресурс [1].

Эффективным техническим решением вопроса разработки надежных и долговечных рельсов новой категории для условий холодного и умеренно холодного климата является освоение производства рельсов с повышенной твердостью для увеличения контактной выносливости и износостойкости и одновременно с высокими значениями ударной вязкости [2, 3]. Данное сочетание свойств может быть получено путем реализации технологии закалочного охлаждения, обеспечивающей формирование в головке рельса достаточно глубокого слоя с однородной дисперсной микроструктурой с мелким исходным зерном аустенита [4–7]. Решение такой сложной металлургической задачи возможно при использовании отдельного печного или индукционного нагрева рельсов под закалку [8, 9] и охлаждении закалочной средой с высокой охлаждающей способностью (сжатый воздух контролируемой влажности [10–12], водовоздушная смесь [12], спрейерное охлаждение водой [13, 14]).

В связи с этим целью работы являлось исследование новой категории рельсов, предназначенных для применения в особо тяжелых условиях эксплуатации.

**Материалы и методы.** Объект исследования — рельсы типа Р65 производства АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» («ЕВРАЗ НТМК») опытной партии. Данные рельсы были дифференцированно термоупрочнены воздухом контролируемой влажности с отдельного индукционного нагрева научно-производственным предприятием «Томская электронная компания» (ООО НПП «ТЭК»).

Химический состав стали исследуемых рельсов определяли на оптико-эмиссионном спектрометре Q8 Magellan. Механические свойства при растяжении

определяли на образцах диаметром 6 мм и длиной рабочей части 30 мм, ударную вязкость — на образцах размером 10×10×55 с U-образным надрезом радиусом 1 мм и глубиной 2 мм при температуре +20 и –60 °С. Измерение твердости поверхности катания и поперечного сечения рельсов по Бринеллю производилось на поперечном темплете в точках на поверхности катания, на глубине 10 и 22 мм от поверхности катания, на глубине 10 мм от выкружки, в шейке, а также в подошве рельса опытной партии. Твердость на поверхности катания измеряли на трех пробах рельсов с расстоянием между тремя замерами не менее 25 мм. Место измерения твердости на поверхности катания головки рельса было зачищено для удаления окалины и обезуглероженного слоя металла на глубину не более 0,5 мм.

При проведении усталостных испытаний по оценке условного предела выносливости использовались шесть рельсовых проб опытной партии длиной (1200 ± 15) мм. Испытания проводили с использованием испытательной машины ЦД-200 ПУ в положении рельса «головкой вниз» при приложении циклической нагрузки. Коэффициент асимметрии цикла нагружения составил 0,1. Базовое количество циклов нагружения — 2 000 000.

Исследования микроструктуры проводились на металлографических шлифах, изготовленных из головки исследуемых рельсов в направлении, поперечном прокатке. Шлифы подвергали травлению 4%-м раствором азотной кислоты. Микроструктура изучалась на сканирующем электронном микроскопе Quanta 650 (компания FEI, Нидерланды) в режиме вторичных электронов при увеличении ×5000. Размерные характеристики микроструктуры определялись методом случайных секущих по изображениям, полученным на сканирующем электронном микроскопе.

**Результаты и обсуждение.** Химический состав стали исследуемых рельсов приведен в табл. 1.

Представленный в табл. 1 химический состав стали опытных рельсов показывает их соответствие стали марки 90АФ по ГОСТ Р 51685–2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия», за исключением повышенного содержания углерода

Таблица 1

Химический состав опытной партии рельсов

Table 1

Chemical composition of the experimental batch of rails

Категория	Содержание элементов, %								
	C	Mn	Si	V	Cr	N	P	S	Al
Опытная партия	0,986	0,913	0,425	0,09	—	0,015	0,008	0,004	0,004

Таблица 2  
Механические свойства рельсов

Mechanical properties of the rails

Категория	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
Опытная партия	1400	941	12,5	33,9
ДТ350	1290	870	11,0	32,0
ДТ350НН	1273	849	12,4	33,3
ДТ370ИК	1359	919	10,8	23,4
Требования ГОСТ Р 51685–2013 к категории ДТ350НН	≥1180	≥800	≥9,0	≥25,0
Требования ГОСТ Р 51685–2013 к категории ДТ370ИК	≥1280	≥870	≥9,0	≥14,0

Таблица 3

Ударная вязкость рельсов

Impact strength of the rails

Категория	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	
	при +20 °С	при –60 °С
Опытная партия	24,5	13,9
ДТ350	24,7	15,9
ДТ350НН	25,0	18,5
ДТ370ИК	20,9	8,6
Требования ГОСТ Р 51685–2013 к категории ДТ350НН	–	≥15
Требования ГОСТ Р 51685–2013 к категории ДТ370ИК	≥15	–

на 0,016 % с учетом допускаемого отклонения. Данный факт свидетельствует о том, что рельсы опытной партии являются рельсами высокого класса прочности. Рельсы, произведенные с таким содержанием углерода с применением дифференцированного термоупрочнения с прокатного нагрева, как правило, характеризуются пониженными значениями статической и циклической трещиностойкости, ударной вязкости и повышенными значениями прочностных характеристик, таких как временное сопротивление, предел текучести, твердость.

В табл. 2 представлены значения механических свойств рельсов после испытаний на растяжение и удар.

По уровню механических свойств рельсы опытной партии превышают аналогичные показатели для рельсов категорий ДТ350, ДТ350НН, ДТ370ИК. При высоких прочностных характеристиках на рельсах опытной партии получены более высокие по сравнению с рассматриваемыми категориями рельсов характеристики пластичности (относительное удлинение, относительное сужение).

В табл. 3 представлены результаты испытаний по оценке ударной вязкости рельсов.

Существенное преимущество по уровню ударной вязкости рельсов опытной партии в сравнении с рельсами аналогичного класса прочности категории ДТ370ИК (на 15 % выше при положительной температуре образцов и на 38 % выше при отрицательной температуре образцов), а также сопоставимые значения данного параметра для рельсов опытной партии и категории ДТ350 общего назначения подтверждают эффективность применения отдельного индукционного нагрева и сжатого воздуха контролируемой влажности в качестве закалочной среды в части формирования одновременно высоких прочностных характеристик и показателей пластичности.

Результаты измерения твердости приведены в табл. 4.

Твердость на поверхности катания головки рельсов и по сечению соответствует требованиям ГОСТ Р 51685–2013. Твердость рельсов опытной партии имеет сопоставимые значения в головке на поверхности катания и на глубине 10 мм, а также характеризуется более низкой твердостью в головке на глубине 22 мм, в шейке и подошве по сравнению с твердостью рельсов категории ДТ370ИК. По сравнению с рельсами категорий ДТ350 и ДТ350НН рельсы опытной партии обладают твердостью на 2–8 % выше в головке и имеют сопоставимую твердость подошвы. Данный факт подтверждает, что рельсы опытной партии относятся к рельсам высокого класса прочности.

Важнейшими характеристиками рельсов, отвечающими за безопасность, надежность и долговечность при их эксплуатации, являются условный предел выносливости и циклическая трещиностойкость, определяемые при усталостных испытаниях полнопрофильных рельсовых проб. Результаты циклических испытаний по определению условного предела выносливости и циклической трещиностойкости приведены в табл. 5.

Рельсы опытной партии, дифференцированно термоупрочненные воздухом контролируемой влажности с отдельного индукционного нагрева, соответствуют требованиям ГОСТ Р 51685–2013 для всех классов

Таблица 4

## Твердость НВ по сечению рельсов

Table 4

## Hardness HB over the cross section of the rails

Категория	Место определения твердости				
	на поверхности катания	на глубине 10 мм от поверхности катания головки и выкружки	на глубине 22 мм от поверхности катания головки	в шейке	в подошве
Опытная партия	410	393–398	356	330	347
ДТ350	381	360–372	345	323	330
ДТ350НН	377	362–366	344	325	350
ДТ370ИК	400	395–399	375	342	365
Требования ГОСТ Р 51685–2013 к категории ДТ350НН	352–405	≥341	≥321	≤341	≤363
Требования ГОСТ Р 51685–2013 к категории ДТ370ИК	370–409	≥363	≥352	≤352	≤388

прочности (табл. 5). Предел выносливости рельсов опытной партии находится практически на одном уровне (на 2 % ниже) с пределом выносливости рельсов категорий ДТ350, ДТ370ИК и на 5 % выше, чем у рельсов категории ДТ350НН. В части циклической трещиностойкости рельсы опытной партии характеризуются наибольшим значением данного параметра и превосходят рельсы категории ДТ350 на 21 %, ДТ350НН — на 23 %, ДТ370ИК — на 36 %.

Необходимо отметить, что рельсы опытной партии изготовлены из заэвтектоидной стали и позиционируются в данном случае как рельсы высокого класса прочности. При этом рельсы опытной партии при высоких значениях прочностных характеристик и твердости в головке обладают самой высокой циклической трещиностойкостью, нехарактерной для рельсов такого класса прочности, что подтверждают результаты испытаний рельсов категории ДТ370ИК (рис. 1).

Достижение высокого уровня сопротивления хрупкому разрушению на рельсах опытной партии очень актуально с точки зрения эксплуатации в особо тяжелых условиях железных дорог Восточного полигона с большим годовым перепадом температур и связано в первую очередь с применением отдельного индукционного нагрева и сжатого воздуха контролируемой влажности в качестве закалочной среды.

Важным фактором, определяющим прочностные и пластические характеристики рельсовой стали, а также ее циклическую трещиностойкость и стойкость к контактно-усталостным выкрашиваниям, является сама микроструктура матрицы,

дисперсность и морфология ее составляющих. Изображения микроструктуры исследуемых образцов рельсов опытной партии и различных категорий, полученные методом растровой электронной микроскопии, представлены на рис. 2.

Установлено, что микроструктура основного металла в головке рельсов опытной партии представлена пластинчатым перлитом балла 1 по шкале 1 ГОСТ 8233–56 «Сталь. Эталоны микроструктуры» с участками карбидной сетки, бейнит и мартенсит, а также мелкие разрозненные участки феррита в структуре

Таблица 5

## Значения пределов выносливости и средней циклической трещиностойкости рельсов

Table 5

## The limits of endurance and average cyclic crack resistance of the rails

Категория рельсов	Предел выносливости, МПа	Циклическая трещиностойкость, МПа·м <sup>1/2</sup>
Опытная партия	472,0	54,4
ДТ350	481,1	42,8
ДТ350НН	453,0	41,9
ДТ370ИК	481,1	35,0
Требования к ДТ350НН ГОСТ Р 51685–2013	Не менее 370	Не менее 32
Требования к ДТ370ИК ГОСТ Р 51685–2013	Не менее 350	Не менее 28

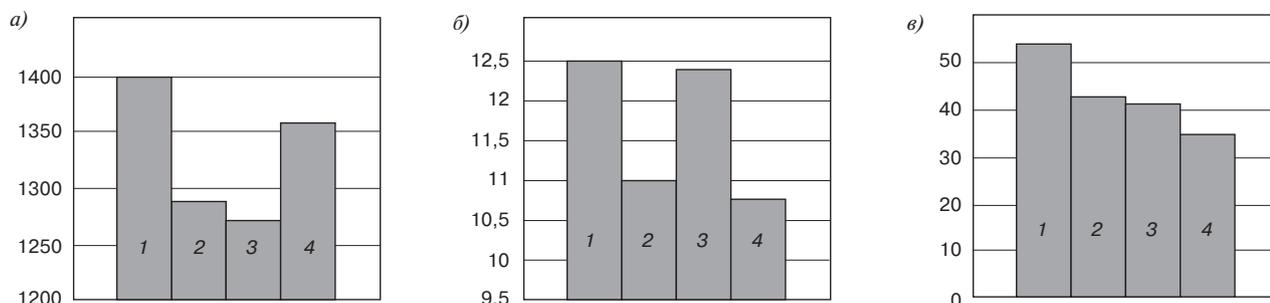


Рис. 1. Сравнение ключевых показателей качества рельсов:  
*a* — временное сопротивление, МПа; *б* — относительное удлинение, %; *в* — циклическая трещиностойкость, МПа·м<sup>1/2</sup>:  
 1 — опытная партия; 2 — категория ДТ350; 3 — категория ДТ350НН; 4 — категория ДТ370ИК

Fig. 1. Comparison of key indicators of rail quality:  
*a* — temporal resistance, MPa; *б* — relative elongation, %; *в* — cyclic crack resistance, MPa·m<sup>1/2</sup>:  
 1 — experimental batch; 2 — category DT350; 3 — category DT350NN; 4 — category DT370IK

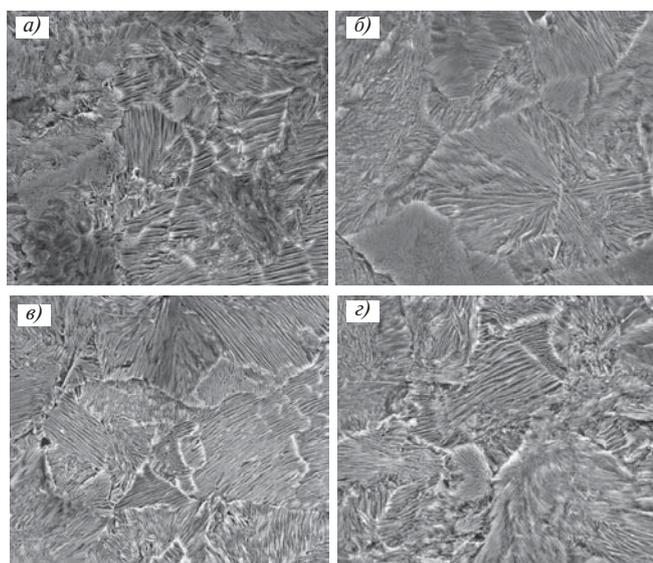


Рис. 2. Микроструктура основного металла головки рельсов, ×5000:  
*a* — опытная партия; *б* — категория ДТ350;  
*в* — категория ДТ350НН; *г* — категория ДТ370ИК

Fig. 2. Microstructure of the base metal of the rail head, ×5000:  
*a* — experimental batch; *б* — category DT350;  
*в* — category DT350NN; *г* — category DT370IK

отсутствуют. Для опытной партии среднее значение размеров перлитных колоний и межпластинчатое расстояние перлита составило 5,6 мкм и 67 нм в центре головки и 5,5 мкм и 68 нм в области выкружки. Сравнительный анализ рельсов рассматриваемых категорий (ДТ350, ДТ350НН, ДТ370ИК) и опытной партии показал, что микроструктура головки рельсов опытной партии имеет меньшие размеры структурных составляющих, а также характеризуется отсутствием участков феррита. Меньший раз-

мер структурных составляющих позволяет достичь более высокого уровня пластических характеристик, что подтверждено результатами испытаний по оценке ударной вязкости. Формированию мелкодисперсной структуры способствует применение отдельного индукционного нагрева перед дифференцированной закалкой сжатым воздухом контролируемой влажности.

**Выводы.** В результате применения дифференцированного термического упрочнения рельсовой стали с использованием сжатого воздуха контролируемой влажности в качестве закалочной среды получена новая категория рельсов (ДТ350НН), характеризующаяся благоприятным сочетанием прочностных свойств, характеристик пластичности и показателей сопротивления хрупкому разрушению.

Полученный уровень свойств позволяет в дальнейшем рекомендовать новую категорию рельсов для применения в особо тяжелых условиях эксплуатации в крутых кривых при низких температурах, в том числе на дорогах Восточного полигона.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шур Е. А., Борц А. И., Абдурашитов А. Ю. Увеличить ресурс рельсов, лимитируемый их боковым износом // Путь и путевое хозяйство. 2017. № 5. С. 2–8.
2. Термически упрочненные рельсы / А. Ф. Золотарский [и др.]; под ред. А. Ф. Золотарского. М.: Транспорт, 1976. 264 с.
3. Shur E., Borts A., Zakharov S. Rails for Low Operating Temperature and High Speed // Transportation Soil Engineering in Cold Regions (TRANSOILCOLD 2019): Proceedings of the conference (St. Petersburg, 15–22 April 2019). Singapore: Springer, 2020. P. 221–232.
4. Перспективная технология производства рельсов для высокоскоростного и тяжеловесного движения / С. В. Хлыст [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2013. № 6. С. 14–20.
5. Производство и термическая обработка железнодорожных рельсов / В. В. Лемпицкий [и др.]. М.: Металлургия, 1972. 272 с.

6. Шур Е.А. Влияние структуры на эксплуатационную стойкость рельсов // Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов: материалы II Всерос. науч.-техн. семинара (Екатеринбург, 16–17 мая 2006 г.): сб. науч. тр. / ред. Л.А. Смирнов [и др]. Екатеринбург: УИМ, 2006. С. 37–63.

7. Парышев Ю.М., Раузин Я.Р. Свойства рельсов, закаленных различными способами // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1964. №5. С. 31–33.

8. Шур Е.А. Термическое упрочнение железнодорожных рельсов // Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов: науч.-техн. семинар (Москва, 22–25 октября 2019 г.): сб. тезисов. М.: НИТУ «МИСиС», 2019. С. 23–24.

9. Шур Е.А. Изучение процесса структурообразования при термической обработке рельсов // Труды ЦНИИ МПС. 1966. Вып. 314. С. 103–114.

10. Опыт проведения дифференцированной термообработки воздушным способом по технологии ТЭК-ДТ на промышленной установке ТЭК-ДТО-20-13,6 / С.В. Хлыст [и др.] // Инженерные решения. Черная металлургия. 2013. №1. С. 20–22.

11. Development of an Innovative Digital Cooling Technology (Differential Heat Treatment) for EVRAZ NTMK Rails / A. V. Kushnarev [et al.] // Steel in Translation. 2020. Vol. 50, no. 6. P. 415–419.

12. Перспективы развития рельсового производства в России / А.И. Борц [и др.] // Промышленный транспорт XXI век. 2017. №3–4. С. 11–16.

13. Пан А.В. Разработка и освоение новых технологий для текущего и перспективного производства рельсов: дис. ... д-ра техн. наук в форме науч. докл.: 05.16.01. М., 1999. 123 с.

14. Патент № 2003705 Российская Федерация, МПК C21D 9/04. Способ термической обработки рельсов и установка для его осуществления: № 05036339: заявл. 01.03.1992: опубл. 30.11.1993 / Федин В.М. [и др.]. 10 с.

## REFERENCES

1. Shur E.A., Borts A.I., Abdurashitov A.Yu. Uvelichit' resurs rel'sov, limitiruemyy ikh bokovym iznosom [Increasing the resource of rails, limited by their lateral wear]. *Put' i putevoe khozaystvo = Railway Track and Facilities*. 2017;(5):2-8. (In Russ.).

2. Zolotarskiy A. F., Rauzin Ya. R., Shur E. A. et al. Termicheskiy uprochnnyye rel'sy [Thermally hardened rails]. Moscow: Transport Publ.; 1976. 264 p. (In Russ.).

3. Shur E., Borts A., Zakharov S. Rails for Low Operating Temperature and High Speed. Transportation Soil Engineering in Cold Regions (TRANSOILCOLD 2019). Proceedings of the conference (St. Petersburg, April 15–22, 2019). Singapore: Springer Publ.; 2020. P. 221–232.

4. Khlyst S. V., Kuz'michenko V. M., Rezanov V. A. et al. Perspektivnaya tekhnologiya proizvodstva rel'sov dlya vysokoskorostnogo i tyazhe-lovesnogo dvizheniya [Perspective technology for the production of rails for high-speed and heavy traffic]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2013;(6):14-20. (In Russ.).

5. Lempitskiy V. V., Kazarnovskiy D. S., Gubert S. V. et al. Proizvodstvo i termicheskaya obrabotka zheleznodorozhnykh rel'sov [Production and heat treatment of rails]. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1972. 272 p. (In Russ.).

6. Shur E.A. Vliyaniye struktury na ekspluatatsionnyuyu stoykost' rel'sov [Influence of the structure on the service life of rails]. Vliyaniye svoystv metallicheskoj matritsy na ekspluatatsionnyuyu stoykost' rel'sov [Influence of the properties of the metal matrix on the service life of rails]. Proc. of 2nd All-Russian sci.-tech. seminar (Ekaterinburg, May 16–17, 2006). Ekaterinburg: UIM Publ.; 2006. P. 37–63. (In Russ.).

7. Paryshev Yu. M., Rauzin Ya. R. Svoystva rel'sov, zakalennykh razlichnymi sposobami [Properties of rails hardened in various ways]. *Vestnik*

*Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 1964;(5):31-33. (In Russ.).

8. Shur E. A. Termicheskoye uprochneniye zheleznodorozhnykh rel'sov [Thermal hardening of rails]. Bernshteynovskie chteniya po termomekhanicheskoy obrabotke metallicheskiykh materialov [Bernshtein readings on thermomechanical processing of metallic materials]. Proc. of scientific and technical seminar (Moscow, October 22–25, 2019). Moscow: NITU MISiS Publ.; 2019:23-24. (In Russ.).

9. Shur E.A. Izuchenie protsessov strukturoobrazovaniya pri termicheskoy obrabotke rel'sov [Study of the process of structure formation during heat treatment of rails]. *Trudy TsNII MPS = Proceedings of the Central Research Institute of MPS*. 1966;(314):103-114. (In Russ.).

10. Khlyst S. V., Kuz'michenko V. M., Khlyst I. S., Gontar' A. I. Opyt provedeniya differentsirovannoy termoobrabotki vozdushnym sposobom po tekhnologii TEK-DT na promyshlennoy ustanovke TEK-DTO-20-13,6 [Experience in conducting differentiated air heat treatment using the TEK-DT technology on an industrial plant TEK-DTO-20-13,6]. *Inzhenernye resheniya. Chernaya metallurgiya = Engineering Solutions. Ferrous Metallurgy*. 2013;(1):20-22. (In Russ.).

11. Kushnarev A. V., Kirichkov A. A., Belokurova E. V. et al. Development of an Innovative Digital Cooling Technology (Differential Heat Treatment) for EVRAZ NTMK Rails. *Steel in Translation*. 2020;50(6):415-419.

12. Borts A. I., Shur E. A., Reykhart V. A. et al. Perspektivy razvitiya rel'sovogo proizvodstva v Rossii [Prospects for the development of rail production in Russia]. *Promyshlennyy transport XXI vek = Industrial transport XXI century*. 2017;(3-4):11-16. (In Russ.).

13. Pan A. V. Razrabotka i osvoeniye novykh tekhnologiy dlya tekushchego i perspektivnogo proizvodstva rel'sov [Development and development of new technologies for the current and prospective production of rails]. Dr. of Sci. (Engineering) thesis: 05.16.01. Moscow; 1999. 123 p. (In Russ.).

14. Fedin V. M., Devyatkin V. P., Shur E. A. et al. Patent No. 2003705 Russian Federation, MПК C21D 9/04. Sposob termicheskoy obrabotki rel'sov i ustanovka dlya ego osushchestvleniya [A method of heat treatment of rails and installation for its implementation]: No. 05036339: appl. 01.03.1992: publ. 30.11.1993. 10 p. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Екатерина Николаевна ТОКМАКОВА,

инженер 2-й категории, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1097983, <https://orcid.org/0000-0003-0451-2954>

### Иван Евгеньевич ПЕРКОВ,

технический эксперт, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, perkov.ivan@vniizht.ru), Author ID: 1165030, <https://orcid.org/0000-0002-1762-5678>

### Павел Вячеславович ИВАНОВ,

инженер 2-й категории, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, ivanov.pavel@vniizht.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9635-0528>

### Константин Львович ЗАГРАНИЧЕК,

заведующий лабораторией, Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, zagranichek.k@vniizht.ru), Author ID: 808109, <https://orcid.org/0000-0001-8702-4264>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Ekaterina N. ТОКМАКОВА,**

2nd category Engineer, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1097983, <https://orcid.org/0000-0003-0451-2954>

### **Ivan E. PERKOV,**

Technical Expert, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St., [perkiv.ivan@vniizht.ru](mailto:perkiv.ivan@vniizht.ru)), Author ID: 1165030, <https://orcid.org/0000-0002-1762-5678>

### **Pavel V. IVANOV,**

2nd category Engineer, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St., [ivanov.pavel@vniizht.ru](mailto:ivanov.pavel@vniizht.ru)), <https://orcid.org/0000-0002-9635-0528>

### **Konstantin L. ZAGRANICHEK,**

Head of Laboratory, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St., [zagranichek.k@vniizht.ru](mailto:zagranichek.k@vniizht.ru)), Author ID: 808109, <https://orcid.org/0000-0001-8702-4264>

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Екатерина Николаевна ТОКМАКОВА.** Подготовка рукописи статьи, проведение исследований, обсуждение результатов (30%).

**Иван Евгеньевич ПЕРКОВ.** Проведение исследований, обсуждение результатов, рецензирование и редактирование рукописи статьи (40%).

**Павел Вячеславович ИВАНОВ.** Проведение исследований, формальный анализ результатов (10%).

**Константин Львович ЗАГРАНИЧЕК.** Определение направления исследования, формулировка цели и задач, организация проведения исследований, разработка методик, обсуждение результатов (20%).

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Ekaterina N. ТОКМАКОВА.** Preparing the manuscript of the article, conducting research, discussing the results of research (30%).

**Ivan E. PERKOV.** Conducting research, discussing research results, reviewing and editing the manuscript of the article (40%).

**Pavel V. IVANOV.** Conducting research, formal analysis of results (10%).

**Konstantin L. ZAGRANICHEK.** Determining the direction of research, formulating goals and objectives, organising research, developing methods, discussing research results (20%).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The authors have read and approved the final manuscript.*

**Прозрачность финансовой деятельности:** авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

**Financial transparency:** the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 06.07.2022, рецензия от первого рецензента получена 19.08.2022, рецензия от второго рецензента получена 22.08.2022, принята к публикации 01.11.2022.

The article was submitted 06.07.2022, first review received 19.08.2022, second review received 22.08.2022, accepted for publication 01.11.2022.

## ПОДПИСКА

# «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.

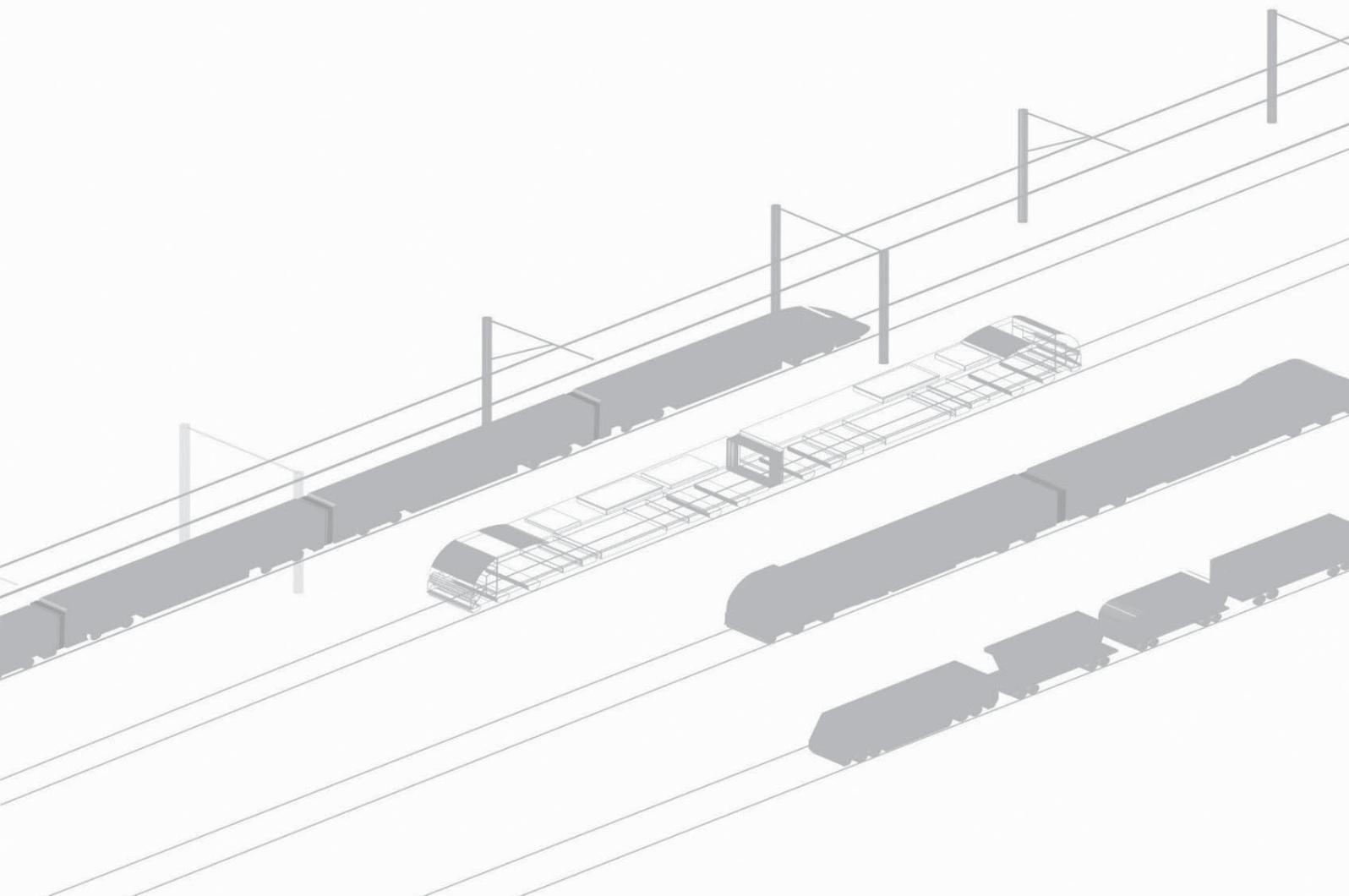
### **Подписной индекс журнала — 70116.**

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](mailto:journal@vniizht.ru). Информация о подписке размещена на сайте журнала [www.journal-vniizht.ru](http://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](mailto:export@ural-press.ru)).

# 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 621.332.31:621.316.92

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-348-358

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



## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ИМПУЛЬСА ГРОВОГО ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

К. С. Беломестных✉, А. Н. Бардин, С. Н. Вечканов, А. А. Крылов

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Статья посвящена исследованию распространения волн импульса грозового перенапряжения в контактной сети электрифицированных железных дорог. Цель работы — определение зоны распространения волн грозовых перенапряжений вдоль контактной сети, степени затухания и влияния состояния грунта на характер их распространения.

**Материалы и методы.** Авторами проведены испытания по распространению волн импульсов грозовых перенапряжений вдоль контактной сети 1-го (кольцевого) и 15-го (тупикового) пути Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» на станции Щербинка с применением высоковольтного генератора импульсных напряжений.

**Результаты.** В ходе проведения испытаний было определено влияние состояния грунта на характер распространения волн импульса грозового перенапряжения. Определена степень затухания волны импульса грозового перенапряжения в контактной сети на закольцованном и тупиковом участках с учетом влияния обратной (отраженной) волны перенапряжения, а также изменения величины уровня напряжения при волновом процессе, проходящем в контактной сети. Данные, полученные в ходе проведения испытаний, позволяют определить скорость распространения волны импульса грозового перенапряжения.

**Обсуждение и заключение.** Полученные результаты испытаний будут полезны для улучшения надежности грозозащитных устройств контактной сети от внешних перенапряжений и могут быть использованы для улучшения изоляционных элементов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** электрифицированные железные дороги, контактная сеть, генератор импульсных напряжений, импульсное напряжение, прямой удар молнии, межподстанционная зона, волна импульса грозового перенапряжения, распространение импульса, амплитуда импульса

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

**Для цитирования:** Беломестных К. С., Бардин А. Н., Вечканов С. Н., Крылов А. А. Исследование распространения волн импульса грозового перенапряжения в контактной сети электрифицированных железных дорог // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 4. С. 348–358. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-348-358>.

✉ Belomestnykh.K@vniizht.ru (К. С. Беломестных)

© Беломестных К. С., Бардин А. Н.,  
Вечканов С. Н., Крылов А. А., 2022



AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 621.332.31:621.316.92

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-348-358

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



## STUDY OF THE WAVES PROPAGATION OF LIGHTNING OVERVOLTAGE IMPULSE IN THE CATENARY SYSTEM OF ELECTRIFIED RAILWAYS

Konstantin S. Belomestnykh✉, Alexander N. Bardin,  
Sergey N. Vechkanov, Anton A. Krylov

Railway Research Institute,  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The article is devoted to the study of the waves propagation of lightning overvoltage impulse in the catenary system of electrified railways. The purpose of the work is to determine the zone of waves propagation of lightning overvoltage impulse along the catenary system, the degree of attenuation and the influence of the soil condition on the mode of their propagation.

**Materials and methods.** The authors carried out tests on the waves propagation of lightning overvoltage impulse along the catenary system of the 1st (ring) track and the 15th (dead end) track of the Experimental Loop of the Railway Research Institute at the Shcherbinka station using a high-voltage impulse voltage generator.

**Results.** During the tests, the influence of the soil condition on the mode of waves propagation of lightning overvoltage impulse was determined. The degree of attenuation of the lightning overvoltage impulse wave in the catenary system in the looped and dead end sections is determined, considering the influence of the reverse (reflected) overvoltage wave, as well as changes in the voltage level during the wave process occurring in the catenary system. The data obtained during the tests enable to determine the propagation speed of the lightning impulse wave.

**Discussion and conclusion.** The obtained test results will be useful for improving the reliability of lightning protection devices of the catenary system against external overvoltages and can be used to improve insulating elements.

**KEYWORDS:** electrified railways, catenary system, impulse voltage generator, impulse voltage, direct lightning strike, inter-substation zone, lightning overvoltage impulse wave, impulse propagation, impulse amplitude

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

**For citation:** Belomestnykh K. S., Bardin A. N., Vechkanov S. N., Krylov A. A. Study of the waves propagation of lightning overvoltage impulse in the catenary system of electrified railways. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(4):348-358. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-348-358>.

✉ Belomestnykh.K@vniizht.ru (K. S. Belomestnykh)

© Belomestnykh K. S., Bardin A. N.,  
Vechkanov S. N., Krylov A. A., 2022

**В**ведение. Хозяйство электрификации и электроснабжения является одним из основных элементов железнодорожной инфраструктуры. Необходимый уровень надежности в реализации перевозочного процесса обеспечивается при соответствии параметров режима работы систем тягового электроснабжения (СТЭ) нормируемым показателям напряжения на токоприемниках электроподвижного состава, температуры нагрева проводов контактной сети, работы элементов обратной тяговой рельсовой сети и нагрузочной способности силового оборудования тяговых подстанций. Важными факторами в обеспечении надежности и безопасности движения поездов являются устойчивость и селективность функционирования устройств защиты контактной сети от токов короткого замыкания и воздействия атмосферных грозовых перенапряжений при попадании прямых разрядов молнии в контактную сеть электрифицированных железных дорог, коммутационные устройства, силовое оборудование тяговых подстанций. Данные воздействия приводят к возникновению существенных отказов в работе технических средств, развитию аварийных режимов работы устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и тягового электроснабжения, что в свою очередь приводит к перерыву в движении поездов, особенно на грузонапряженных участках. Атмосферные и внутренние перенапряжения в целом негативно влияют на обеспечение надежности и безопасности перевозочного процесса в ОАО «РЖД» [1].

Контактная сеть электрифицированных железных дорог подвержена воздействию ударов молнии. Внезапные кратковременные повышения напряжения до величины, опасной для изоляции электроустановки, называют перенапряжением. По своему происхождению перенапряжения бывают двух видов: внешние (атмосферные) и внутренние (коммутационные). Разряды молнии происходят как непосредственно в токоведущие элементы контактной подвески, так и в высокие объекты, расположенные вблизи железнодорожного пути, которые вызывают индуцированные (наведенные) перенапряжения. В случае прямого удара молнии в опору контактной сети происходят обратные перекрытия ее изоляции из-за большого падения напряжения на заземляющих спусках и сопротивления заземления при прохождении тока молнии в землю. В другом случае из-за электромагнитного влияния в контактной сети наводится напряжение, превышающее электрическую прочность изоляции [2, 3, 4].

Можно выделить несколько негативных моментов при перекрытии изоляции: прямое механическое разрушение изоляторов при разряде токов молнии по их поверхности с образованием короткого замыкания в контактной сети после перекрытия изолятора и го-

рение электрической дуги на элементах контактной сети с риском их повреждения [5, 6]. Это особенно опасно при неудовлетворительно работающей токовой защите и образовании «мертвых зон».

За долгие годы развития в системе электроснабжения железных дорог произошли большие изменения. С точки зрения рассматриваемого в статье вопроса к таким изменениям можно отнести: увеличение электрической прочности изоляции, снижающее риск перекрытия от наведенных перенапряжений; применение полимерных изоляторов, не подверженных мгновенному внезапному разрушению; применение интеллектуальных токовых защит на основе микропроцессорной техники, позволяющих более гибко реагировать на аварийные ситуации; повышение общего технического уровня элементов системы электроснабжения и надежности их работы. Для улучшения защит от грозовых перенапряжений желательно знать влияние состояния грунта на характер распространения волны перенапряжения и время ее затухания. Под состоянием грунта принимается толщина балластного слоя пути, загрязненность балласта, степень увлажнения атмосферными осадками балластного слоя пути.

**Проведение натурных испытаний по определению распространения волн грозового перенапряжения в контактной сети.** В силу того, что определение точного места попадания разряда молнии и фиксация распространения волн не представляется возможным, авторами данной статьи были проведены испытания по распространению волн перенапряжений на кольцевых путях Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ». Для таких испытаний был подготовлен стационарный генератор импульсных напряжений (ГИН), смонтированный на мобильной платформе (рис. 1).

Установленный на платформе ГИН с импульсом напряжения 1,2/50 мкс, состоящий из автотрансформатора, дросселя, зарядного трансформатора, омическо-емкостного делителя напряжения и батареи ударных импульсных конденсаторов, имеет максимальное напряжение 750 кВ и ударную энергию 6,6 кДж, хвостовое сопротивление 12 Ом, фронтовое сопротивление 68 Ом. Принципиальная схема генератора приведена на рис. 2.

Перед началом проведения испытаний требовалось определить величину напряжения, безопасную для элементов контактной сети. Изоляторы контактной сети представляют собой гирлянду из трех изоляторов и выдерживают примерно 330–360 кВ. Секционные изоляторы между путями контактной сети отрегулированы таким образом, чтобы обеспечить напряжение перекрытия разнопотенциальных выводов не менее 120 кВ [7]. Учитывая все факторы, авторы остановились на величине разрядного напряжения 195 кВ.

Испытания проводились на контактной сети 1-го (кольцевого) пути Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» на станции Щербинка. На всей протяженности участка контактной сети были демонтированы шлейфы, соединяющие контактную сеть с ограничителями перенапряжения [8, 9]. Во время проведения испытаний контактная сеть находилась не под напряжением.

Характеристики участка контактной сети:

- 1) длина участка — 6000 м;
- 2) тип проводов — ПБСМ120+2×МФ100+2×АС185;
- 3) пролетов между опорами — 113 шт.;
- 4) тип рельсов — Р65;
- 5) электрическая прочность изолятора ПС-70 — 117...125 кВ;
- 6) электрическая прочность гирлянды изоляторов (2 изолятора) ПС-70 — 205...250 кВ;
- 7) электрическая прочность гирлянды изоляторов (3 изолятора) ПС-70 — 330...360 кВ;
- 8) параметры участка для испытаний:
  - индуктивность — 0,5...1 мГн/км;
  - емкость — 15 нФ/км.



Рис. 1. Мобильная платформа со смонтированным оборудованием для проведения испытаний

Fig. 1. Mobile platform with installed test equipment

Для получения результатов испытаний, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации контактной сети, электрический разрыв контактной сети кольца не производился. Схемы

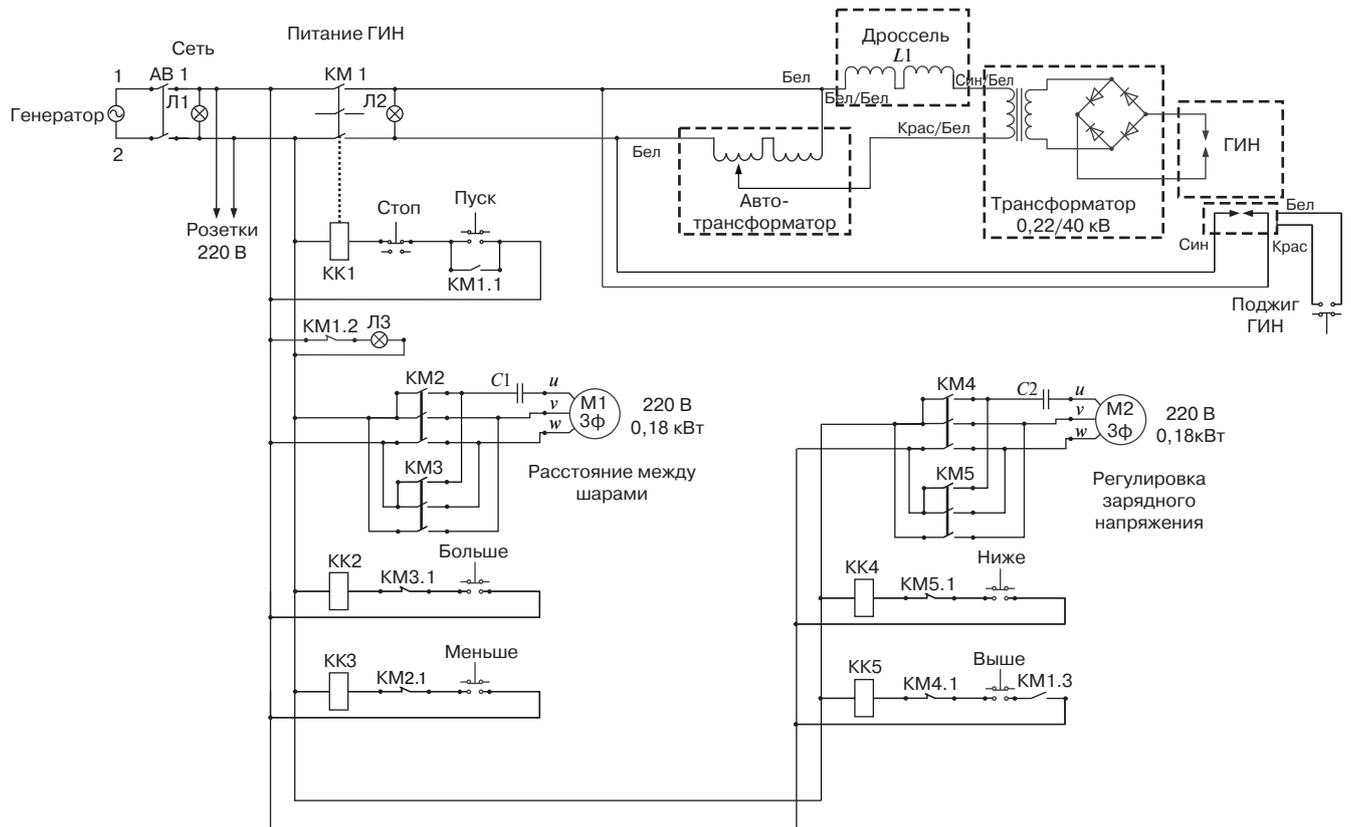


Рис. 2. Схема электрическая принципиальная установки ГИН:

Л1 — лампа СЕТЬ; Л2 — лампа включения ГИН; Л3 — лампа отключения ГИН  
 Fig. 2. Electrical schematic diagram of the installation of the impulse voltage generator:  
 Л1 — NETWORK indicator; Л2 — impulse voltage generator power on indicator;  
 Л3 — impulse voltage generator power off indicator

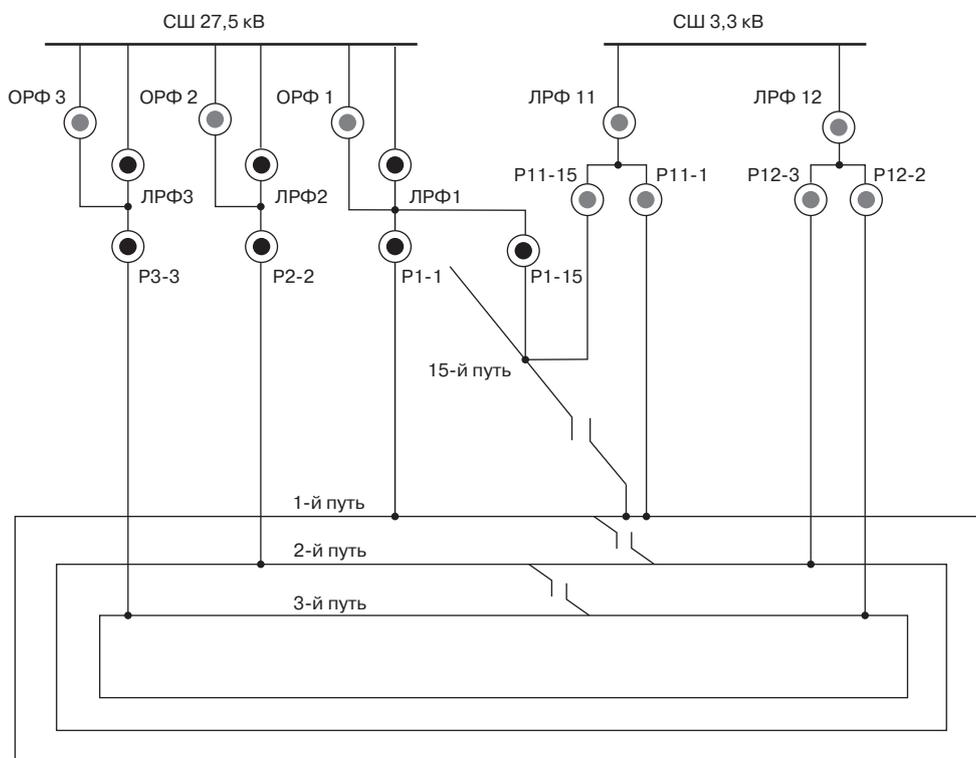


Рис. 3. Схема питания и секционирования Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ»:  
СШ — секция шин; ОРФ — обходной фидерный разъединитель; ЛРФ — линейный фидерный разъединитель; P — разъединитель

Fig. 3. Diagram of power supply and sectioning of the Railway Research Institute Experimental Loop:  
СШ — bus section; ОРФ — bypass feeder disconnector; ЛРФ — linear feeder disconnector; P — disconnector

питания контактной сети на двухпутных участках железных дорог, как правило, являются двухсторонними, с установленными на межподстанционной зоне пунктами параллельного соединения и/или постов секционирования. Они также являются кольцевыми, с соединением участков контактной сети через общие секции шин. Таким образом, участок межподстанционной зоны при нормальной схеме питания будет как минимум одним кольцом [10, 11]. Земляное полотно

высотой от 0,5 до 1,5 м. Путь бесстыковой, плети из рельсов марки Р65, шпалы железобетонные. Толщина слоя балласта составляет до 400 мм, фракция щебня 60...80 мм, загрязненность балласта не более 15%.

Испытания были выполнены при разных состояниях балласта пути. Кроме того, было рассмотрено распространение волн грозового перенапряжения на ограниченных, не закольцованных участках контактной сети. Эти испытания проводились на 15-м (тупиковом) пути Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» протяженностью 600 м при отсутствии напряжения в контактной сети. Путь стыковой, стык через 25 м, шпала железобетонная. Толщина слоя балласта составляет до 100 мм, фракция щебня 30...50 мм, загрязненность балласта до 60%. Схема питания и секционирования контактной сети 1-го и 15-го пути Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» приведена на рис. 3.

На рис. 4 представлена схема установки мобильной платформы и подключения оборудования для проведения испытаний и сбора данных.

На 1-м пути измерения импульсных напряжений проводили при помощи высоковольтного делителя с удалением от точки подключения ГИН от 100 до 3000 м, а на 15-м пути — с удалением от 100 до 600 м.

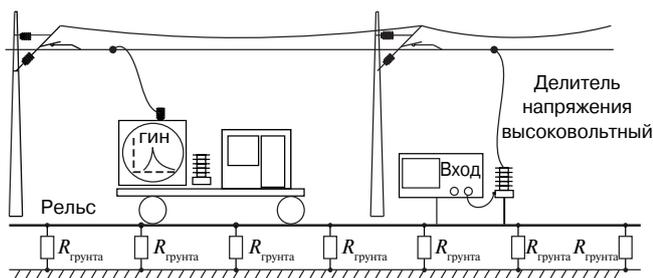


Рис. 4. Схема установки мобильной платформы со смонтированным оборудованием и подключением к контактной сети для проведения испытаний

Fig. 4. Installation diagram of a mobile platform with installed equipment and connection to the catenary system for testing

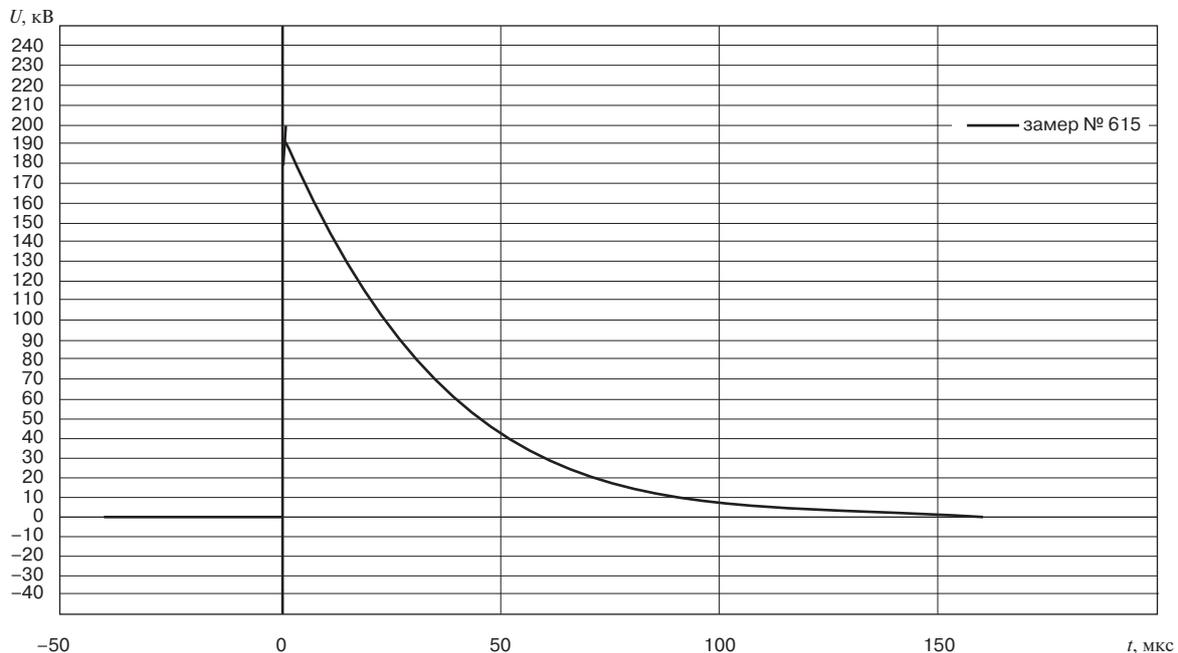


Рис. 5. Импульс ГИН без подключения к контактной сети

Fig. 5. Impulse of the impulse voltage generator without connection to the catenary system

Замеры были проведены в сухую погоду и после выпадения осадков (при условии увлажнения земляного полотна). Для сбора данных применяли осциллограф АКТАКОМ ADS-6062Н, подключенный к контактной сети через делитель напряжения SMR 10/770.

После подключения ГИН к контактной сети производили разряд в контактную сеть и осциллографировали полученные данные. В ходе проведения испытаний мобильная платформа не перемещалась, точка подключения ГИН не менялась, уровень разрядного напряжения не изменялся. Перемещалось только измерительное оборудование.

Для проверки работоспособности ГИН, системы измерения и уровня импульса напряжения подавался разряд ГИН на штатную нагрузку без подключения к контактной сети. Осциллограмма импульса ГИН приведена на рис. 5.

После проверки работоспособности ГИН и измерительной системы, а также проверки уровня импульсного напряжения были начаты испытания на контактной сети. Полученные первые данные показали просадку уровня напряжения в контактной сети, так как контактная сеть представляет собой длинную электрическую линию с распределенными параметрами: емкостью контактной подвески относительно земли и продольной индуктивностью контактной подвески. Осциллограммы импульса напряжений, записанные на 1-м пути, с удалением от 100 и до 3000 м при разрядном напряжении 195 кВ показаны на рис. 6. Скорость записи составила 10 мкс/дел.

На рис. 7 представлена зависимость напряжения в контактной сети от удаления от точки разряда ГИН с процентным соотношением изменения величины напряжения распространения волны, а также влияние обратной волны (обратная волна не по полярности, а по расхождению в две стороны от удара ГИН) на уровень напряжения.

Анализ данных на рис. 6 и 7 показывает, что до удаления от точки удара на 1500 м снижения амплитуды волны перенапряжения не происходит. Также наблюдаем при удалении 100 м обратную волну, которая прошла круг с отставанием по времени примерно 23 мкс. Далее на осциллограммах на рис. 6, б, в, г и др. наблюдается уменьшение времени между прямой волной и обратной. Это связано с тем, что при удалении от ГИН обратной волне требуется меньшее время для преодоления расстояния до места измерений. На удалении на расстояние более 1500 м начинается рост амплитуды перенапряжения, вызванный влиянием обратной волны, которая прошла круг и наложилась на прямую волну. На удалении на расстояние 3000 м амплитуда напряжения примерно в 1,5 раза превышает напряжение на участке 100–1500 м и наблюдается схождение двух волн. Этот факт можно объяснить волновыми процессами в проводах контактной сети.

На рис. 8 приведены осциллограммы импульса напряжений, записанные на 15-м пути, с удалением от точки разряда ГИН от 100 до 600 м при разрядном напряжении 195 кВ, скорость записи составила 10 мкс/дел.

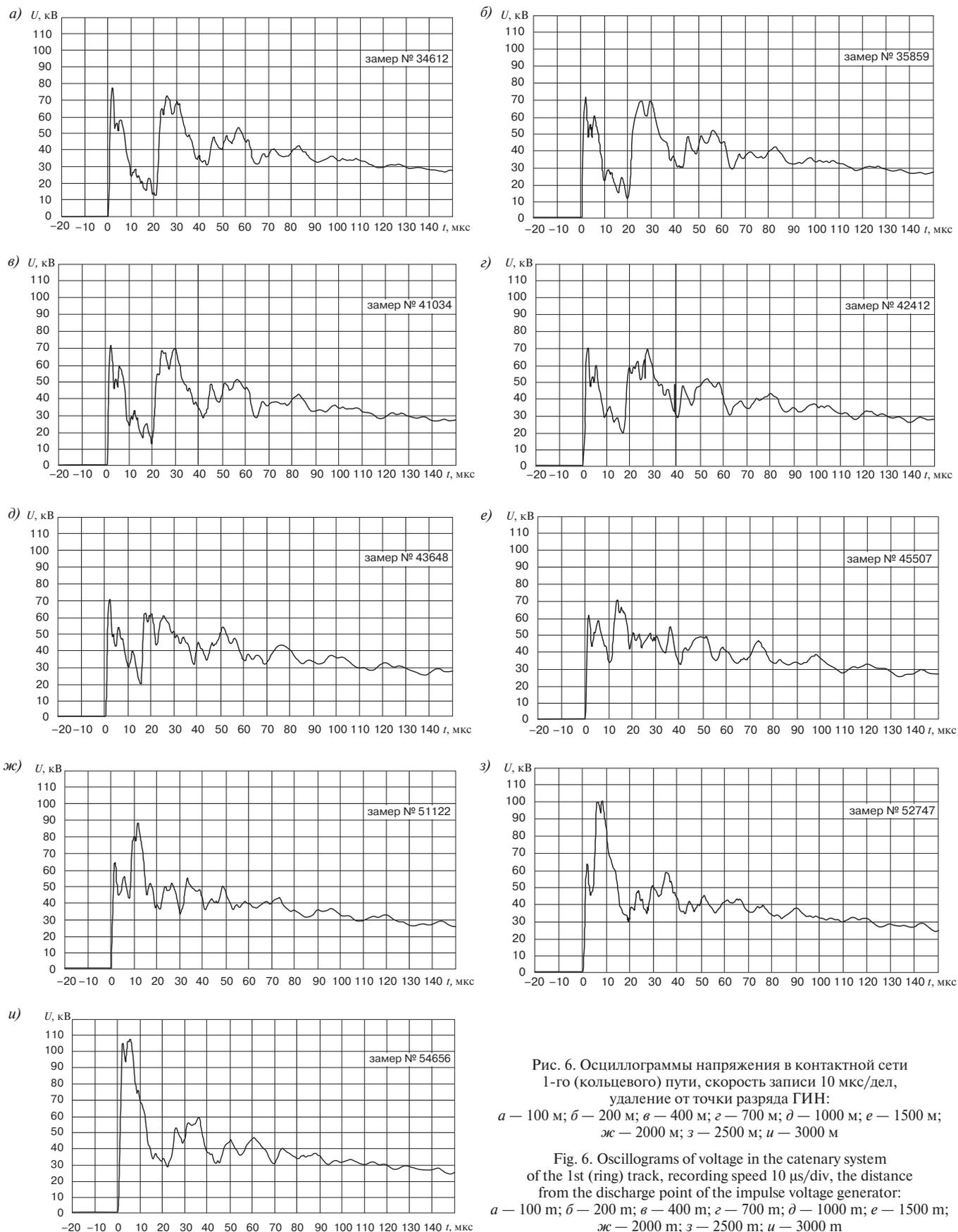


Рис. 6. Осциллограммы напряжения в контактной сети 1-го (кольцевого) пути, скорость записи 10 мкс/дел, удаление от точки разряда ГИН: а – 100 м; б – 200 м; в – 400 м; г – 700 м; д – 1000 м; е – 1500 м; ж – 2000 м; з – 2500 м; и – 3000 м

Fig. 6. Oscillograms of voltage in the catenary system of the 1st (ring) track, recording speed 10  $\mu$ s/div, the distance from the discharge point of the impulse voltage generator: а – 100 m; б – 200 m; в – 400 m; г – 700 m; д – 1000 m; е – 1500 m; ж – 2000 m; з – 2500 m; и – 3000 m

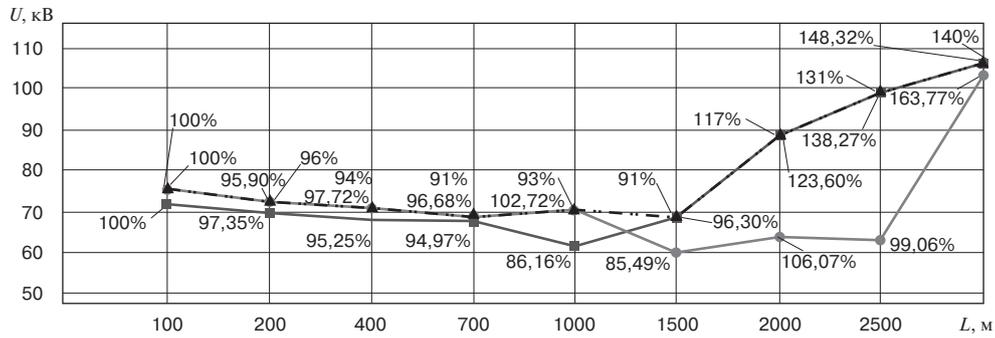


Рис. 7. Зависимость значений напряжения в контактной сети 1-го пути от удаления от точки разряда ГИН:  
 ● — напряжение прямой волны; ■ — напряжение обратной волны; ▲ — результирующая волна

Fig. 7. Dependence of the voltage values in the catenary system of the 1st track on the distance from the discharge point of the impulse voltage generator:  
 ● — direct wave voltage; ■ — reverse wave voltage; ▲ — resulting wave

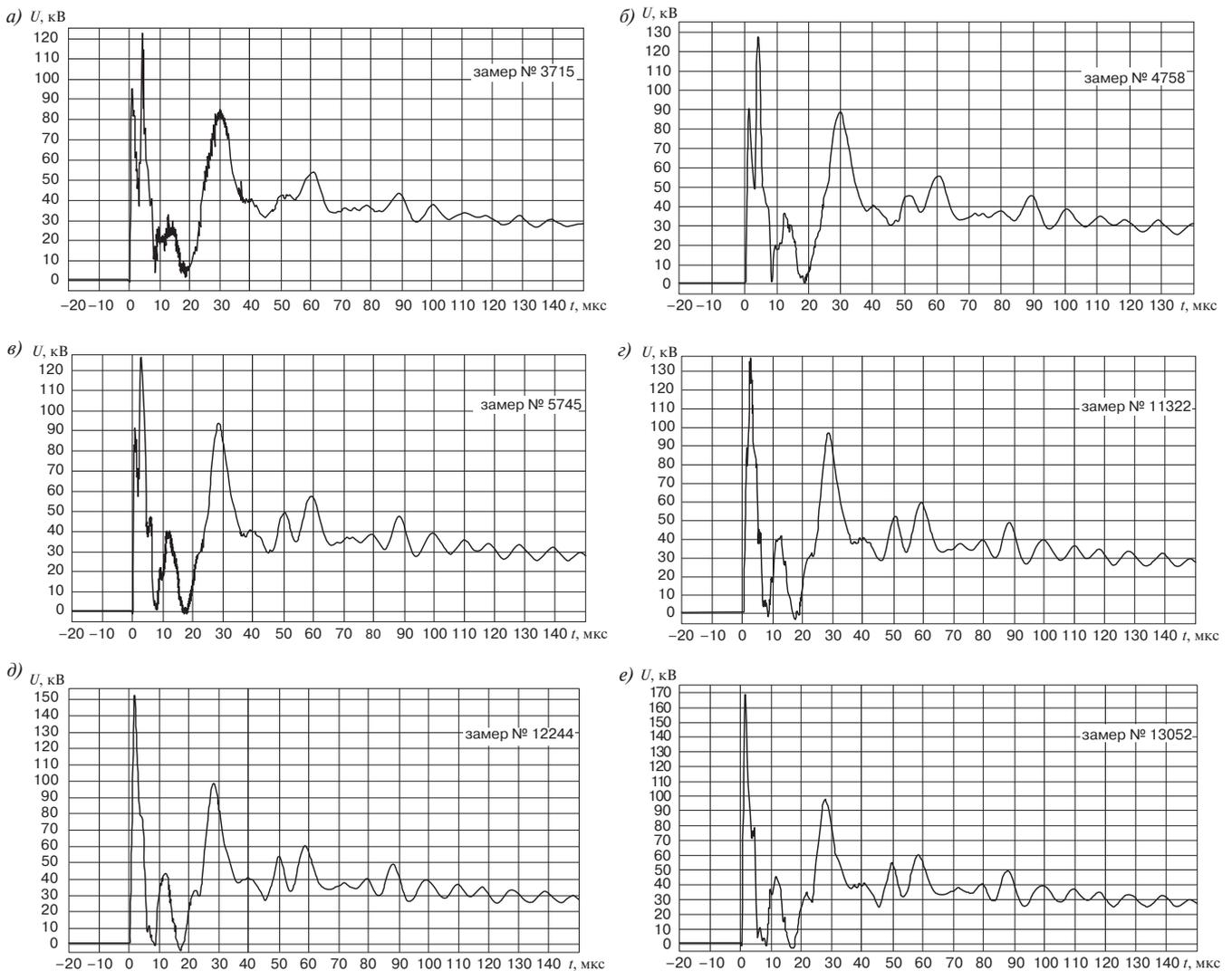


Рис. 8. Осциллограммы напряжения в контактной сети на 15-м (тупииковом) пути, скорость записи 10 мкс/дел, удаление от точки разряда ГИН:  
 а — 100 м; б — 200 м; в — 300 м; г — 400 м; д — 500 м; е — 600 м

Fig. 8. Oscillograms of voltage in the catenary system on the 15th (dead end) track, recording speed 10  $\mu$ s/div, the distance from the discharge point of the impulse voltage generator:  
 а — 100 m; б — 200 m; в — 300 m; г — 400 m; д — 500 m; е — 600 m

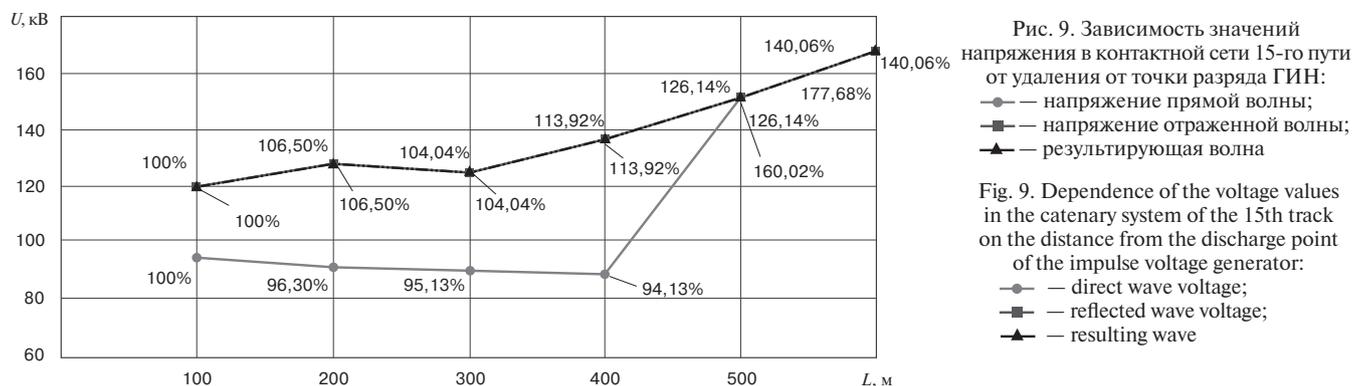


Рис. 9. Зависимость значений напряжения в контактной сети 15-го пути от удаления от точки разряда ГИН: — напряжение прямой волны; — напряжение отраженной волны; — результирующая волна

Fig. 9. Dependence of the voltage values in the catenary system of the 15th track on the distance from the discharge point of the impulse voltage generator: — direct wave voltage; — reflected wave voltage; — resulting wave

На рис. 9 представлена зависимость напряжения в контактной сети 15-го пути от удаления от точки разряда ГИН с процентным соотношением изменения величины напряжения распространения волны, а также влияние отраженной волны на уровень напряжения.

При разряде генератора в контактную сеть тупикового пути наблюдается равномерное повышение напряжения по мере удаления от точки разряда. На максимальном удалении (600 м) напряжение увеличилось примерно в 1,5 раза по отношению к входному импульсу. Это также позволяет предположить волновой характер распространения импульса перенапряжения и наличие его отражений в конце контактной подвески.

**Заключение.** Испытания показали, что в характере распространения в контактной сети волн импульса грозового перенапряжения при различных состояниях балласта пути и земляного полотна отличия не обнаружены.

Испытания также показали, что на контактной сети кольцевого (замкнутого) пути длиной 6000 м волна импульса грозового перенапряжения затухает, но может пройти более 6000 м. При этом ГИН влияет на степень затухания волны через выходное сопротивление, а также через измерительную систему. На расстоянии от 100 до 1500 м от точки разряда ГИН в провод контактной сети амплитуда импульса почти не меняется. На расстоянии от 1500 до 3000 м наблюдается увеличение амплитуды импульса напряжения в 1,5 раза, это вызвано влиянием обратной волны, прошедшей круг. Контактная сеть представляет собой длинную электрическую линию с распределенными параметрами: емкостью контактной подвески относительно земли и продольной индуктивностью контактной подвески. Рост амплитуды импульса вызван отражениями волн от неоднородностей, проявляющихся в местах соединения проводов, схождением волн, распространяющихся в обе стороны от точки разряда ГИН, в середине участка кольцевого пути.

Испытания на контактной сети тупикового участка пути длиной 600 м показали, что волна импульса грозового перенапряжения в контактной сети не затухает. На расстоянии от 100 до 600 м от точки разряда ГИН наблюдается равномерное увеличение амплитуды импульса напряжения в 1,3 раза. Такой рост амплитуды импульса свидетельствует о волновых процессах, происходящих в контактной сети: отражение волны импульса грозового перенапряжения от конца контактной подвески.

Исследования по распространению волн импульса грозового перенапряжения на контактной сети предполагается продолжать для последующего улучшения работы устройств защиты от грозовых перенапряжений контактной сети и линий СЦБ электрифицированных железных дорог, а также выбора мест их установки.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Раков В.А., Рашиди Ф. Обзор исследований молнии и молниезащиты за последние 10 лет // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 1. С. 24–47.
2. Техника высоких напряжений / И.М. Богатенков [и др.] / под ред. Г.С. Кучинского. СПб.: Энергоатомиздат, 2003. 608 с.
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. В 2-х т. Т. 1. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. 536 с.
4. Методические указания по защите распределительных электрических сетей напряжением 0,4–10 кВ от грозовых перенапряжений: стандарт организации; дата введения 01.12.2004. М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2004. 53 с.
5. Техника высоких напряжений: учеб. пособие для вузов / И.М. Богатенков [и др.]; под ред. Г.С. Кучинского. СПб.: Изд-во ПЭИПК, 1998. 700 с.
6. Косарев А.Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока. М.: Интекст, 2004. 272 с.
7. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [Электронный ресурс]: утв. приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 21 декабря 2010 г. № 286. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/55070488> (дата обращения: 23.05.2022).
8. ГОСТ 33944–2016. Подвеска железной дороги контактная. Технические требования и методы контроля [Электронный ресурс]:

межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 января 2017 г. № 4-ст: дата введения 2017-08-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200143506> (дата обращения: 01.06.2022).

9. Правила содержания контактной сети, питающих линий, отсасывающих линий, шунтирующих линий и линий электропередачи [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 25 апреля 2016 г. № 753р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/560395255> (дата обращения: 10.05.2022).

10. Справочник по электроснабжению железных дорог. В 2-х т. Т. 1 / под ред. К. Г. Марквардта. М.: Транспорт, 1980. 256 с.

11. Там же. Т. 2. 1981. 392 с.

## REFERENCES

1. Rakov V. A., Rashidi F. Obzor issledovaniy molnii i molnie-zashchity za poslednie 10 let [Review of studies of lightning and lightning protection over the past 10 years]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU = St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2010; (1):24-47. (In Russ.).

2. Bogatenkov I. M., Bocharov Yu. N., Gumerova N. I. et al. Tekhnika vysokikh napryazheniy [High voltage technology]. St. Petersburg: Energoatomizdat Publ.; 2003. 608 p. (In Russ.).

3. Neyman L. R., Demirchyan K. S. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. St. Petersburg: Energoizdat Publ.; 1981. 536 p. (In Russ.).

4. Metodicheskie ukazaniya po zashchite raspredelitel'nykh elektricheskikh setey napryazheniem 0,4–10 kV ot grozovykh perynapryazheniy [Guidelines for the protection of distribution electrical networks with a voltage of 0.4–10 kV from lightning surges]. Org. standard. Introduction date 01.12.2004. Moscow: FSK EES Publ.; 2004. 53 p. (In Russ.).

5. Bogatenkov I. M., Bocharov Yu. N., Gumerova N. I. et al. Tekhnika vysokikh napryazheniy [High voltage technology]. Textbook. St. Petersburg, PEIPK Publ.; 1998. 700 p. (In Russ.).

6. Kosarev A. B. Osnovy teorii elektromagnitnoy sovmestimosti sistem tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka [Fundamentals of the theory of electromagnetic compatibility of systems of traction power supply of alternating current]. Moscow: Intext Publ.; 2004. 272 p. (In Russ.).

7. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii [Rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation]. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 286 dated December 21, 2010. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/55070488> (access date: 23.05.2022). (In Russ.).

8. GOST 33944–2016. Podveska zheleznoy dorogi kontaktnaya. Tekhnicheskie trebovaniya i metody kontrolya [Railway overhead contact line. Technical requirements and control methods]. Interstate standard: put into effect as nat. standard of the Russian Federation by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated January 11, 2017 No. 4-st: introduction date 2017-08-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200143506> (access date: 01.06.2022). (In Russ.).

9. Pravila soderzhaniya kontaktnoy seti, pitayushchikh liniy, otsasyvayushchikh liniy, shuntiruyushchikh liniy i liniy elektroperedachi [Rules for the maintenance of the contact network, supply lines, suction lines, shunt lines and power lines]. Approved by Order of Russian Railways Company dated April 25, 2016 No. 753r. URL: <https://docs.cntd.ru/document/560395255> (access date: 10.05.2022). (In Russ.).

10. Markvardt K. G., ed. Spravochnik po elektrosnabzheniyu zheleznykh dorog [Handbook of railway power supply]. In 2 vols. Vol. 1. Moscow: Transport Publ.; 1980. 256 p. (In Russ.).

11. Ibid. Vol. 2. 1981. 392 p. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Константин Сергеевич БЕЛОМЕСТНЫХ**, ведущий специалист, отдел «Контактная сеть и токосъем», научный центр «Электрификация и теплоэнергетика» (ЦЭТ), Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), SPIN-код: 2539-3080, <https://orcid.org/0000-0002-6083-9014>

**Александр Николаевич БАРДИН**, начальник отдела «Электротехнические испытания», научный центр «Электрификация и теплоэнергетика» (ЦЭТ), Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, Bardin.Aleksandr@vniizht.ru), SPIN-код; 2411-1426, <https://orcid.org/0000-0002-4945-1000>

**Сергей Николаевич ВЕЧКАНОВ**, ведущий специалист, отдел «Электротехнические испытания», научный центр «Электрификация и теплоэнергетика» (ЦЭТ), Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, Vechkanov.Sergey@vniizht.ru), Author ID: 7130-8169, <https://orcid.org/0000-0002-6469-1731>

**Антон Александрович КРЫЛОВ**, директор центра «Электрификация и теплоэнергетика» (ЦЭТ), Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, Krylov.Anton@vniizht.ru), Author ID: 1140127, <https://orcid.org/0000-0001-9473-5435>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Konstantin S. BELOMESTNYKH**, Leading Specialist, Contact Network and Current Collection Department, Electrification and Thermal Power Engineering Research Center, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), SPIN-code: 2539-3080, <https://orcid.org/0000-0002-6083-9014>

**Alexander N. BARDIN**, Head of the Department of Electrical Testing, Electrification and Thermal Power Engineering Research Center, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St., Bardin.Aleksandr@vniizht.ru), SPIN-code; 2411-1426, <https://orcid.org/0000-0002-4945-1000>

**Sergey N. VECHKANOV**, Leading Specialist, Electrification and Thermal Power Engineering Research Center, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St., Vechkanov.Sergey@vniizht.ru), Author ID: 7130-8169, <https://orcid.org/0000-0002-6469-1731>

**Anton A. KRYLOV**, Director of the Electrification and Thermal Power Engineering Research Center, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St., Krylov.Anton@vniizht.ru), Author ID: 1140127, <https://orcid.org/0000-0001-9473-5435>

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Константин Сергеевич БЕЛОМЕСТНЫХ**. Проведение испытаний, анализ полученных данных, формулировка целей и задач, методология экспериментального определения распространения импульса перенапряжения в контактной сети, формирование заключительной части (30%).

**Александр Николаевич БАРДИН.** Проведение испытаний, анализ полученных данных, формирование концепции статьи, определение структуры и логики подачи материала, формирование заключительной части (30%).

**Сергей Николаевич ВЕЧКАНОВ.** Проведение испытаний, анализ полученных данных, формирование заключительной части (30%).

**Антон Александрович КРЫЛОВ.** Формирование введения и заключения, структурирование подачи материала в статье и концепции его изложения (10%).

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Konstantin S. BELOMESTNYKH.** Testing, analysis of the obtained data, formulation of goals and objectives, methodology for experimental determination of the propagation of an overvoltage pulse in a contact network, formation of the final part (30%).

**Alexander N. BARDIN.** Testing, analysis of the obtained data, formation of the concept of the article, determination of the structure and logic of the presentation of the material, formation of the final part (30%).

**Sergey N. VECHKANOV.** Testing, analysis of the obtained data, formation of the final part (30%).

**Anton A. KRYLOV.** Formation of the introduction and conclusion, structuring the presentation of the content of the article (10%).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The authors have read and approved the final manuscript.*

**Прозрачность финансовой деятельности:** авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

**Financial transparency:** the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07.07.2022, рецензия от первого рецензента получена 08.08.2022, рецензия от второго рецензента получена 05.09.2022, принята к публикации 01.11.2022.

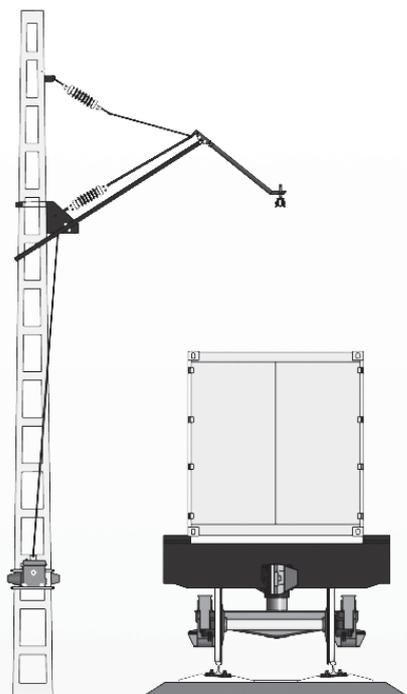
The article was submitted 07.07.2022, first review received 08.08.2022, second review received 05.09.2022, accepted for publication 01.11.2022.



ПАТЕНТЫ ВНИИЖТ

## УСТРОЙСТВО ОТВОДА КОНТАКТНОЙ СЕТИ

С. А. Виноградов, М. И. Мехедов, А. А. Крылов,  
А. В. Куликов, А. А. Царьков



Устройство предназначено для отвода действующей контактной сети в зоне погрузки/выгрузки вагонов и контейнерных (фитинговых) платформ на боковых приемоотправочных путях промежуточных (опорных) железнодорожных станций и терминально-логистических центров. Данная конструкция позволяет повысить надежность отвода контактной сети при одновременном обеспечении максимально требуемого габарита для работы вертикальных погрузчиков. Это достигается тем, что освобождается надвагонное пространство от контактной сети, причем отвод контактной сети осуществляется путем ее перемещения вверх к опоре, для чего изменяется ее геометрия посредством привода, системы тяг, включающей тягу привода, консоль, поддерживающую тягу, синхронизирующую тягу и регулировочную тягу, и шарнирно-поворотных узлов, связывающих систему тяг с опорой контактной сети и переходным профилем, связанным с контактным проводом.

Патент на полезную модель 205470 U1, 15.07.2021.

Заявка № 2020139553 от 02.12.2020

Более подробная информация на сайте:

[https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_46471717\\_91459176.PDF](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_46471717_91459176.PDF)

*По вопросам использования интеллектуальной собственности обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, Научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».*

*Тел.: (495) 602-83-01, e-mail: journal@vniizht.ru, www.vniizht.ru*



АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ  
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Оригинальная статья

УДК 656.225:629.46

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-359-369

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



## МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ВНЕДРЕНИИ ВАГОНОВ С ПОВЫШЕННОЙ ОСЕВОЙ И ПОГОННОЙ НАГРУЗКОЙ

М. И. Мехедов, Е. А. Сотников, П. С. Холодняк,  
А. А. Капырин, Н. В. Корниенко ✉

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Одним из направлений повышения провозной способности железнодорожных линий является увеличение количества груза, размещаемого в вагонах, при этом следует учесть неизбежный рост осевой и погонной нагрузки вагона. Решение об использовании вагонов с повышенной осевой нагрузкой должно основываться на оценке их технико-экономической эффективности по сравнению с получившимися широкое внедрение инновационными полувагонами с нагрузкой 25 т/ось. При оценке экономической эффективности от применения таких вагонов требуется учитывать их влияние на изменение параметров организации перевозочного процесса.

**Материалы и методы.** На основании представленных исходных данных по расчетному прогнозируемому грузопотоку выполнено определение численных значений параметров перевозочного процесса при внедрении 8- и 4-осных (27 т/ось) полувагонов. При определении прироста провозной способности учитывается ее изменение за счет увеличения массы поезда нетто и изменения общего количества поездов. Расчет выполнен с учетом усиления тяги пропорционально повышению массы поездов брутто из 8- и 4-осных (27 т/ось) полувагонов на существующей инфраструктуре.

**Результаты.** Разработаны методические положения по определению численных значений: увеличения провозной способности, потребного инвентарного парка вагонов и наличного парка локомотивов в условиях внедрения новых 8- и 4-осных (27 т/ось) полувагонов.

**Обсуждение и заключение.** Статья является теоретической и посвящена расчетным механизмам, методическим вопросам. Результаты исследования могут быть применены на полигонах сети ОАО «РЖД», в частности для решения сложных вопросов повышения провозной способности Восточного полигона.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** железнодорожная линия, провозная способность, масса поезда, инвентарный парк вагонов и магистральных локомотивов, внедрение 8- и 4-осных полувагонов, кольцевые маршруты

**Для цитирования:** Мехедов М. И., Сотников Е. А., Холодняк П. С., Капырин А. А., Корниенко Н. В. Методические положения по определению значений основных параметров условий организации перевозочного процесса при внедрении вагонов с повышенной осевой и погонной нагрузкой // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 4. С. 359–369. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-359-369>.

✉ [korniyenko.natalia@vniizht.ru](mailto:korniyenko.natalia@vniizht.ru) (Н. В. Корниенко)

© Мехедов М. И., Сотников Е. А., Холодняк П. С.,  
Капырин А. А., Корниенко Н. В., 2022



AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 656.225:629.46

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-359-369

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



## METHODOLOGICAL PROVISIONS FOR DETERMINING THE MAIN PARAMETERS OF THE ORGANISATION OF THE TRANSPORTATION PROCESS DURING THE INTRODUCTION OF CARS WITH INCREASED AXIAL AND LINEAR LOAD

Mikhail I. Mekhedov, Evgeniy A. Sotnikov, Pavel S. Kholodnyak,  
Aleksy A. Kapyrin, Natalya V. Kornienko ✉

Railway Research Institute,  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** One of the ways to increase the traffic-carrying capacity of railway lines is increasing the amount of cargo carried in cars, while taking into account the inevitable increase in the axial and linear load of the car. The decision to use cars with increased axial load should be based on an assessment of their technical and economic efficiency in comparison with the innovative and widely used open-box wagons with a load of 25 tonnes per axle. When assessing the economic efficiency of such cars, it is required to consider their impact on changes in the parameters of the organisation of the transportation process.

**Materials and methods.** Based on the presented initial data on the estimated predicted freight flow, the numerical values of the parameters of the transportation process were determined when introducing 8- and 4-axle (27 t/axle) open-box wagons. When determining the increase in the traffic-carrying capacity, its change due to an increase in the net mass of the train and a change in the total number of trains is taken into account. The calculation was made accounting for the increase in traction in proportion to the increase in the gross mass of the 8- and 4-axle (27 t/axle) open-box wagon trains on the existing infrastructure.

**Results.** The authors have developed methodological provisions to determine the numerical values: an increase in the traffic-carrying capacity, the required inventory fleet of cars and the available locomotive fleet in the context of the introduction of new 8- and 4-axle (27 t/axle) open-box wagons.

**Discussion and conclusion.** The article is theoretical and is devoted to calculation mechanisms and methodological issues. The results of the study may be applied to the ranges of the Russian Railways network, in particular, to solve complex issues of increasing the traffic-carrying capacity of the Eastern range.

**KEYWORDS:** railway line, traffic-carrying capacity, train weight, inventory fleet of open-box wagons and main line locomotives, introduction of 8- and 4-axle open-box wagons, circular routes

**For citation:** Mekhedov M. I., Sotnikov E. A., Kholodnyak P. S., Kapyrin A. A., Kornienko N. V. Methodological provisions for determining the main parameters of the organisation of the transportation process during the introduction of cars with increased axial and linear load. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(4):359-369. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-359-369>.

✉ [kornienko.natalia@vniizht.ru](mailto:kornienko.natalia@vniizht.ru) (N. V. Kornienko)

© Mekhedov M. I., Sotnikov E. A., Kholodnyak P. S.,  
Kapyrin A. A., Kornienko N. V., 2022

**В**ведение. Повышение провозной способности загруженных направлений сети железных дорог может достигаться не только за счет усиления и развития инфраструктуры и средств тяги, но и за счет внедрения конструкций вагонов с повышенными осевыми и погонными нагрузками [1].

Отечественной промышленностью предложены конструкции 4-осных полувагонов с увеличенной до 27 т/ось осевой нагрузкой (при погонной нагрузке на метр пути 7,76 т/м) и 8-осные полувагоны с погонной нагрузкой на метр пути 9,3 т/м. Решение об использовании этих вагонов должно основываться на оценке их технико-экономической эффективности по сравнению с получившимися широкое внедрение инновационными полувагонами с осевой нагрузкой 25 т/ось. При такой оценке требуется определять ряд параметров, связанных с изменением условий организации перевозочного процесса. Основными из них являются:

- изменение потребного инвентарного парка вагонов;
- изменение потребного наличного парка локомотивов;
- изменение провозной способности участков и направлений.

Ниже рассмотрены вопросы методического обеспечения вычислений численных значений указанных параметров для их последующего использования в технико-экономических расчетах.

**Исходные данные и условия подготовки методических положений.** Технические характеристики конструкций сравниваемых полувагонов представлены в табл. 1 [2, 3, 4].

Предусматривается концентрированное использование новых 8- и 4-осных (27 т/ось) полувагонов в кольцевых маршрутах, следующих по специализированным расписаниям, на выбранных направлениях с крупными корреспонденциями грузопотоков угля.

Обращение кольцевых маршрутов предусматривается при длине станционных путей 1050 м с полным использованием длины путей для всех вариантов массы поездов. Количество вагонов в таком маршруте определяется по формуле

$$n_{\text{ваг}} = \frac{l_{\text{ст}} - l_{\text{лок}} - l_{\text{ост}}}{l_{\text{ваг}}} \quad (1)$$

(с округлением в меньшую сторону),

где  $l_{\text{ст}}$  — длина станционных путей,  $l_{\text{ст}} = 1050$  м для всех вариантов;  $l_{\text{лок}}$  — длина локомотива, используемого на маршруте, м;  $l_{\text{ост}}$  — длина пути, предусматриваемая на точность остановки поезда,  $l_{\text{ост}} \geq 10$  м во всех вариантах;  $l_{\text{ваг}}$  — длина вагонов по осям автосцепок, м (см. табл. 1).

На Транссибе и БАМ предусматривается использование электровозов типа ЭС5К и тепловозов типа ТЭ25К2М с различным числом секций, значение  $l_{\text{лок}}$  в формуле (1) определяется согласно данным в табл. 2. Максимальная масса поезда брутто  $Q_{\text{max}}$  для принятого типа локомотива составит 7100–8850 т.

Прирост массы поезда при переходе от полувагонов 25 т/ось к полувагонам 27 т/ось и 8-осным для различных вариантов составит от 248 до 1231 т (табл. 3).

Ежесуточное количество кольцевых маршрутов зависит от размеров корреспонденций грузопотоков угля на выбранных направлениях. Очевидно, что наименьшее количество маршрутов будет в варианте использования 8-осных полувагонов, так как они имеют максимальные значения массы поезда нетто.

Для устойчивости выполнения специализированных расписаний кольцевых маршрутов необходимо

Таблица 1

Параметры 4- и 8-осных полувагонов

Table 1

Parameters of 4- and 8-axle open-box wagons

Тип вагона	Длина по осям автосцепок $l_{\text{ваг}}$ , м	Масса вагона, т		
		Брутто $q_{\text{бр}}$	Нетто $q_{\text{н}}$	Тара $q_{\text{т}}$
4-осный (25 т/ось) глухонный	13,92	100	76	24
4-осный (25 т/ось) с люками	13,92	100	75	25
4-осный (27 т/ось) глухонный	13,92	108	83	25
8-осный глухонный	20,24	188	141	47
8-осный с люками	20,24	188	139	49

Таблица 2

Максимальная масса поезда брутто для принятого типа локомотива с учетом числа секций

Table 2

Maximum gross train mass for the accepted type of locomotive, taking into account the number of sections

Тип локомотива с учетом числа секций	$Q_{\text{max}}$ , т	$l_{\text{лок}}$ , м
3ЭС5К	7100	52,5
3ТЭ25К2М	7100	60,0
4ЭС5К <sub>пр</sub> (с поосным регулированием)	8850	70,0
2ТЭ25К2М + 2ТЭ25К2М	8850	80,0

Таблица 3

Прирост массы поезда при переходе от 4-осных (25 т/ось) к 4-осным (27 т/ось) и 8-осным полувагонам

Table 3

Increase in train mass during the transition from 4-axle (25 t/axle) to 4-axle (27 t/axle) and 8-axle open-box wagons

Тип вагона	Используемый тип локомотива	Количество вагонов в поезде при тяге $n_{\text{ваг}}$		Масса поезда брутто $Q_{\text{бр}}$ , т, при тяге		Масса поезда нетто $Q_{\text{н}}$ , т, при тяге		Прирост массы поезда нетто при переходе к 4-осным (27 т/ось) и 8-осным полувагонам $\Delta Q_{\text{н}}$ , т, при тяге	
		Электро-воз	Тепловоз	Электро-воз	Тепловоз	Электро-воз	Тепловоз	Электровоз	Тепловоз
4-осный (25 т/ось) глуходонный	3ЭС5К или 3ТЭ25К2М	71	71	7100	7100	5396	5396	—	—
4-осный (25 т/ось) с люками	3ЭС5К или 3ТЭ25К2М	71	71	7100	7100	5325	5325	—	—
4-осный (27 т/ось) глуходонный	4ЭС5К <sub>пр</sub> или 2ТЭ25К2М + 2ТЭ25К2М	69	68	7452	7344	5727	5644	5727 – 5396 = 331	5644 – 5396 = 248
8-осный глуходонный	4ЭС5К <sub>пр</sub> или 2ТЭ25К2М + 2ТЭ25К2М	47	47	8836	8836	6627	6627	6627 – 5396 = 1231	6627 – 5396 = 1231
8-осный с люками	4ЭС5К <sub>пр</sub> или 2ТЭ25К2М + 2ТЭ25К2М	47	47	8836	8836	6533	6533	6533 – 5325 = 1208	6533 – 5325 = 1208

обеспечивать отправление не менее одного маршрута в сутки. Поэтому ограничением по величине грузопотоков является условие

$$\Gamma_{\text{гр}} \geq \frac{365q_{\text{н8}}n_{\text{ваг8}}10^{-6}}{\beta_{\text{нep}}}, \quad (2)$$

где  $\Gamma_{\text{гр}}$  — грузопоток каменного угля между станциями отправления и назначения, млн т/год;  $q_{\text{н8}}$  — масса 8-осного полувагона нетто, т;  $n_{\text{ваг8}}$  — количество 8-осных полувагонов в поезде, состоящем только из

8-осных полувагонов;  $\beta_{\text{нep}}$  — коэффициент неравномерности суточной погрузки.

$$\beta_{\text{нep}} = \frac{\Gamma_{\text{гр min}}^{\text{сут}}}{1/365 \Gamma_{\text{гр}}}, \quad (3)$$

где  $\Gamma_{\text{гр min}}^{\text{сут}}$  — фактическая минимальная суточная погрузка рассматриваемого грузопотока (с вероятностью не менее 0,95), млн т/сут.

На основании экспертных оценок и с учетом рекомендаций, содержащихся в [5], коэффициент неравномерности суточной погрузки принимается равным  $\beta_{\text{нep}} = 0,75$ . Определено суточное количество кольцевых маршрутов для 8- и 4-осных (27 т/ось) полувагонов (табл. 4).

На основании представленных исходных данных возможно определение численных значений параметров перевозочного процесса при внедрении 8-осных и 4-осных (27 т/ось) полувагонов.

**Потребный инвентарный парк** 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов определяется отдельно для каждого выбранного направления корреспонденций следования угля в кольцевых маршрутах из 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов:

$$n_{\text{н8}} = n_{\text{н8}}^{\text{испр}} + n_{\text{п8}}^{\text{отп}} + n_{\text{п8}}^{\text{кан}}, \quad (4)$$

где  $n_{\text{н8}}^{\text{испр}}$  — потребный наличный исправный парк 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов;  $n_{\text{п8}}^{\text{отп}}$  — потребное количество 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов,

Таблица 4

Количество кольцевых маршрутов в сутки для 8- и 4-осных (27 т/ось) полувагонов

Table 4

Number of circular routes per day for 8- and 4-axle (27 t/axle) open-box wagons

8-осные полувагоны		4-осные (27 т/ось) полувагоны	
Годовой расчетный грузопоток, млн т/год	Количество маршрутов, маршрутов/сут	Годовой расчетный грузопоток, млн т/год	Количество маршрутов, маршрутов/сут
3,3–6,6 (искл.)	1	2,8–5,6 (искл.)	1
6,6–9,9 (искл.)	2	5,6–8,4 (искл.)	2
9,9–13,2 (искл.)	3	8,4–11,2 (искл.)	3
13,2–16,5 (искл.)	4	11,2–14,0 (искл.)	4
>16,5	5	>14,0	5

находящихся в отцепочном ремонте;  $n_{p8}^{кап}$  — требуемое количество 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов, находящихся в капитальном ремонте.

Здесь и далее в необходимых случаях индекс «8» относится не только к 8-осным, но и к 4-осным (27 т/ось) полувагонам.

Доля 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов, находящихся в отцепочном ремонте, составляет

$$\alpha_{p8}^{отц} = \frac{n_{p8}^{отц}}{n_{и8}}. \quad (5)$$

То же в капитальном ремонте:

$$\alpha_{p8}^{кап} = \frac{n_{p8}^{кап}}{n_{и8}}. \quad (6)$$

Тогда

$$n_{и8} = \frac{n_{и8}^{испр}}{1 - (\alpha_{p8}^{отц} + \alpha_{p8}^{кап})}. \quad (7)$$

Для каждого направления следования корреспонденций угля величина  $n_{и8}^{испр}$  определяется по формуле

$$n_{и8}^{испр} = \frac{1}{24} O_8 k_{sj} n_8, \quad (8)$$

где  $O_8$  — время оборота 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов, следующих в кольцевых маршрутах, для выбранного направления следования корреспонденций угля, ч;  $k_{sj}$  — количество отправляющихся кольцевых маршрутов, маршрутов/сут;  $n_8$  — количество 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов в кольцевом маршруте.

Рассмотрим порядок определения величины  $O_8$ , которая рассчитывается по формуле

$$O_8 = t_8^{погр} + t_8^{выгр} + t_8^{д.гр} + t_8^{д.пор}, \quad (9)$$

где  $t_8^{погр}$  — полное время нахождения 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов на путях станции примыкания ОАО «РЖД» и на путях необщего пользования (ПНП), связанное с выполнением операции погрузки, ч;  $t_8^{выгр}$  — то же, связанное с выполнением операции выгрузки, ч;  $t_8^{д.гр}$ ,  $t_8^{д.пор}$  — время следования 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов в кольцевых маршрутах между станциями погрузки и выгрузки (от отправления до прибытия) в груженом и порожнем состояниях соответственно, ч.

Значение  $t_8^{погр}$  включает в себя технологическое время операций, выполняемых на станциях примыкания ОАО «РЖД», обслуживающих углепогрузочный район, и на ПНП:

$$t_8^{погр} = t_{8ржд}^{погр} + t_{8пнп}^{пнп} + t_{8пнп}^{погр} + t_{8ржд}^{8ржд} + t_{8ржд}^{отпр}, \quad (10)$$

где  $t_{8ржд}^{погр}$  — время нахождения порожних 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов, следующих в кольцевых маршрутах, на станции примыкания ОАО «РЖД», обслужи-

вающей углепогрузочный район, от прибытия до отправления на ПНП, ч;  $t_{8пнп}^{погр}$  — время нахождения 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов, следующих в кольцевых маршрутах, на ПНП при выполнении операции погрузки без учета времени следования маршрута между станцией примыкания ОАО «РЖД» и углесборочной станцией ПНП (в обоих направлениях), ч;  $t_{8ржд}^{пнп}$ ,  $t_{8пнп}^{8ржд}$  — время нахождения 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов при следовании в кольцевых маршрутах от станции ОАО «РЖД» до передаточной (углесборочной) станции ПНП и в обратном направлении соответственно, ч;  $t_{8ржд}^{отпр}$  — время нахождения кольцевого маршрута из груженных 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов на станции ОАО «РЖД» от прибытия с ПНП до отправления на участок, ч.

Учитываемые при определении времени оборота вагонов технологические операции на станциях примыкания ОАО «РЖД» и ПНП при погрузке угля представлены в табл. 5. В зимний период увеличивается время выполнения операций, связанных с погрузочно-выгрузочными работами, что приводит к увеличению требуемого парка вагонов. Поэтому расчет парка вагонов выполняется для зимнего периода.

Следует учитывать, что обращение кольцевых маршрутов предусматривается по специализированным расписаниям, поэтому величина  $t_8^{погр}$  в формуле (10) для повышения надежности выполнения таких расписаний должна учитывать некоторый резерв времени  $t_{рез8}^{погр}$  на возможную неравномерность выполнения технологических операций, входящих в величину  $t_8^{погр}$ , т. е.:

$$t_8^{погр} = \bar{t}_8^{погр} + t_{рез8}^{погр}. \quad (11)$$

В расчетах с учетом нормального закона распределения продолжительности выполнения станционных операций [6] принимается 10%-й резерв времени.

Тогда

$$t_8^{погр} = 1,1 \bar{t}_8^{погр}. \quad (12)$$

Технологическое время загрузки вагонов (операция 6 в табл. 5) определяется в условиях использования погрузочных бункеров — способа, наиболее характерного для крупных углепогрузочных районов. Возможна последовательная или параллельная загрузка вагонов маршрута при использовании одного или двух погрузочных бункеров с соответствующим изменением суммарного времени загрузки вагонов и в целом величины  $t_8^{погр}$ .

Аналогичный анализ технологических операций выполнен и при определении времени оборота вагонов, связанного с выполнением операции выгрузки  $t_8^{выгр}$ .

Таблица 5

Технологические операции, выполняемые на станциях примыкания ОАО «РЖД» и ПНП при погрузке 8-осных (4-осных) полувагонов, входящих в кольцевой маршрут

Table 5

Technological operations performed at the connecting stations of JSC Russian Railways and non-public railways when loading 8-axle (4-axle) open-box wagons included in the circular route

№ п/п	Технологические операции	Место и особенности выполнения операций
1	Операции с отправительским маршрутом по прибытию на станцию примыкания ОАО «РЖД» и отправлению на углесборочную станцию ПНП	Станция примыкания ОАО «РЖД»
2	Приемо-сдаточные операции	Станция примыкания ОАО «РЖД» или углесборочная станция ПНП
3	Операции по прибытию на углесборочную станцию	ПНП
4	Расформирование состава с формированием групп вагонов (подач) под очистку и погрузку вагонов. Подготовка к погрузке — очистка вагонов, опрыскивание антиобледенителем (зимой), взвешивание	ПНП
5	Подача групп вагонов к местам погрузки	ПНП
6	Погрузка, взвешивание груженых вагонов, дозировка, уплотнение угля	ПНП, операция выполняется последовательно или параллельно
7	Передача групп вагонов на углесборочную станцию	ПНП
8	Формирование маршрута	ПНП
9	Операции по отправлению кольцевого маршрута с углесборочной станции	ПНП
10	Приемо-сдаточные операции	ПНП или станция примыкания ОАО «РЖД»
11	Операции по прибытию с отправительским маршрутом с углесборочной станции и отправлению на перегон	Станция примыкания ОАО «РЖД»

Выгрузку 8-осных полувагонов, следующих в кольцевых маршрутах, предусмотрено выполнять на угольных терминалах морских портов. Учитываются варианты выгрузки угля с использованием вагоноопрокидывателей или грейферов.

При расчете  $t_8^{выгр}$  аналогично  $t_8^{погр}$  принимается 10%-й резерв времени на возможную неравномерность выполнения операций, связанных с выгрузкой вагонов.

Расчет времени выполнения маневровых операций при определении значений  $t_8^{погр}$  и  $t_8^{выгр}$  производится

согласно [7, 8 и 9], а времени выполнения погрузочно-выгрузочных операций согласно [10].

Учитывается, что ОАО «РЖД» совместно с железной дорогой примыкания ПНП для перспективных проектов рассматривает схему развития инфраструктуры ПНП и формирует к ней исходные данные, в которых излагаются требования к развитию инфраструктуры ПНП по освоению заявляемых объемов перевозок на основе реализации перспективной технологии. В таких требованиях, как правило, предусматривается решение задачи ускорения оборота вагонов, чему в значительной степени способствует параллельное выполнение операций погрузки и выгрузки. Использование такого способа учитывается в методических положениях.

Что касается способа выгрузки, то, принимая во внимание сложившиеся в настоящее время технические и внешнеэкономические условия, связанные с закупкой, разработкой и производством конструкций вагоноопрокидывателей (для выгрузки 8-осных полувагонов), в расчетах следует учитывать использование грейферной выгрузки.

Таким образом, при выполнении технико-экономических расчетов эффективности использования 8-осных полувагонов для перевозки угля целесообразно учитывать следующую технологию работы ПНП:

- параллельную бункерную погрузку;
- параллельное выполнение выгрузки с использованием грейферов.

Рекомендуемые значения величин  $(t_8^{погр} + t_8^{выгр})$  — для 8-осных полувагонов и  $(t_4^{погр} + t_4^{выгр})$  — для 4-осных полувагонов представлены в табл. 6.

При определении значений  $t_8^{д.гр}$  и  $t_8^{д.пор}$  (9) наиболее точным способом является построение для каждого направления следования корреспонденций угля графиков движения поездов с прокладкой специализированных ниток для кольцевых маршрутов из груженых и порожних полувагонов.

Для укрупненных расчетов на перспективу возможно использование некоторых средних прогнозных значений маршрутной скорости с определением времени следования кольцевых маршрутов между станциями погрузки/выгрузки по выбранным направлениям следования корреспонденций угольных грузопотоков:

$$t_8^{д.гр} + t_8^{д.пор} = \frac{24 \cdot 2L_8}{V_{м8}}, \quad (13)$$

где  $L_8$  — длина выбранного направления следования корреспонденций грузопотоков угля, км;  $V_{м8}$  — маршрутная скорость поездов из 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов, км/сут (прогнозное значение).

Таким образом, определены все составляющие в (9) для расчета оборота вагонов, что позволяет использовать полученные значения в (8) для расчета

величины исправного парка вагонов. При расчете потребного инвентарного парка вагонов (7) доля вагонов, находящихся в отцепочном и капитальном ремонте, принимается равной  $(\alpha_{p8}^{отп} + \alpha_{p8}^{кан}) = 0,02$ .

Это значение принято на основании следующих данных. Доля грузовых вагонов, находящихся в ремонте, составляет в настоящее время 3,4%. Для инновационных вагонов нормативный межремонтный пробег увеличивается примерно в 1,8 раза по сравнению с вагонами действующего парка, поэтому можно ожидать, что доля инновационных 8-осных полувагонов, находящихся в ремонте, составит  $3,4/1,8 \approx 2\%$ .

Это же значение принимается для инновационных 4-осных полувагонов с нагрузкой 25 и 27 т/ось.

**Определение потребного инвентарного парка магистральных локомотивов.** На каждом выбранном направлении следования кольцевых маршрутов из 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов инвентарный парк магистральных локомотивов для вождения кольцевых маршрутов определяется в общем виде (с учетом [11]) по формуле

$$M_{ис} = \sum_{j=1}^z K_{эj} K_{э8j} K_{эпj} \left( \frac{1 + \alpha_{эпj}}{1 - \beta_{эпj}} \right) + \sum_{j=1}^z K_{тj} K_{т8j} K_{тпj} \left( \frac{1 + \alpha_{тпj}}{1 - \beta_{тпj}} \right), \text{секций} \quad (14)$$

где  $\sum_{j=1}^z$  — распространяется на все участки выбранного направления следования кольцевых маршрутов из 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов, обслуживаемые электрической тягой;  $\sum_{j=1}^z$  — то же, обслуживаемые тепловозной тягой;  $j$  — множество участков обращения локомотивов (УОЛ) — всего  $z$ , с электрической и тепловозной тягой на выбранном направлении следования;  $K_{эj}$ ,  $K_{тj}$  — коэффициенты, учитывающие кратность тяги кольцевых маршрутов, на УОЛ с электрической и тепловозной тягой соответственно;  $K_{э8j}$ ,  $K_{т8j}$  — количество ежесуточно следующих кольцевых маршрутов из 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов на участках с электрической и тепловозной тягой соответственно, маршрутов/сут;  $K_{эпj}$ ,  $K_{тпj}$  — коэффициент потребности эксплуатационного парка локомотивов (электровозов, тепловозов) на пару поездов (кольцевых маршрутов) на  $j$ -м УОЛ;  $\alpha_{эпj}$ ,  $\alpha_{тпj}$  — доля увеличения парка исправных локомотивов (электровозов, тепловозов), связанная с посуточной неравномерностью следования кольцевых маршрутов из 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов на  $j$ -м УОЛ;  $\beta_{эпj}$ ,  $\beta_{тпj}$  — доля парка неисправных локомотивов (электровозов, тепловозов) с учетом нахождения в процессе перемещения на ремонтные заводы и в депо.

Величину  $M_{ис}$  округляют в большую сторону до числа, кратного  $K_{эj}$  и/или  $K_{тj}$ .

Таблица 6

Рекомендуемые численные значения величин  $(I_8^{погр} + I_8^{выгр})$ ,  $(I_4^{погр} + I_4^{выгр})$  по вариантам технико-экономических расчетов

Table 6

Recommended numerical values  $(I_8^{погр} + I_8^{выгр})$ ,  $(I_4^{погр} + I_4^{выгр})$  according to the options for technical and economic calculations

Варианты технико-экономических расчетов		Значения $(I_8^{погр} + I_8^{выгр})$ , $(I_4^{погр} + I_4^{выгр})$ , ч
Вид тяги	Тип вагона	
Электровозная	4-осный, 25 т/ось	47,2
	4-осный, 27 т/ось	46,9
	8-осный	39,1
Тепловозная	4-осный, 25 т/ось	47,2
	4-осный, 27 т/ось	46,2
	8-осный	39,1

Составляющие формулы (14) определяются следующим образом.

На Транссибе и БАМ для вождения кольцевых маршрутов из 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов предусматривается использовать электровозы типа ЭС5К и тепловозы типа ТЭ25К2М, состоящие из расчетного числа секций. Те же локомотивы используются для вождения маршрутов из 4-осных (25 т/ось) полувагонов с меньшим количеством секций. Соответственно, количество секций может быть равно 3 или 4, т. е. это локомотивы 3ЭС5К, 4ЭС5К, 3ТЭ25К2М, 2ТЭ25К2М + 2ТЭ25К2М. При определении количества локомотивных бригад необходимо учитывать использование распределенной тяги. В зависимости от количества секций значения коэффициентов  $K_{эj}$  и  $K_{тj}$  равны 3 или 4.

Значения количества кольцевых маршрутов для различных годовых грузопотоков определяются на основании данных табл. 4. При этом имеет место равенство количества кольцевых маршрутов при электровозной и тепловозной тяге.

Величина коэффициентов  $K_{эпj}$  и  $K_{тпj}$  определяется по формуле (для  $K_{тпj}$  аналогично) с округлением до целого числа в большую сторону (локомотивов без учета количества секций):

$$K_{эпj} = \frac{1}{24} \left( 24 \frac{2L_j}{V_{mj}} + t'_{обj} + t''_{обj} \right), \quad (15)$$

где  $L_j$  — длина УОЛ, км;  $V_{mj}$  — маршрутная скорость кольцевых маршрутов из 8-осных полувагонов на  $j$ -м УОЛ, км/сут (прогнозируемая или определенная на основе построения графика);  $t'_{обj}$ ,  $t''_{обj}$  — время нахождения локомотивов, следующих с кольцевыми

маршрутами, на станциях, ограничивающих УОЛ (станциях оборота магистральных локомотивов), ч.

Значения  $t'_{обj}$  и  $t''_{обj}$  (обозначим  $t_{обj}$ ) определяются следующим образом:

$$t_{обj} = t_{тех.обj} + \rho_j t_{тоj} + t_{ожj}, \quad (16)$$

где  $t_{тех.обj}$  — норма времени на технологические операции при нахождении магистрального локомотива на станции оборота без учета времени на ТО-2 и экипировку, ч;  $\rho_j$  — доля магистральных локомотивов, заходящих на ТО-2 и экипировку;  $t_{тоj}$  — среднее время, необходимое для ТО-2 и экипировки, ч;  $t_{ожj}$  — среднее время ожидания отправления в пункте оборота, ч.

В формуле (16) значение  $t_{тех.обj}$  принимается на основе технологических графиков выполнения операций с магистральными локомотивами на станциях оборота. При отсутствии таких данных  $t_{тех.обj} = 1,0$  ч.

На основании опыта обращения инновационных локомотивов на удлиненных УОЛ будет целесообразна следующая схема оборота магистральных локомотивов (см. рисунок).

Здесь на станции оборота А выполняется ТО-2, а по станции Б локомотивы следуют «с оборота». Тогда доля локомотивов, заходящих на ТО-2 и экипировку, в среднем по обеим станциям оборота  $\rho_j = 0,5$ . Значение  $t_{тоj}$  (16) принимается по нормативным документам или из технической документации на используемые локомотивы, а при отсутствии таких данных  $t_{тоj} = 1,5$  ч. Значение  $t_{ожj}$  принимается на основе построения графика движения и графиков оборота локомотивов на  $j$ -м участке. При отсутствии таких данных  $t_{ожj} = 1,5$  ч.

Значения  $\alpha_{эpj}$  ( $\alpha_{тпj}$ ) и  $\beta_{эпj}$  ( $\beta_{тпj}$ ) в формуле (14) принимаются следующим образом.

При определении доли парка исправных локомотивов, связанной с влиянием посуточной неравномерности, принимается во внимание, что кольцевые маршруты следуют по специализированным расписаниям, в суточном количестве которых уже учитывается возможное неравномерное суточное проявление грузопотока. Поэтому в данном случае при

значении  $\alpha_{эpj} \neq 0$  или  $\alpha_{тпj} \neq 0$  влияние посуточной неравномерности грузопотоков будет учитываться повторно, что неправильно. Для расчетов принимаем  $\alpha_{эpj} = \alpha_{тпj} = 0$ .

В (14) доля парка неисправных локомотивов (с учетом находящихся в процессе перемещения на заводы и в депо) в инвентарном парке для инновационных локомотивов принимается на основе нормативных значений коэффициента их технической готовности, равного  $(1 - \beta_{эпj})$  или  $(1 - \beta_{тпj})$ . При отсутствии таких данных принимаем  $\beta_{эпj} = 0,04$ ,  $\beta_{тпj} = 0,05$ .

При технико-экономической оценке эффективности использования 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов, по сравнению с исходным вариантом использования 4-осных (25 т/ось) полувагонов, необходимо оценить значение потребного количества секций локомотивов и при использовании только 4-осных (25 т/ось) полувагонов. Это значение определяется на основе следующей зависимости:

$$M_{и4,25} = \frac{M_{и8} \cdot Q_{и8}}{K_{э8} \cdot Q_{и4,25}} K_{э4,25}, \quad (17)$$

где  $K_{э8}$ ,  $K_{э4,25}$  — коэффициенты, учитывающие кратность тяги (в секциях) при эксплуатации 8- или 4-осных (27 т/ось) и 4-осных (25 т/ось) полувагонов соответственно;  $Q_{и8}$ ,  $Q_{и4,25}$  — масса поезда нетто из 8- или 4-осных (27 т/ось) и 4-осных (25 т/ось) полувагонов соответственно, т.

Расчетную величину  $M_{и4,25}$  округляют в большую сторону до числа, кратного  $K_{эj}$  и/или  $K_{тj}$ .

Например, определено, что  $M_{и8} = 120$  секций локомотивов;  $Q_{и8} = 6063$  т;  $Q_{и4,25} = 5396$  т;  $K_{э8} = 4$ ;  $K_{э4,25} = 3$ .

$$\text{Тогда } M_{и4,25} = \frac{120 \cdot 6063}{4 \cdot 5396} \cdot 3 = 102 \text{ секции локомотивов.}$$

Число 102 кратно  $K_{э4,25} = 3$ , поэтому величина  $M_{и4,25} = 102$  принимается окончательной.

**Прирост провозной способности.** Изменение провозной способности при переходе от обращения поездов, в том числе угольных маршрутов, только из 4-осных (25 т/ось) полувагонов к обращению угольных маршрутов из 4-осных (27 т/ось) или 8-осных полувагонов  $\Delta G_{4,8}$  включает в себя две составляющие [12]:

$$\Delta G_{4,8} = \Delta G_{Q8} + \Delta G_{N_{гр4,8}}, \text{ млн т/год}, \quad (18)$$

где  $\Delta G_{Q8}$  — изменение провозной способности за счет изменения массы поездов (угольных маршрутов) из 8-осных полувагонов нетто, млн т/год;  $\Delta G_{N_{гр4,8}}$  — изменение провозной способности за счет изменения общего количества обращающихся грузовых поездов из 4-осных (25 т/ось), а также 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов, млн т/год.



Рис. Схема оборота магистральных локомотивов:  
А, Б — станции оборота локомотивов

Fig. Diagram of turnover of main line locomotives:  
А, Б — locomotive turnover stations

В данной зависимости рассмотрен переход от 4-осных (25 т/ось) к 8-осным полувагонам. При переходе к 4-осным (27 т/ось) полувагонам эта зависимость сохраняется. Значение  $\Delta G_{08}$  определяется по формуле

$$\Delta G_{08} = \Delta G_1 K_{\text{гр}8}, \text{ млн т/год}, \quad (19)$$

где  $\Delta G_1$  — прирост провозной способности, приходящийся на один угольный маршрут из 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов, согласно табл. 7, млн т/год;  $K_{\text{гр}8}$  — суточное количество угольных маршрутов, состоящих из 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов, маршрутов/сут (см. табл. 4).

Значение  $\Delta G_{\text{Нгр}4,8}$  (формула 18) определяется по формуле

$$\Delta G_{\text{Нгр}4,8} = 365(N_{\text{гр}4,8} - N_{\text{гр}4,25}^{\text{исх}}) Q_{\text{н}4,25} 10^{-6}, \text{ млн т/год}, \quad (20)$$

где  $N_{\text{гр}4,8}$  — пропускная способность участка при обращении угольных маршрутов из 4-осных (25 т/ось) и 8-осных полувагонов, поездов/сут;  $N_{\text{гр}4,25}^{\text{исх}}$  — исходная пропускная способность при обращении по участку угольных маршрутов только из 4-осных полувагонов (25 т/ось), поездов/сут.

Для определения значения  $\Delta G_{\text{Нгр}4,8}$  принимается, что количество маршрутов из 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов является постоянным, и они следуют по выделенным расписаниям. Общее же количество угольных маршрутов изменяется за счет различного количества угольных маршрутов, состоящих из 4-осных (25 т/ось) полувагонов.

При определении в формуле (20) фактического значения  $(N_{\text{гр}4,8} - N_{\text{гр}4,25}^{\text{исх}})$  необходимо также учитывать возможность проведения на участках обращения 8- и 4-осных (27 т/ось) полувагонов дополнительных мероприятий, связанных не только с усилением тяги, но и с усилением инфраструктуры. Поэтому значение  $\Delta G_{\text{Нгр}4,8}$  следует определять в двух вариантах:

1-й вариант (теоретический): при усилении тяги пропорционально повышению массы грузовых поездов брутто, состоящих из 8- или 4-осных (27 т/ось) полувагонов с сохранением перегонных времен хода, значений межпоездных и станционных интервалов (состояние инфраструктуры не изменяется);

2-й вариант (практический): при фактически достигнутом усилении тяги и с учетом дополнительно проведенных мероприятий по усилению инфраструктуры при переходе к обращению 8-осных или 4-осных (27 т/ось) полувагонов.

В 1-м варианте в формуле (18) при определении прироста перерабатывающей способности  $\Delta G_{4,8}$  составляющая  $\Delta G_{\text{Нгр}4,8} = 0$ .

Таблица 7

Прирост провозной способности при переходе от 4-осных (25 т/ось) к 8- или 4-осным (27 т/ось) полувагонам для одного маршрута  $\Delta Q_{\text{н}}$  и для одного маршрута за годовой период  $\Delta G_1$

Table 7

Growth in traffic-carrying capacity after the transition from 4-axle (25 t/axle) to 8- or 4-axle (27 t/axle) open-box wagons for one route  $\Delta Q_{\text{н}}$  and for one route for an annual period  $\Delta G_1$

Тип вагона	Вид тяги	Прирост провозной способности	
		$\Delta Q_{\text{н}}$ , т (см. табл. 3)	$\Delta G_1$ , млн т/год
8-осный глухонный	Электровозная	1231	0,45
	Тепловозная	1231	0,45
8-осный с люками	Электровозная	1208	0,44
	Тепловозная	1208	0,44
4-осный (27 т/ось)	Электровозная	331	0,12
	Тепловозная	248	0,09

**Заключение.** При оценке технико-экономической эффективности новых вагонов с повышенной осевой и погонной нагрузкой необходимо иметь данные об изменении значения основных параметров организации перевозочного процесса.

Разработанные методические положения могут быть использованы при определении численных значений таких основных параметров, как потребный инвентарный парк вагонов, наличный парк локомотивов и прирост провозной способности направлений, выбранных для обращения новых вагонов.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Богданов В. М. Использование габаритных возможностей сети для повышения провозной способности // Увеличение габаритов и повышение погонных нагрузок грузовых вагонов: сб. науч. тр. / под ред. В. М. Богданова. М.: Транспорт, 1983. С. 4–14. (Труды «ВНИИЖТ»; вып. 660).
2. Грузовые вагоны железнодорожной колеи 1520 мм: альбом-справочник: 002И-2009 ПКБ ЦВ / ПКБ ЦВ ОАО «РЖД». М., 2009. 727 с.
3. Грановская Г. А., Мурзин Р. В., Сулов О. А. Оценка эффективности эксплуатации грузовых вагонов с улучшенными техническими характеристиками для ОАО «РЖД» на основе проведения испытаний // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2017. Т. 76, № 4. С. 209–216. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-4-209-216>.
4. Москаленко М. А., Друзь И. Б., Москаленко А. Д. Устройство и оборудование транспортных средств: учеб. пособие. 2-е изд., испр. СПб.: Лань, 2022. 240 с.
5. Временные указания по разработке единых технологических процессов работы подъездных путей и станций примыкания [Электронный ресурс]: утв. МПС СССР 26 декабря 1983 г. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 20.05.2022).

6. Сотников Е. А. Интенсификация работы сортировочных станций. М.: Транспорт, 1979. 239 с.

7. Нормы времени на маневровые работы, выполняемые на железнодорожных станциях ОАО «РЖД», нормативы численности бригад маневровых локомотивов: утв. ОАО «РЖД» 8 февраля 2007 г. М.: Техинформ, 2007. 100 с.

8. Об утверждении Порядка разработки и определения технологических сроков оборота вагонов и технологических норм погрузки грузов в вагоны и выгрузки грузов из вагонов [Электронный ресурс]: приказ МПС РФ от 29 сентября 2003 г. № 67. URL: <https://base.garant.ru> (дата обращения: 16.05.2022).

9. О Методике по разработке и определению технологических норм погрузки грузов в вагоны и выгрузки грузов из вагонов [Электронный ресурс]: приказ МПС РФ от 10 ноября 2003 г. № 70. URL: <https://base.garant.ru> (дата обращения: 16.05.2022).

10. Об утверждении Правил рассмотрения обращений юридических лиц или индивидуальных предпринимателей, владеющих на праве собственности или на ином праве железнодорожными путями необщего пользования, о примыкании строящихся, реконструируемых, восстановленных железнодорожных путей необщего пользования к инфраструктуре ОАО «РЖД» или развитию существующих примыканий [Электронный ресурс]: распоряжение ОАО «РЖД» от 24 ноября 2021 г. № 2571/р. URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 20.05.2022).

11. Апатцев В. И., Некрашевич В. И. Управление эксплуатацией локомотивов. 3-е изд. М.: МГУПС, 2014. 340 с.

12. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте: учеб. для вузов / П. С. Грунтов [и др.] / под ред. П. С. Грунтова. М.: Транспорт, 1994. 542 с.

## REFERENCES

1. Bogdanov V. M. Ispol'zovanie gabaritnykh vozmozhnostey seti dlya povysheniya provoznoy sposobnosti [Using the overall network capabilities to increase the carrying capacity]. Uvelichenie gabaritov i povyshenie pogonnykh nagruzok gruzovykh vagonov [Increasing the dimensions and linear loads of freight cars]. Coll. papers, ed. by V. M. Bogdanov. Moscow: Transport Publ.; 1983. P. 4–14. (Proceedings of VNIIZhT; issue 660). (In Russ.).

2. Gruzovye vagony zheleznodorozhnoy kolei 1520 mm: al'bom-spravochnik: 002I-2009 PKB TsV [Freight wagons of the 1520 mm railway gauge: reference album: 002I-2009 PKB TsV]. Moscow; 2009. 727 p. (In Russ.).

3. Granovskaya G. A., Murzin R. V., Suslov O. A. Otsenka effektivnosti ekspluatatsii gruzovykh vagonov s uluchshennymi tekhnicheskimi kharakteristikami dlya ОАО «RZhD» na osnove provedeniya ispytaniy [Performance evaluation of operating freight cars with improved technical characteristics for JSC “Russian Railways” on the testing basis]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 2017;76(4):209-216. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-4-209-216>. (In Russ.).

4. Moskalenko M. A., Druz' I. B., Moskalenko A. D. Ustroystvo i oborudovanie transportnykh sredstv [Design and equipment of vehicles]. Textbook. 2nd ed. St. Petersburg: Lan' Publ.; 2022. 240 p. (In Russ.).

5. Vremennyye ukazaniya po razrabotke edinykh tekhnologicheskikh protsessov raboty pod"ezdnykh putey i stantsiy primykaniya [Temporary instructions for the development of unified technological processes for the operation of access roads and junction stations]. Approved by Ministry of Railways of the USSR dated December 26, 1983. URL: <http://www.consultant.ru> (access date: 20.05.2022). (In Russ.).

6. Sotnikov E. A. Intensifikatsiya raboty sortirovochnykh stantsiy [Intensification of marshalling yards]. Moscow: Transport Publ.; 1979. 239 p. (In Russ.).

7. Normy vremeni na manevrovyye raboty, vypolnyaemye na zheleznodorozhnykh stantsiyakh ОАО «RZhD», normativy chislenosti brigad

manevrovyykh lokomotivov [Time standards for shunting work performed at railway stations of Russian Railways, standards for the number of teams of shunting locomotives]. Approved by Russian Railways dated February 8, 2007. Moscow: Tekhinform Publ.; 2007. 100 p. (In Russ.).

8. Ob utverzhdenii Poryadka razrabotki i opredeleniya tekhnologicheskikh srokov oborota vagonov i vygruzki gruzov iz vagonov [On approval of the procedure for the development and determination of technological terms for the turnover of wagons and technological norms for loading goods into wagons and unloading goods from wagons]. Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation dated September 29, 2003 No. 67. URL: <https://base.garant.ru> (access date: 16.05.2022). (In Russ.).

9. O Metodike po razrabotke i opredeleniyu tekhnologicheskikh norm pogruzki gruzov v vagony i vygruzki gruzov iz vagonov [On the Methodology for the development and determination of technological standards for loading goods into wagons and unloading goods from wagons]. Order of the Ministry of Railways of the Russian Federation dated November 10, 2003 No. 70. URL: <https://base.garant.ru> (access date: 16.05.2022). (In Russ.).

10. Ob utverzhdenii Pravil rassmotreniya obrashcheniy yuridicheskikh lits ili individual'nykh predprinimateley, vladeyushchikh na prave sobstvennosti ili na inom prave zheleznodorozhnyimi putyami neobshchego pol'zovaniya, o primykaniy stroyashchikhsya, rekonstruiemykh, vosstanovlennykh zheleznodorozhnykh putey neobshchego pol'zovaniya k infrastrukture ОАО «RZhD» ili razvitiyu sushchestvuyushchikh primykaniy [On Approval of the Rules for Considering Appeals from Legal Entities or Individual Entrepreneurs Owning Non-Public Railroad Tracks on the Right of Ownership or on Other Rights, on the Adjacency of Non-Public Railroad Tracks Under Construction, Reconstruction, and Rehabilitation to the Infrastructure of Russian Railways Company dated November 24, 2021 No. 2571/r. URL: <http://www.consultant.ru> (access date: 20.05.2022). (In Russ.).

11. Apatsev V. I., Nekrashevich V. I. Upravlenie ekspluatatsiyey lokomotivov [Management of operation of locomotives]. 3rd ed. Moscow: MGUPS Publ; 2014. 340 p. (In Russ.).

12. Gruntov P. S., Kochnev F. P., D'yakov Yu. V. et al. Upravlenie ekspluatatsionnoy rabotoy i kachestvom perevozok na zheleznodorozhnom transporte [Management of operational work and the quality of transportation in railway transport]. Moscow: Transport Publ.; 1994. 542 p. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Михаил Иванович МЕХЕДОВ,

канд. техн. наук, заместитель генерального директора, директор научного центра «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1019989, <https://orcid.org/0000-0002-8174-214X>

### Евгений Александрович СОТНИКОВ,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, начальник отдела, научный центр «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 493861, <https://orcid.org/0000-0003-0852-993X>

### Павел Сергеевич ХОЛОДНЯК,

начальник отдела, научный центр «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 951876, <https://orcid.org/0000-0002-5469-7419>

**Алексей Александрович КАПЫРИН,**

главный технолог, научный центр «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1137770, <https://orcid.org/0000-0002-5086-8954>

**Наталья Владимировна КОРНИЕНКО,**

ведущий технолог, научный центр «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1080941, <https://orcid.org/0000-0002-1375-2071>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Mikhail I. MEKHEDOV,**

Cand. of Sci. (Engineering), Deputy General Director, Director of the Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1019989, <https://orcid.org/0000-0002-8174-214X>

**Evgeniy A. SOTNIKOV,**

Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher, Head of Department, Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 493861, <https://orcid.org/0000-0003-0852-993X>

**Pavel S. KHOLODNYAK,**

Head of Department, Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 951876, <https://orcid.org/0000-0002-5469-7419>

**Aleksey A. KAPYRIN,**

Chief Technologist, Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1137770, <https://orcid.org/0000-0002-5086-8954>

**Natalya V. KORNIENKO,**

Leading Technologist, Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Research Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1080941, <https://orcid.org/0000-0002-1375-2071>

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Михаил Иванович МЕХЕДОВ.** Формирование направления исследования, формулировка цели и задач, обозначение алгоритма исследования (20%).

**Евгений Александрович СОТНИКОВ.** Выполнение расчетов по определению инвентарного парка вагонов, потребного инвентарного парка магистральных локомотивов, оценка численных значений параметров изменения условий организации перевозочного процесса при внедрении вагонов с повышенной осевой и погонной нагрузкой применительно к использованию новых 8- или 4-осных (27 т/ось) (20%).

**Павел Сергеевич ХОЛОДНЯК.** Формирование исходных данных и описание условий для разработки методических положений, выводы (20%).

**Алексей Александрович КАПЫРИН.** Определение прироста провозной способности при переходе от обращения поездов, в том числе угольных маршрутов, только из 4-осных (25 т/ось) вагонов к обращению угольных маршрутов из 4-осных (27 т/ось) или 8-осных полувагонов (20%).

**Наталья Владимировна КОРНИЕНКО.** Подготовка и описание исходных данных для выполнения расчета по определению времени оборота вагонов с учетом выполнения всех технологических операций на станциях примыкания ОАО «РЖД» и железнодорожных путей необщего пользования при погрузке и выгрузке угля, выполнение расчета, проведение сравнительного анализа полученных результатов (20%).

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Mikhail I. MEKHEDOV.** Formation of the direction of research, formulation of goals and objectives, designation of the research algorithm (20%).

**Evgeniy A. SOTNIKOV.** Performing calculations to determine the size of the fleet of cars, the required inventory fleet of main line locomotives, assessing the numerical values of the parameters for changing the conditions for organising the transportation process when introducing cars with increased axial and linear loads in relation to the use of new 8- or 4-axle (27 t/axle) open-box wagons (20%).

**Pavel S. KHOLODNYAK.** Formation of initial data and description of the conditions for the development of methodological provisions, conclusions (20%).

**Aleksey A. KAPYRIN.** Estimation of the increase in traffic-carrying capacity during the transition from only 4-axle (25 t/axle) cars to 4-axle (27 t/axle) or 8-axle open-box wagons, including coal routes (20%).

**Natalya V. KORNIENKO.** Preparation and description of the initial data for performing the calculation to determine the turnaround time of the cars, taking into account the performance of all technological operations at the junction stations of Russian Railways and non-public railway when loading and unloading coal, performing the calculation, conducting a comparative analysis of the obtained results (20%).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The authors have read and approved the final manuscript.*

**Прозрачность финансовой деятельности:** авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

**Financial transparency:** the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 05.07.2022, рецензия от первого рецензента получена 26.07.2022, рецензия от второго рецензента получена 08.09.2022, принята к публикации 01.11.2022.

The article was submitted 05.07.2022, first review received 26.07.2022, second review received 08.09.2022, accepted for publication 01.11.2022.



АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ  
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Оригинальная статья

УДК 629.424:629.4.063.6

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-370-382

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



## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ УЧЕТА ТОПЛИВА ТЕПЛОВЗОВ

**К. М. Попов**

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Бортовые системы учета топлива тепловозов разных производителей отличаются как составом используемых датчиков, так и различным программным обеспечением для обработки данных регистрации. Это свидетельствует о том, что поиск путей повышения эффективности использования указанных систем в эксплуатации не завершен и является актуальной задачей.

**Материалы и методы.** В статье рассмотрены особенности определения расхода топлива по данным бортовых систем учета топлива тепловозов, связанные с различными способами определения моментов фиксации количества топлива в баке. Исследована возможность оценки влияния количества переключений позиций контроллера машиниста на показатели абсолютного и удельного расхода топлива.

**Результаты.** При отсутствии в составе бортовой системы датчика пути и скорости предлагается определять моменты фиксации количества топлива на основе анализа изменения сигналов датчиков уровня топлива по времени. Показан пример практической реализации данного решения. Также приведены результаты обработки данных бортовых систем, показывающие, что влияние наблюдаемого в рядовой эксплуатации маневровых тепловозов разброса количества переключений позиций контроллера на расход топлива сопоставимо с погрешностью определения этой величины по данным бортовых систем. Реализация в специализированном программном обеспечении, предназначенном для обработки данных бортовых систем, алгоритмов, позволяющих идентифицировать указанное влияние, актуальна только для случаев экстремальной (на порядок) разницы количеств переключений позиций контроллера в рабочих сменах.

**Обсуждение и заключение.** Эффективность практического использования информации от бортовых систем учета расходуемого тепловозом топлива во многом определяется качеством специализированного программного обеспечения. При разработке и совершенствовании программного обеспечения рекомендуется использовать рассмотренные в статье подходы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** тепловоз, бортовая система регистрации, датчик пути и скорости, количество топлива в баке, расход топлива, позиция контроллера машиниста

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

**Для цитирования:** Попов К. М. Некоторые вопросы практического использования бортовых систем учета топлива тепловозов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 4. С. 370–382. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-370-382>.



AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 629.424:629.4.063.6

DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-4-370-382

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



## PRACTICAL USE OF ON-BOARD FUEL METERING SYSTEMS OF DIESEL LOCOMOTIVES

**Kirill M. Popov**

Railway Research Institute,  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** On-board fuel metering systems for diesel locomotives created by different manufacturers differ both in the composition of the sensors used and in the software for processing the registration data. This indicates that the pursuit of better efficiency for these systems is still ongoing and is an urgent problem.

**Materials and methods.** The article discusses the problems of determining the fuel consumption according to the data of on-board fuel metering systems for diesel locomotives, associated with various methods for determining the moments of measuring the fuel amount in the tank. The possibility of estimating the influence of the number of position switches of the locomotive throttle on the indicators of absolute and specific fuel consumption has been studied.

**Results.** In the absence of distance and speed sensors in the on-board system, it is proposed to determine the moments of measurement of the fuel amount based on the analysis of changes in the signals of the fuel level sensors over time. The authors present an example of the practical implementation of this solution. The results of on-board systems data processing are also presented, showing that the effect of the spread in the number of throttle position switches observed in ordinary operation of diesel shunter on fuel consumption is comparable to the error in determining this value according to the on-board systems data. The implementation of algorithms in specialised software designed to process data from on-board systems that allow identifying the indicated influence is relevant only for cases of extreme (by an order of magnitude) difference in the number of switching throttle positions in work shifts.

**Discussion and conclusion.** The efficiency of the practical use of information from the on-board systems for metering fuel consumption of a diesel locomotive is largely determined by the quality of specialised software. When developing and improving software, it is recommended to use the approaches discussed in the article.

**KEYWORDS:** diesel locomotive, on-board registration system, distance and speed sensor, fuel amount in the tank, fuel consumption, locomotive throttle position

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

**For citation:** Popov K. M. Practical use of on-board fuel metering systems of diesel locomotives. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(4):370-382. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-370-382>.

**В**ведение. В настоящее время значительная часть парка маневровых и определенная часть магистральных тепловозов оборудована бортовыми системами учета топлива (БСУТ), выполненными на основе микропроцессорных комплексов регистрации [1]. Данные системы позволяют в автоматическом режиме вести учет количества топлива в баке, контролировать показатели работы силовой установки и вспомогательного оборудования, регистрировать эту информацию на съемном или встроенном модуле памяти, а также передавать ее в стационарный пункт обработки информации с помощью сети ROPC GSM.

Функциональность данных систем оговорена разработчиками в технических условиях на эти системы, а также достаточно широко исследована [2–6]. При этом в связи с предельно общими требованиями к программному обеспечению, применяемому для анализа регистрируемых БСУТ параметров, в нормативном документе [7], в ряде публикаций [8–11] вполне обоснованно уточняется как набор актуальных функций, так и конкретный порядок использования данных от БСУТ. Несмотря на то, что полезность и эффективность БСУТ в принципе не подвергается сомнениям, важным при их дальнейшем производстве и внедрении является оптимизация количества датчиков, а при эксплуатации — качественное использование тех функций, объективность и достоверность которых подтверждена на практике, в первую очередь независимыми от производителей исследователями.

В данной статье рассматриваются отдельные вопросы, связанные с обработкой данных, регистрируемых БСУТ.

**Определение количества топлива в баке при учете его расхода в эксплуатации.** Для реализации функции учета расхода топлива, помимо аппаратных средств на борту тепловоза, необходимо реализованное в центрах обработки данных от БСУТ специализированное программное обеспечение (СПО), позволяющее для каждой поездки или рабочей смены машиниста определить расход топлива, а также выявить (при их наличии) набор и/или так называемое снятие топлива (при использовании в эксплуатации тепловоза в качестве заправочного средства). На основе указанных данных об изменении количества топлива в баке возможно в том числе составление баланса как для каждого тепловоза, так и по парку в целом за выбранный для отчета период (табл. 1), что обеспечивает объективный, в отличие от вручную полученных показаний, технологический учет расхода топлива.

В существующей в настоящее время системе «Электронный маршрут машиниста» (ЭММ) данные о количестве топлива в баке тепловоза, оборудованного БСУТ, в начале и конце рабочей смены должны поступать в автоматическом режиме. Однако машинист,

контролирующий заполнение данных ЭММ, имеет право скорректировать их по своему усмотрению через электронный терминал самообслуживания. Это связано с тем, что при автоматической фиксации количества топлива в ЭММ возможны неточности, обусловленные в том числе и отсутствием в технических требованиях к БСУТ [7] описания порядка фиксации количества топлива в баке.

Отметим, что определение изменения количества топлива непосредственно на борту тепловоза (в дополнение к имеющейся функции отображения количества топлива в баке) в бортовом ПО крайне затруднено. Это связано как с учетом невозможности полноценного определения в таком ПО достоверности показаний топливных датчиков, так и с учетом рассматриваемых ниже особенностей.

Важным этапом обработки данных в СПО является выявление режимов движения и стоянки тепловоза. Это необходимо для фиксации количества топлива в определенные моменты времени с целью последующего определения его изменения. Известно, что при оборудовании тепловозов БСУТ практикуется установка в топливный бак двух датчиков по диагонали. Это позволяет учесть как продольный, так и поперечный наклон при положении тепловоза на уклонах и в кривых участках пути. Однако для правильного определения количества топлива в баке необходимо учитывать также его форму и связанные с ней ограничения по углу наклона [10]. Указанные особенности касаются статических измерений, т. е. при неподвижном тепловозе.

При движении тепловоза, особенно в моменты разгона и торможения, даже с учетом наличия перегородок в баке, темпы изменения уровня топлива в диагонально установленных датчиках за счет наложения продольных и поперечных волн могут заметно отличаться (рис. 1).

Очевидно, что определение текущего значения количества топлива в баке возможно только при стационарном положении поверхности топлива. Данное условие гарантировано спустя определенное время после остановки тепловоза и при его последующих стоянках.

В случае наличия в составе БСУТ специального датчика пути и скорости (далее — ДПС) (табл. 2) задача определения стоянок решается достаточно просто (рис. 2).

Однако подобный датчик значительно увеличивает стоимость самой системы, в том числе затраты при оборудовании тепловоза, и усложняет ее обслуживание. Поэтому отдельные производители БСУТ в процессе их производства заменили ДПС на приемник GPS/Глонасс, а другие использовали указанный приемник вместо ДПС с момента начала производства. Существует возможность использования сигнала от штатного ДПС систем безопасности (КЛУБ, КПД). Тем не менее не все эксплуатируемые тепло-

Таблица 1

Образец отчета с реализацией функции учета расхода топлива тепловозами депо за месяц

Table 1

Sample report with the implementation of the function of fuel consumption metering of the diesel locomotives of a depot for one month

№ п/п	Бортовой №	Время, ч				Расход топлива		Набор	Топливо в баке		Баланс «+» — неучтенный набор, «-» — неучтенный расход
		всего	зарегистриванное	работа дизеля		общий	не по назначению		в начале	в конце	
				с нагрузкой	на холостом ходу						
1	ЧМЭЗ-2154	671,64	619,53	164,74	432,2	11 236	0	12 931	2 390	4 083	-2
2	ЧМЭЗ-2437	1242,41	4,24	0,15	1,96	54	0	1 889	2 613	4 448	0
3	ЧМЭЗ-2879	675,08	675,08	174,19	475,45	14 406	0	13 842	3 952	3 380	-8
4	ЧМЭЗ-3357	672,14	632,23	192,61	417,29	7 147	0	9 177	1 755	-	-
5	ЧМЭЗ-3509	1381,46	176,55	30,84	111,29	1 848	0	0	3 778	1 934	4
6	ЧМЭЗ-3511	688,81	256,73	46,66	151,34	4 404	0	3 365	3 262	2 225	2
7	ЧМЭЗ-3529	669,06	548,40	116,19	408,55	8 948	0	9 264	2 117	2 464	31
8	ЧМЭЗ-3530	671,28	632,79	194,44	421,28	10 942	0	10 147	3 313	2 516	-2
9	ЧМЭЗ-3534	461,71	442,65	97,78	327,06	6 721	0	5 728	2 710	1 715	-2
10	ЧМЭЗ-3548	671,95	603,62	105,62	445,05	8 373	0	9 343	3 215	4 191	6
11	ЧМЭЗ-3551	671,78	671,78	157,08	501	9 556	0	9 711	2 426	2 595	14
12	ЧМЭЗ-3555	657,41	657,40	180,34	440,15	9 751	0	10 009	2 934	3 195	3
13	ЧМЭЗ-3612	521,42	507,32	92,66	352,58	7 540	0	7 390	3 694	3 591	47
14	ЧМЭЗ-3638	615,54	615,53	91,73	521,09	9 124	0	8 997	3 827	3 697	-3
15	ЧМЭЗ-3691	671,65	671,65	167,23	483,95	11 935	0	13 693	1 778	3 534	-2
16	ЧМЭЗ-3704	672,17	657,73	100,17	513,56	8 806	0	8 566	3 195	2 966	11
17	ЧМЭЗ-3771	127,82	11,75	1,08	4,48	70	0	0	3 505	3 451	16
18	ЧМЭЗ-3979	410,46	410,45	65,23	206,01	2 906	0	0	3 788	882	0
19	ЧМЭЗ-4740	672	672	188,44	478,04	9 287	0	9 983	3 549	4 245	0
20	ЧМЭЗ-4809	176,89	120,08	19,38	84,98	2 566	0	0	4 382	1 811	-5
21	ЧМЭЗ-4811	667,38	637,06	152,15	469,7	10 899	119	10 756	2 508	2 394	29
22	ЧМЭЗ-4812	629,15	561,75	136,68	384,72	9 972	0	8 393	3 214	1 645	10
Итого		14 299,21	10 786,32	2 475,39	7 631,73	166 491	119	163 184	67 905	60 962	197

возы оборудованы системами КЛУБ и КПД, и даже при их наличии не для всех БСУТ реализовано получение имеющегося в КЛУБ и КПД сигнала ДПС.

Приемник GPS/Глонасс во многих случаях обеспечивает стабильный и качественный прием сигнала от спутников, однако в зоне малых скоростей нередко имеет погрешности, из-за которых в отдельных случаях определить стоянку довольно затруднительно. Особенно это актуально для маневровых тепловозов, учитывая преимущественные режимы движения с малыми скоростями, а также возможность работы на участках, где прием сигналов спутников GPS/Глонасс затруднен. Основными причинами, вызывающими затруднения при определении стоянок по сигналу приемника GPS/Глонасс, являются:

- задержки в появлении сигнала после начала движения тепловоза с малыми скоростями (рис. 3, по раз-

ным расшифровкам данных зафиксированы задержки до 28 с);

- отсутствие сигнала по скорости при неуверенном приеме сигналов спутников (рис. 3);

- ложные значения скорости при гарантированной стоянке тепловоза (рис. 4).

Анализ ряда расшифровок данных БСУТ в сравнении с контрольными замерами показал, что моменты, при которых возможно фиксировать количество топлива в баке, допустимо определять по изменению сигналов датчиков уровня топлива в баке с учетом условия:

$$|h_{л_i} - h_{п_i}| - |h_{л_{i-1}} - h_{п_{i-1}}| < \Delta h, \quad (1)$$

где  $h_{л_i}$  и  $h_{л_{i-1}}$  — измеренный левым датчиком уровень топлива в баке в текущий и предыдущий момент времени;  $h_{п_i}$  и  $h_{п_{i-1}}$  — измеренный правым датчиком

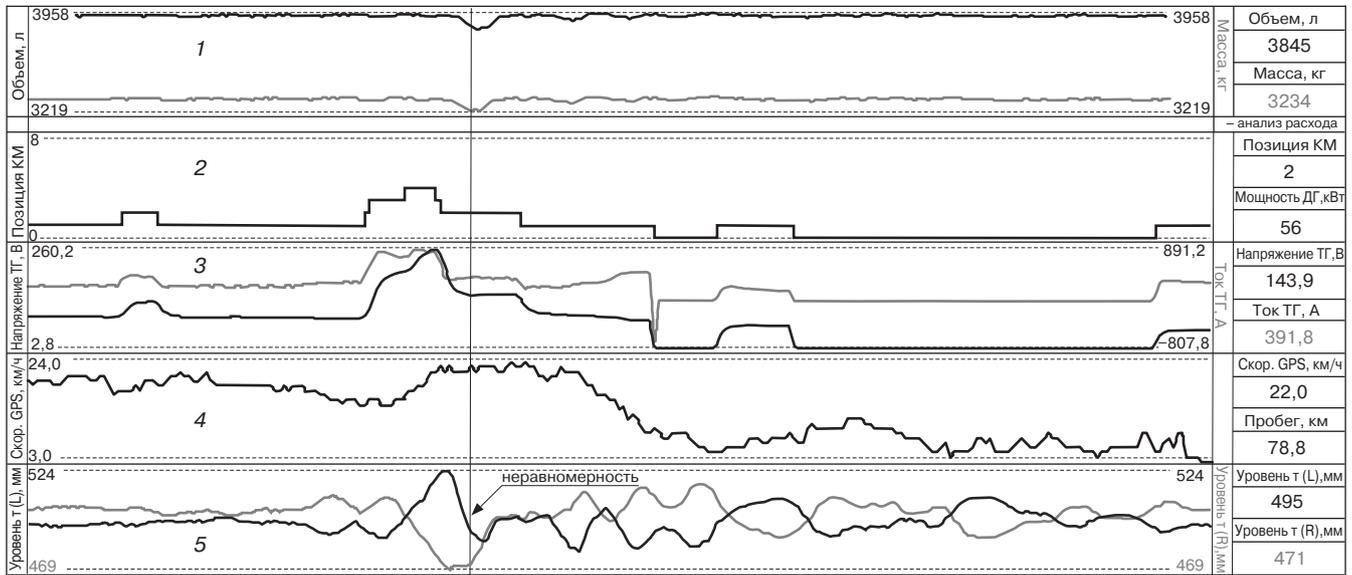


Рис. 1. Образец расшифровки данных БСУТ с указанием неравномерности изменений уровня топлива в левом и правом датчиках топлива при движении тепловоза:

1 — изменение объема и массы топлива; 2 — изменение позиции контроллера машиниста (КМ); 3 — изменение тока и напряжения тягового генератора (ТГ); 4 — изменение скорости движения; 5 — изменение уровня топлива

Fig. 1. Sample data decoding of the on-board fuel metering system, indicating the unevenness of changes in the fuel level in the left and right fuel sensors when the locomotive is moving:

1 — change in volume and mass of fuel; 2 — change in the position of the locomotive throttle (LT); 3 — change in current and voltage of the traction generator (TG); 4 — change in the movement speed; 5 — fuel level change

Таблица 2

Характеристики бортовых устройств учета расхода топлива тепловозами согласно документации производителей

Table 2

Characteristics of on-board fuel consumption metering devices for diesel locomotives according to manufacturers' documentation

Характеристика	Бортовое устройство			
	АПК «БОРТ»	РПРТ	АСК	АСК ВИС
Условия съема показаний по количеству топлива в баке	Не оговорено	Не оговорено	Не ранее 3 мин после полной остановки тепловоза при заглушенном дизеле	Не ранее 20 мин после полной остановки тепловоза при заглушенном дизеле
Наличие в составе системы ДПС, устанавливаемого на буксе колесной пары	Нет	Наличие определяется годом выпуска	Нет	Нет

уровень топлива в баке в текущий и предыдущий момент времени;  $\Delta h$  — допустимое изменение разности уровней топлива в баке, отличающее квазистационарный процесс от динамического.

В отличие от нередко используемой в практике разности полусумм уровней топлива по датчикам, характеризующей с ограничениями в соответствии с [10] изменение среднего уровня, изменение разностей по выражению (1) позволяет выявлять непосредственно неравномерность изменений уровня топлива в датчи-

ках, исключая при этом изменения уровня, связанные с расходом топлива.

Очевидно, что перед использованием условия (1) на основе ряда логических проверок сочетаний сигналов датчиков топлива, а также сигналов о режимах работы дизель-генераторной установки (ДГУ) определяется исправность каждого из датчиков топлива.

При несомненно справедливом замечании о важности учета особенностей конструкции и исполне-

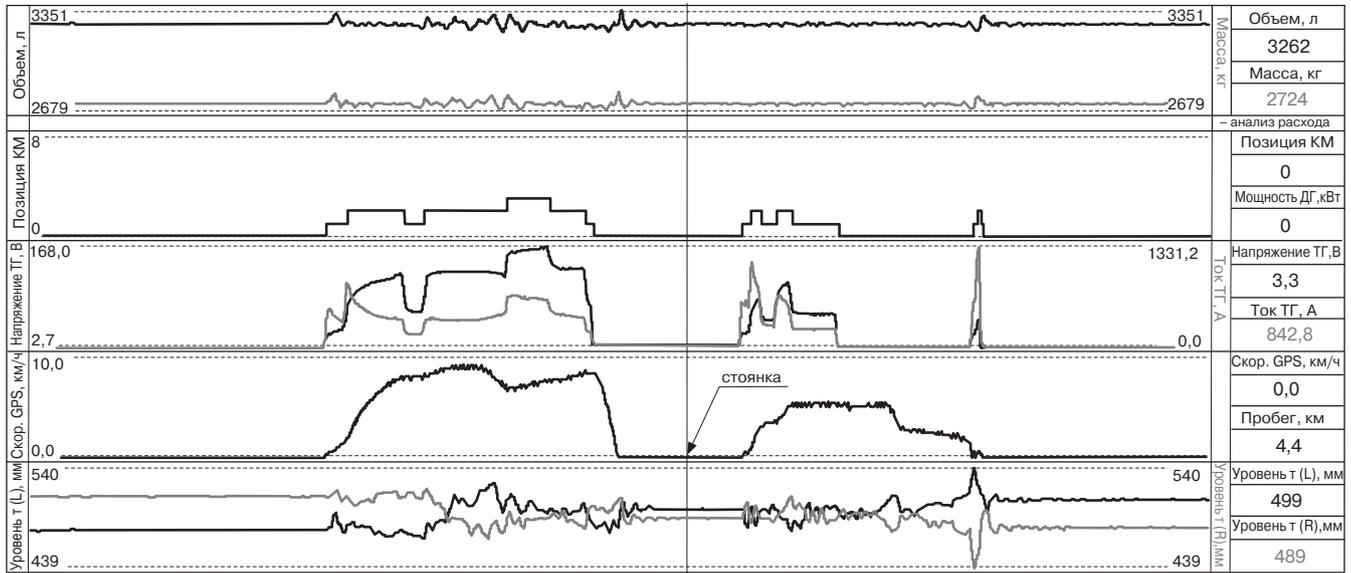


Рис. 2. Образец расшифровки данных БСУТ с указанием мест стоянок по показаниям ДПС

Fig. 2. Sample data decoding of the on-board fuel metering system with indication of parking places according to the indications of the distance and speed sensors

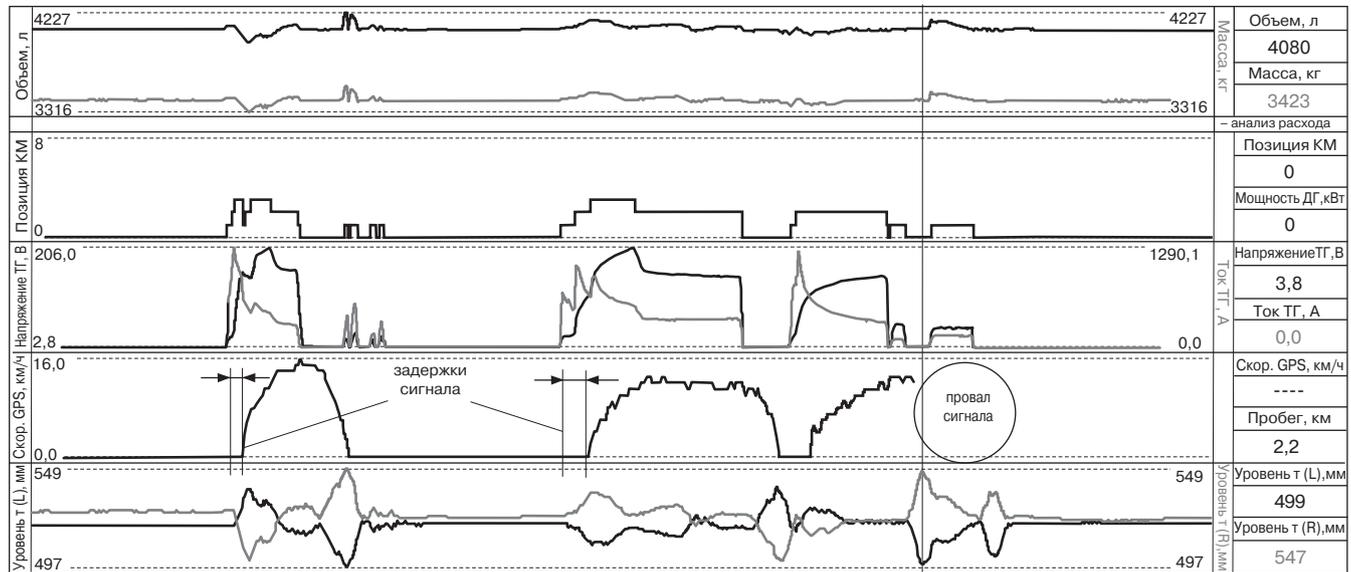


Рис. 3. Образец расшифровки данных БСУТ с указанием задержек и провалов сигнала по скорости от GPS

Fig. 3. Sample data decoding of the on-board fuel metering system indicating delays and signal dips in speed from GPS

ния каждого конкретного тепловоза [2] по результатам обработки данных регистрации системы РПРТ (КНГМ.421429.004 ТУ) удалось определить величину временного смещения двух точек фиксации значений уровня топлива, а также предельную величину изменения разности отклонений уровня по датчикам  $\Delta h$ , позволяющие использовать условие (1) в практических целях.

Отметим, что при использовании условия (1) в СПО определение количества топлива в баке также возможно при движении тепловоза в течение длительного времени с равномерной скоростью на выезде. В отдельных случаях это повышает оперативность контроля и функциональность данных БСУТ.

На конкретном примере покажем работу условия (1). Из рис. 5 видно, что сигнал по скорости в БСУТ

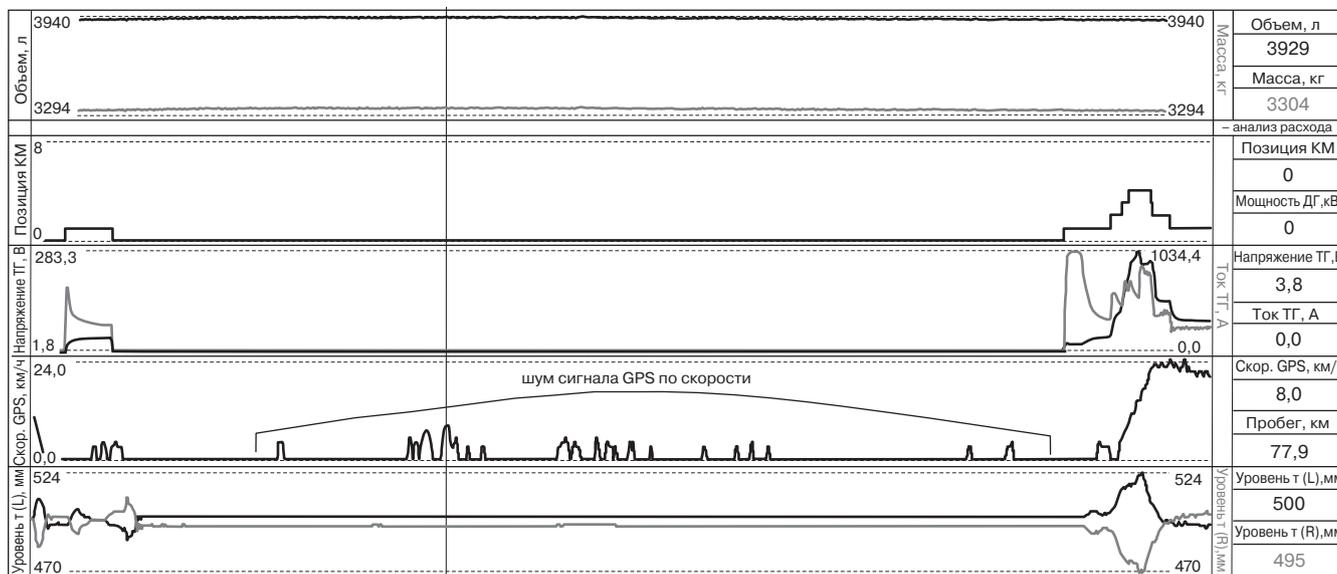


Рис. 4. Образец расшифровки данных БСУТ с указанием шума сигнала по скорости от GPS при неподвижном тепловозе

Fig. 4. Sample data decoding of the on-board fuel metering system indicating signal noise by speed from GPS with a stationary locomotive

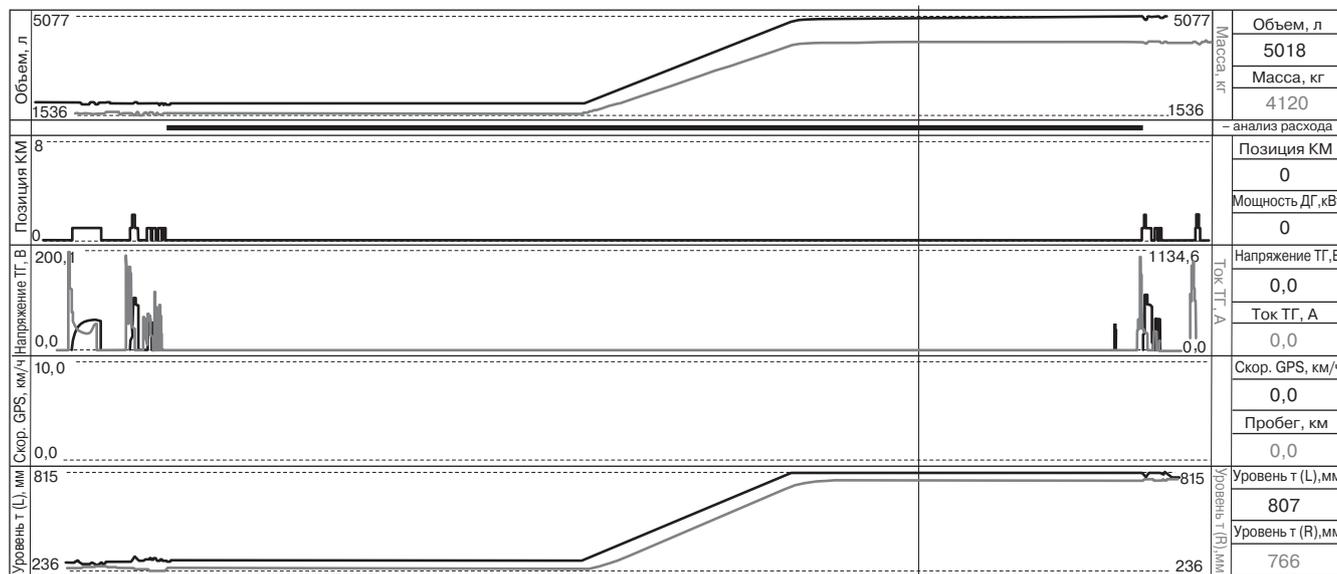


Рис. 5. Образец расшифровки данных БСУТ с указанием времени фиксации в СПО набора топлива в бак тепловоза

Fig. 5. Sample data decoding of the on-board fuel metering system indicating the time of refuelling of a locomotive in specialised software

отсутствует. Линией под графиками изменения объема и массы топлива выделен диапазон времени, в течение которого в программе был определен набор топлива.

На рис. 6 приведены места фиксации начала и окончания набора топлива в более крупном масштабе.

Аналогично условие (1) используется для определения количества топлива в начале и конце поездки или рабочей смены машиниста и при необходимости при других стоянках.

Отдельно отметим, что для БСУТ, в которых присутствует сигнал ДПС, оценка разности изменений уровня топлива по условию (1) при гаранти-

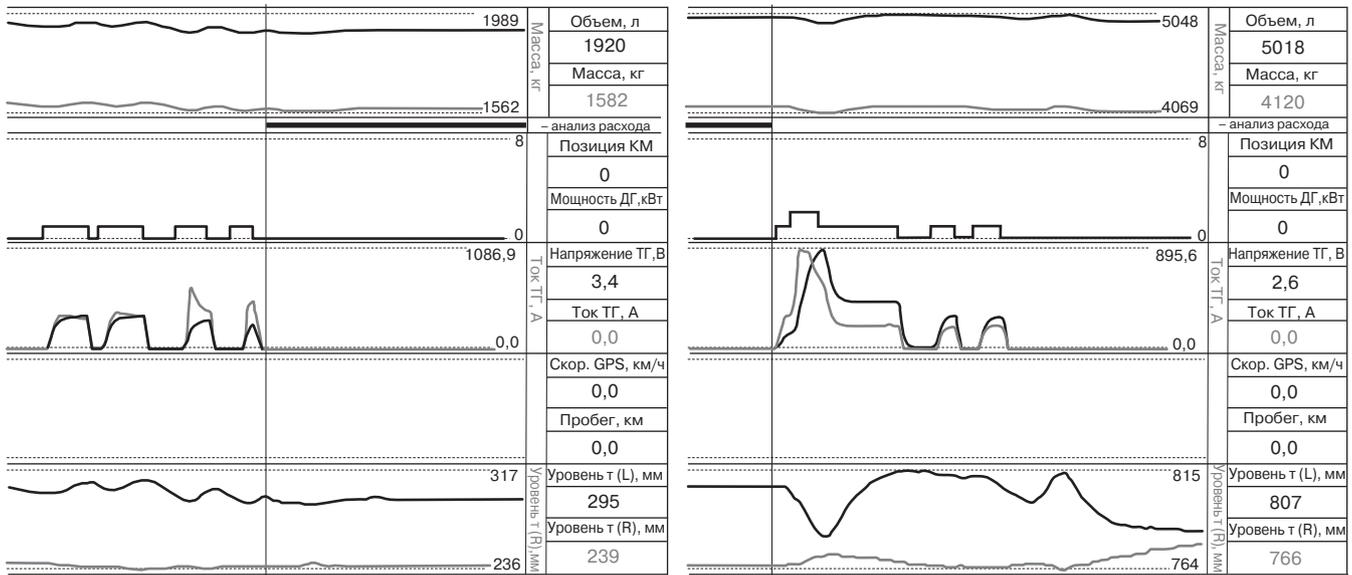


Рис. 6. Отметки фиксации начала и окончания набора топлива (укрупненно)

Fig. 6. Marks for fixing the beginning and end of refuelling (enlarged)

рованном движении тепловоза позволяет выявить ряд неисправностей в каналах измерения уровня топлива.

**Оценка влияния количества переключений позиций контроллера машиниста на расход топлива при маневровой работе.** При оценке эффективности использования маневрового тепловоза, помимо показателей его загрузки [12], важным является эффективность расходования топлива. Последняя, в свою очередь, определяется как техническим состоянием ДГУ на преимущественных для маневровой работы режимах [13] и качеством ее настройки [14, 15], так и количеством и продолжительностью переходных режимов нагружения ДГУ. Известно [2, 16–18], что ДГУ маневрового тепловоза под нагрузкой крайне мало работает в установившихся режимах. Это связано с необходимостью частого изменения позиции контроллера и скачкообразными увеличениями или уменьшениями нагрузки.

В указанных публикациях характеристикой переходных режимов нагружения является количество изменений машинистом позиций контроллера (ПК). Например, в [14] отмечено, что частота переключения ПК машиниста составляет 4–6 раз в минуту, в [18] указано, что среднее для всех видов маневров количество переключений ПК составило 35 раз за час работы тепловоза. В [17] приведена оценка влияния количества переключений ПК на удельный расход топлива: при 4–5 переключениях в минуту увеличение расхода оценено в 14,7% по сравнению с паспортным значением. Оценка изменения абсолютного расхода топлива

в [17] показана для конкретного случая: увеличение частоты переключения ПК с 2,3 до 22,4 раза в минуту привело к перерасходу топлива на 65 кг за смену работы машиниста.

Очевидно, что, несмотря на существенное различие в загрузке ДГУ при разных видах маневровой работы, как абсолютное, так и удельное количество переключений ПК зависит и от машиниста. При наличии на тепловозе БСУТ отслеживание количества указанных переключений ПК вполне возможно. Однако насколько возможно по данным БСУТ более актуальное для практики выявление и отслеживание связи этого параметра с расходом топлива в настоящий момент не определено.

По аналогии с данными в [17] (подчеркнем, что для их получения были проведены специальные испытания) приведем результаты, полученные с помощью БСУТ в рядовой эксплуатации, по количеству переключений ПК (с практическим разбросом данных) и абсолютному расходу топлива. В табл. 3 и 4 приведены результаты обработки данных БСУТ тепловоза ЧМЭ3-2614 при его эксплуатации на двух разных участках маневровой работы, включающие количество переключений ПК за смену (на километр общего пробега за смену и на минуту времени нагрузки) и расхода топлива за смену работы машиниста, при близких условиях выполнения работы. В качестве характеристики этих условий в табл. 3 и 4 для отобранных пар рабочих смен приведены значения относительного времени работы под нагрузкой и фактического пробега по данным ДПС.

Таблица 3

**Результаты обработки данных БСУТ на участке маневровой работы «МЛРЗ», станция Перово**

Table 3

**Results of data processing of the on-board fuel metering system at the Moscow Locomotive Repair Plant shunting operation site, Perovo station**

Дата смены, машинист	Доля времени работы под нагрузкой, %	Пробег, км	Количество переключений ПК		Расход топлива, кг
			на 1 км	за 1 мин	
22/23 января, машинист А	21	17,7	77,9	9,5	136
24/25 января, машинист Б	22	16,7	57,4	6,3	128
Разность			20,5	3,2	8
23 января, машинист Б	25	23,4	63,5	8,6	167
26 января, машинист Б	26	24,1	50,4	6,8	146
Разность			13,1	1,8	21

Таблица 4

**Результаты обработки данных БСУТ на участке маневровой работы «Москва-Товарная», станция Сокольники**

Table 4

**Results of data processing of the on-board fuel metering system at the Moscow-Tovarnaya shunting operation site, Sokolniki station**

Дата смены, машинист	Доля времени работы под нагрузкой, %	Пробег, км	Количество переключений ПК		Расход топлива, кг
			на 1 км	за 1 мин	
21/22 ноября, машинист В	35	64,5	43,6	11,6	190
26/27 ноября, машинист Д	35	63	35,1	9,1	169
Разность			8,5	2,5	21
22/23 декабря, машинист В	36	57,7	54,7	12,7	200
28/29 ноября, машинист Е	37	53,7	39,1	8,2	181
Разность			15,6	4,5	19

Согласно [11] среднеквадратичное значение случайной ошибки измерения общего расхода топлива за смену в БСУТ оценивается на уровне 13 кг, что для маневровой работы составляет 5–10 % от обще-

го расхода. Видно, что имеющаяся в табл. 3 и 4 разность значений абсолютного расхода топлива сопоставима с указанной погрешностью определения этой величины в БСУТ. Кроме того, выборочная проверка не может гарантированно свидетельствовать о связи расхода топлива именно с интенсивностью переключений ПК. Однако результаты выборки за 70 смен работы тепловоза ЧМЭ3-2614 подтверждают практически отсутствие этой связи (рис. 7).

Это связано с тем, что изменение расхода топлива определяется не только интенсивностью переключения ПК, но и используемой мощностью ДГУ, для увеличения которой необходимо набрать соответствующую ПК. Поэтому для выявления степени влияния интенсивности переключений ПК на расход топлива должны сопоставляться рабочие смены с практически одинаковой средней реализованной мощностью ДГУ.

Получение соответствующей статистики требует довольно жесткого отбора данных, а значит, исследования значительного (несколько месяцев) периода времени. Соответственно, в данном случае не может идти речь об оперативной оценке.

Для понимания, возможна ли такая оценка в принципе за больший период, рассмотрим вопрос о степени влияния интенсивности переключения ПК на удельный эффективный расход топлива ДГУ. Помимо [17], сведения об указанном влиянии приведены в [19], где расчетное увеличение паспортного удельного расхода топлива (определенного для постоянных режимов нагружения ДГУ) от переменных режимов работы маневрового тепловоза предлагается учитывать коэффициентом корректировки, характеризующим темп набора и сброса мощности. Значение указанного коэффициента составляет 1,01–1,03. В [20] увеличение среднего удельного расхода в реальных переходных процессах по отношению к «идеальным» для магистральных тепловозов 2ТЭ116У оценено в 2,25 %.

На примере данных регистрации БСУТ за период в 6 месяцев по двум маневровым тепловозам ЧМЭ3 с бортовыми номерами 3412 и 3415 (табл. 5) рассмотрим средние значения удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  для групп рабочих смен, отличающихся количеством переключений ПК за минуту.

С учетом известной зависимости  $g_e$  от средней эффективной мощности  $P_e$ , имеющей круто меняющийся характер в зоне малых мощностей, на уровне которых в большинстве случаев и работает маневровый тепловоз, данные были отобраны так, чтобы среднее значение  $P_e$  отличалось не более чем на 5 кВт. При расшифровке данных БСУТ значение  $P_e$  было определено в соответствии с [5] с учетом имеющейся

информации о работе вспомогательного оборудования тепловоза.

С целью увеличения статистической выборки учитывалось распределение рабочих смен по среднему за смену значению  $P_e$  (рис. 8, 9).

Для тепловоза ЧМЭ3-3412 данные отобраны в диапазоне 90–95 кВт, в указанном диапазоне паспортное значение  $g_e$  не нормируется, но если экстраполировать заводскую характеристику [21], то расчетное изменение  $g_e$  в указанном диапазоне изменения  $P_e$  составляет 0,41%. Для тепловоза ЧМЭ3-3415 данные отобраны в диапазоне мощности 65–70 кВт, в этом диапазоне расчетное изменение  $g_e$  составляет 0,47%.

Из результатов, приведенных в табл. 5, видно, что разброс величины  $g_e$  внутри отобранных групп рабочих смен, характеризуемый среднеквадратичным

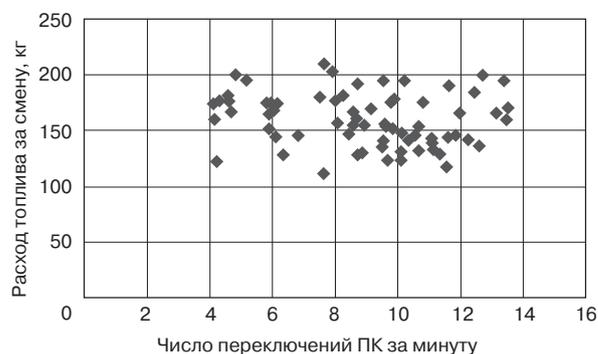


Рис. 7. Данные регистрации БСУТ тепловоза ЧМЭ3-2614 по 70 рабочим сменам

Fig. 7. Registration data of the on-board fuel metering system of a ChME3-2614 diesel locomotive for 70 work shifts

Таблица 5

Результаты обработки данных БСУТ за 6 месяцев

Table 5

Results of data processing of the on-board fuel metering system for 6 months

№ группы	Признаки отбора данных в группу	Число рабочих смен, ед.	Средний пробег, км	Среднее время нагрузки, %	Среднее количество переключений ПК		Средний расход топлива за смену, кг	Удельный эффективный расход топлива	
					ед.	на 1 км		среднее значение, кг/кВт·ч	среднеквадратичное отклонение, кг/кВт·ч
1	Тепловоз ЧМЭ3-3412 Средняя эффективная мощность дизеля, кВт, в диапазоне 90–95, число переключений ПК в минуту — не более 3	10	28,3	26,5	342	12,3	158	0,394	0,054
2	Тепловоз ЧМЭ3-3412 Средняя эффективная мощность дизеля, кВт, в диапазоне 90–95, число переключений ПК в минуту — более 3	17	29,7	18,9	512	20,4	143	0,409	0,041
							Разность	0,015	
3	Тепловоз ЧМЭ3-3415 Средняя эффективная мощность дизеля, кВт, в диапазоне 65–70, число переключений ПК в минуту — не более 3	17	29,3	25,9	330	11,6	144	0,416	0,079
4	Тепловоз ЧМЭ3-3415 Средняя эффективная мощность дизеля, кВт, в диапазоне 65–70, число переключений ПК в минуту — более 3	17	32,8	20,2	692	21,8	136	0,407	0,069
							Разность	– 0,009	

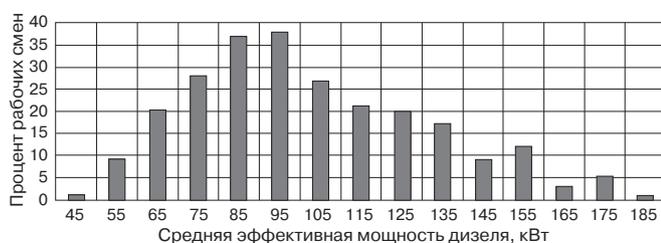


Рис. 8. Данные БСУТ за 6 месяцев работы тепловоза ЧМЭ3-3412

Fig. 8. Data of the on-board fuel metering system for 6 months of operation of a ChME3-3412 diesel locomotive

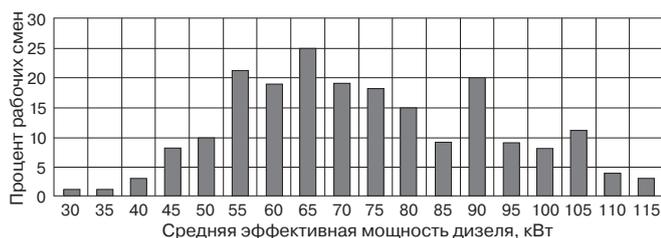


Рис. 9. Данные БСУТ за 6 месяцев работы тепловоза ЧМЭ3-3415

Fig. 9. Data of the on-board fuel metering system for 6 months of operation of a ChME3-3415 diesel locomotive

отклонением, заметно превышает разницу средних значений  $g_c$  в сравниваемых группах 1 и 2, 3 и 4. Это свидетельствует о том, что на величину  $g_c$  в большей степени, нежели количество переключений ПК, действуют другие факторы. Если сравнивать выборки по разным тепловозам, то разброс значений  $g_c$  будет определяться еще и заводским допуском на характеристики, так как нормативные значения удельного расхода топлива устанавливаются заводом-изготовителем для стандартных атмосферных условий и с 5%-м допуском [22].

Результаты исследования позволяют предположить, что на основе данных БСУТ отследить влияние интенсивности переключений ПК на удельный расход топлива практически возможно только при экстремальных различиях в этой интенсивности, аналогичных приведенным в [15], что не всегда встречается в рядовой эксплуатации. При этом диапазон изменения средней эффективной мощности в выборке должен находиться в таких пределах, при которых соответствующие по паспортной характеристике дизеля изменения удельного эффективного расхода топлива не превышают увеличения этой величины от переменных режимов нагружения ДГУ.

Очевидно, что по правилу «трех сигм» фиксация влияния интенсивности переключений ПК на удельный расход топлива может производиться в том случае, когда разница средних значений удельного эффективного расхода топлива в сравниваемых группах данных с разным удельным количеством переключе-

ний ПК более чем в 3 раза превышает среднее квадратичное отклонение удельного эффективного расхода в этих группах.

**Заключение.** Эффективность практического использования информации от систем учета расхода топлива тепловозами во многом определяется специализированным программным обеспечением обработки данных регистрации. Оригинальные алгоритмы этого программного обеспечения позволяют не только автоматизировать составление отчетов, содержащих важные и полезные данные об эффективности расходования топлива, но и оптимизировать, а в отдельных случаях и сократить количество используемых датчиков.

Помимо разработанных и утвержденных ОАО «РЖД» требований к бортовым системам учета топлива, актуальной является разработка единых технических требований к порядку обработки регистрируемых этими системами данных. Предварительно с привлечением отраслевой науки актуально определить достоверность как уже формируемых в специализированном программном обеспечении, так и перспективных показателей.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чикиркин О.В. Совершенствовать систему учета топливно-энергетических ресурсов // Локомотив. 2018. № 8. С. 2–5.
2. Головаш А.Н., Бочаров В.М. Бортовые комплексы для локомотивов // Железнодорожный транспорт. 2004. № 10. С. 76–77.
3. Современные информационные технологии для тепловозов / А.В. Грищенко [и др.] // Локомотив. 2007. № 4. С. 18–24.
4. Головаш А.Н., Бочаров В.М., Кузнецов С.М. Эффективность использования бортовых систем учета топлива на локомотивах // Локомотив. 2008. № 11. С. 21–22.
5. Мугинштейн Л.А., Молчанов А.И., Попов К.М. Совершенствование системы учета и контроля расхода топлива маневровых тепловозов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2010. № 1. С. 8–18.
6. Игин В.Н., Захватов А.В., Карянин В.И. Автоматизация контроля расхода топлива // Локомотив. 2015. № 2. С. 13–17.
7. Технические требования к системам регистрации и анализа параметров работы тепловоза и учета дизельного топлива [Электронный ресурс]: утв. старшим вице-президентом ОАО «РЖД» В.А. Гапановичем 7 марта 2014 г. № 125. Доступ из АСПИЖТ.
8. Оценка точности измерения количества топлива в баке тепловоза гидростатическим измерителем / В.В. Грачёв [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2008. № 5. С. 29–32.
9. Науменко С.Н., Годнев А.Г. О достоверности учета дизельного топлива при экипировке локомотивов // Железнодорожный транспорт. 2011. № 2. С. 49–51.
10. Влияние формы бака и уклона пути на точность измерения количества топлива в баке тепловозов / М.В. Федотов [и др.] // Вестник Научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава (Вестник ВНИКТИ). 2015. № 97. С. 81–87.
11. Грачёв В.В., Грищенко А.В., Базилевский Ф.Ю. О достоверности прямых способов оперативного контроля энерго-

эффективности тепловозов в эксплуатации // Вестник института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. 2018. № 2. С. 40–48.

12. Дополнительные показатели использования маневровых локомотивов / В. В. Костенко [и др.] // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 2. С. 33–37.

13. Анисимов А. С., Минаков В. А., Носков В. О. Оценка влияния работы тепловоза на холостом ходу на износ деталей дизеля // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1. С. 40–45. <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2022-1-40-45>.

14. Тарута В. Ф., Чулков А. В., Милютин Л. В. Технология контроля уровня мощности для настройки дизель-генераторной установки маневрового тепловоза с учетом условий эксплуатации // Известия Транссиба. 2018. № 1. С. 109–117.

15. Свечников А. А. Снижение удельного расхода топлива маневровыми тепловозами путем оптимизации параметров дизельной установки // Вестник транспорта Поволжья. 2021. № 3. С. 68–73.

16. Лямин В. А., Шкарин В. Н. Оценка технического уровня маневрового тепловоза // Совершенствование маневровых тепловозов, их ремонта и эксплуатации: сб. науч. тр. / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т ж.-д. транспорта; под ред. Л. С. Назарова. М.: Транспорт, 1985. С. 68–72.

17. Секирин Е. В. Эффективный путь экономии топлива на маневровой работе // Электрическая и тепловозная тяга. 1971. № 7. С. 18.

18. Исследование и анализ условий эксплуатации и расхода топлива тепловозами в маневровом движении / А. К. Белоглазов [и др.] // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы Третьей Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (Омск, 10–11 ноября 2016 г.) / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск: ОмГУПС, 2016. С. 48–52.

19. Патент № 2266529 Российская Федерация, МПК G01M 15/00, G01F 9/00. Способ контроля технического состояния силовой установки транспортного средства: № 2004102584/28: заявл. 29.01.2004; опубл. 20.12.2005 / Мугинштейн Л. А. [и др.]. 12 с.

20. Влияние переходных процессов дизель-генераторной установки тепловоза 2ТЭ116У на его эксплуатационные показатели / В. В. Грачев [и др.] // Локомотивы. XXI век: сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 110-летию со дня рождения д-ра техн. наук, профессора Е. Я. Гаккель (Санкт-Петербург, 15–16 октября 2013 г.) / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I, ОАО «Российские железные дороги». СПб.: ПГУПС, 2013. С. 146–147.

21. Швайнштейн Б. С., Майоров Э. Г., Шалаев С. С. Тепловозы ЧМЭЗ и ЧМЭ2. М.: Транспорт, 1975. 376 с.

22. Патент № 2591556 Российская Федерация, МПК G01M 17/08, B61C 5/00. Способ контроля технического состояния силовой установки железнодорожного транспортного средства: № 2015115795/11: заявл. 28.04.2015; опубл. 20.07.2016 / Бабков Ю. В. [и др.]. 11 с.

## REFERENCES

1. Chikirkin O. V. Sovershenstvovat' sistemu ucheta toplivno-energeticheskikh resursov [Improvement of the metering system for fuel and energy resources]. *Lokomotiv = Locomotive*. 2018;(8):2-5. (In Russ.).

2. Golovash A. N., Bocharov V. M. Bortovye komplekсы dlya lokomotivov [On-board systems for locomotives]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway transport*. 2004;(10):76-77. (In Russ.).

3. Grishchenko A. V., Grachev V. V., Lavskiy V. G. et al. Sovremennye informatsionnye tekhnologii dlya teplovozov [Modern information technologies for diesel locomotives]. *Lokomotiv = Locomotive*. 2007;(4):18-24. (In Russ.).

4. Golovash A. N., Bocharov V. M., Kuznetsov S. M. Effektivnost' ispol'zovaniya bortovykh sistem ucheta topliva na lokomotivakh [Efficiency

of using on-board fuel metering systems on locomotives]. *Lokomotiv = Locomotive*. 2008;(11):21-22. (In Russ.).

5. Muginshteyn L. A., Molchanov A. I., Popov K. M. Sovershenstvovanie sistemy ucheta i kontrolya raskhoda topliva manevrovyykh teplovozov [Improving the system of metering and control of fuel consumption of shunting diesel locomotives]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2010;(1):8-18. (In Russ.).

6. Igin V. N., Zakhvatov A. V., Karyanin V. I. Avtomatizatsiya kontrolya raskhoda topliva [Automation of fuel consumption control]. *Lokomotiv = Locomotive*. 2015;(2):13-17. (In Russ.).

7. Tekhnicheskie trebovaniya k sistemam registratsii i analiza parametrov raboty teplovoza i ucheta dizel'nogo topliva [Technical requirements for systems for recording and analyzing the parameters of the operation of a diesel locomotive and metering of diesel fuel] (Electronic resource). Approved by Senior Vice President of Russian Railways V. A. Gapanovich dated March 7, 2014, No. 125. Access from ASPIZhT. (In Russ.).

8. Grachev V. V., Bazilevskiy F. Yu., Cheremisinov P. A., Popov A. V. Otsenka tochnosti izmereniya kolichestva topliva v bake teplovoza gidrostaticheskim izmeritelem [Assessment of the accuracy of measuring the amount of fuel in the tank of a diesel locomotive by a hydrostatic meter]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Scientific Journal*. 2008;(5):29-32. (In Russ.).

9. Naumenko S. N., Godnev A. G. O dostovernosti ucheta dizel'nogo topliva pri ekipirovke lokomotivov [On the reliability of accounting for diesel fuel when equipping locomotives]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway transport*. 2011;(2):49-51. (In Russ.).

10. Fedotov M. V., Koshcheev S. N., Bychkova E. A., Grachev V. V. Vliyaniye formy baka i uklona puti na tochnost' izmereniya kolichestva topliva v bake teplovozov [Influence of the tank shape and track slope on the accuracy of measuring the amount of fuel in the tank of diesel locomotives]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo i konstruktorskotekhnologicheskogo instituta podvizhnogo sostava (Vestnik VNIKTI) = Bulletin of the Research and Design and Technology Institute of Rolling Stock*. 2015;(97):81-87. (In Russ.).

11. Grachev V. V., Grishchenko A. V., Bazilevskiy F. Yu. O dostovernosti pryamykh sposobov operativnogo kontrolya energoeffektivnosti teplovozov v ekspluatatsii [On the reliability of direct methods of operational control of the energy efficiency of diesel locomotives in operation]. *Vestnik instituta problem estestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznykh dorog = Bulletin of the Institute for Problems of Natural Monopolies: Railway Engineering*. 2018;(2):40-48. (In Russ.).

12. Kostenko V. V., Sugorovskiy A. V., Khomich D. I. et al. Dopolnitel'nye pokazateli ispol'zovaniya manevrovyykh lokomotivov [Additional indicators of the use of shunting locomotives]. *Transport Rossiyskoy Federatsii = Transport of the Russian Federation*. 2018;(2):33-37. (In Russ.).

13. Anisimov A. S., Minakov V. A., Noskov V. O. Otsenka vliyaniya raboty teplovoza na kholostom khodu na iznos detaley dizelya [Evaluation of the impact of locomotive idling on the wear of diesel parts]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya = Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2022;(1):40-45. <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2022-1-40-45>. (In Russ.).

14. Taruta V. F., Chulkov A. V., Milyutina L. V. Tekhnologiya kontrolya urovnya moshchnosti dlya nastroyki dizel'-generatornoй ustanovki manevrovogo teplovoza s uchedom usloviy ekspluatatsii [Technology for controlling the power level for setting up a diesel generator set of a shunting diesel locomotive, taking into account operating conditions]. *Izvestiya Transsiba = Journal of Transsib Railway Studies*. 2018;(1):109-117. (In Russ.).

15. Svecnikov A. A. Snizhenie udel'nogo raskhoda topliva manevrovyyimi teplovozami putem optimizatsii parametrov dizel'noy ustanovki [Reducing the specific fuel consumption of shunting diesel locomotives by optimizing the parameters of a diesel plant]. *Vestnik transporta Povolzh'ya = Bulletin of Transport of the Volga Region*. 2021;(3):68-73. (In Russ.).

16. Lyamin V. A., Shkarin V. N. Otsenka tekhnicheskogo urovnya maneirovogo teplovoza [Assessment of the technical level of a shunting diesel locomotive]. Sovershenstvovanie maneirovykh teplovozo, ikh remonta i ekspluatatsii [Improvement of shunting diesel locomotives, their repair and operation]. Procs. of All-Union Railway Research Institute. Moscow: Transport Publ.; 1985. P. 68–72. (In Russ.).

17. Sekerin E. V. Effektivnyy put' ekonomii topliva na maneirovoy rabote [An effective way to save fuel on shunting work]. *Elektricheskaya i teplovoznaya tyaga = Electric and diesel traction*. 1971;(7):18. (In Russ.).

18. Beloglazov A. K., Molchanov V. V., Noskov V. O., Chulkov A. V. Issledovanie i analiz usloviy ekspluatatsii i raskhoda topliva teplovozmami v maneirovom dvizhenii [Research and analysis of operating conditions and fuel consumption of diesel locomotives in shunting]. Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov [Operational reliability of the locomotive fleet and improving the efficiency of train traction]. Procs. of 3rd All-Russian sci.-tech. conf. with international participation (Omsk, November 10–11, 2016). Omsk: OmGUPS Publ.; 2016. P. 48–52. (In Russ.).

19. Muginshteyn L. A., Molchanov A. I., Povarkov I. L., Popov K. M. Patent No. 2266529 Russian Federation, MPK G01M 15/00, G01F 9/00. Sposob kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya silovoy ustanovki transportnogo sredstva [The method of monitoring the technical condition of the power plant of the vehicle]: No. 2004102584/28: appl. 29.01.2004: publ. 20.12.2005. 12 p. (In Russ.).

20. Grachev V. V., Kurilkin D. N., Kim S. I., Sergeev S. V. Vliyaniye perekhodnykh protsessov dizel'-generatornoy ustanovki teplovoza 2TE116U na ego ekspluatatsionnye pokazateli [Influence of transient processes of the diesel generator set of the diesel locomotive 2TE116U on its performance]. Lokomotivy. XXI vek [Locomotives. XXI century]. Procs. of the Int. sci.-tech. conf. dedicated to the 110th Anniversary of the birth of Dr. of Engineering Sciences, Professor E. Ya. Gakkel (St. Petersburg, October 15–16, 2013). St. Petersburg State University of Communications, Russian Railways. St. Petersburg: PGUPS Publ.; 2013. P. 146–147. (In Russ.).

21. Shvaynshteyn B. S., Mayorov E. G., Shalaev S. S. Teplovozy ChME3 i ChME2 [Diesel locomotives ChME3 and ChME2]. Moscow: Transport Publ.; 1975. 376 p. (In Russ.).

22. Babkov Yu. V., Belova E. E., Klimenko Yu. I. et al. Patent No. 2591556 Russian Federation, MPK G01M 17/08, B61C 5/00. Sposob kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya silovoy ustanovki zheleznodorozh-

nogo transportnogo sredstva [Method for monitoring the technical condition of the power plant of a railway vehicle]: No. 2015115795/11: appl. 28.04.2015: publ. 20.07.2016. 11 p. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Кирилл Михайлович ПОПОВ,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НЦ «Цифровые модели перевозок и технологии энергосбережения», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 1080218, <https://orcid.org/0000-0003-2284-8144>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

### Kirill M. POPOV,

Cand. of Sci. (Engineering), Leading Researcher, Digital Models of Transportation and Energy Saving Technologies Scientific Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1080218, <https://orcid.org/0000-0003-2284-8144>

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

**Прозрачность финансовой деятельности:** автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

**Financial transparency:** the author has no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 12.06.2022, рецензия от первого рецензента получена 22.07.2022, рецензия от второго рецензента получена 25.07.2022, принята к публикации 01.11.2022.

The article was submitted 12.06.2022, first review received 22.07.2022, second review received 25.07.2022, accepted for publication 01.11.2022.



ТРУДЫ ВНИИЖТ

АСУ «Экспресс» — автоматизированная система управления пассажирскими перевозками на железнодорожном транспорте / под ред. А. В. Комиссарова. — 2-е изд. — Москва: РАС, 2019. — 68 с.

В книге рассмотрены бизнес-процессы пассажирских перевозок с использованием автоматизированной системы управления пассажирскими перевозками «Экспресс-3».

Во втором издании актуализированы и расширены описания текущего состояния информационных технологий системы «Экспресс-3», книга стала более удобной для чтения.

Издание предназначено для руководителей и инженерно-технического состава пассажирского комплекса; специалистов, связанных с разработкой и внедрением информационных технологий на российских железных дорогах; научных работников, преподавателей и студентов транспортных вузов.

*По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, Научно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».*

*Тел.: (495) 602-83-01, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.*

## Содержание журнала «Вестник ВНИИЖТ» за 2022 год

№ 1

### ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

- А. Б. Косарев, Р. А. Рудашевский, А. В. Рудашевская, П. И. Смолин, И. А. Ребров.** Определение переходного сопротивления между рельсом и землей для безбалластного пути и влияние сопротивления на растекание токов утечки в земляном полотне ..... 7–15
- А. А. Крылов, И. А. Ребров, А. В. Рудашевская, Р. А. Рудашевский, Е. Д. Харьковская.** Влияние переходного сопротивления балласта верхнего строения пути на величину потенциала рельс — земля на участках железных дорог, электрифицированных на переменном токе ..... 16–22
- Ю. М. Кулинич, С. А. Шухарев, В. К. Духовников, А. В. Гуляев.** Моделирование векторного управления асинхронным приводом вспомогательных машин электроподвижного состава ..... 23–30
- В. А. Кучумов, И. Н. Никончук.** О реализации рекуперативного торможения на электровозе переменного тока с однофазным обратимым преобразователем напряжения ..... 31–37
- В. Л. Незевак.** О сравнении энергетических параметров систем накопления электроэнергии для систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока ..... 38–52
- А. Г. Силюта, Ар. Г. Силюта, Д. М. Маяков.** Современные подходы к оценке эффективности создаваемых транспортных средств ..... 53–62

### АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

- Н. В. Корниенко, М. И. Мехедов.** Выбор системы интервального регулирования движения поездов в условиях возрастающих потребностей освоения прогнозируемых объемов перевозок ..... 63–70
- М. И. Мехедов, Е. А. Сотников, Е. А. Мехедова.** Развитие системы оценки качества выполнения расписаний пассажирских и пригородных поездов: постановка вопроса ..... 71–79

### ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Е. Н. Ефимова, Н. П. Виногооров, А. А. Шиладжян, В. М. Кошелев, Д. А. Валов, Н. В. Кузнецова.** Методические подходы к оценке эффективности функционирования современных конструкций верхнего строения железнодорожного пути ..... 80–88

№ 2

- Обращение главного редактора ..... 98–99

### ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

- А. М. Бржезовский.** Предложения по разработке референтной методики измерения боковых сил ..... 101–113
- А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, Д. Н. Шевченко, Д. Ю. Расин.** Двухслойные сферические резинометаллические шарниры и проблемы расчета их характеристик ..... 114–124
- М. Ю. Пустоветов.** Моделирование двухконтурной системы подчиненного регулирования координат активного корректора коэффициента мощности вспомогательного электропривода электровоза ..... 125–133
- А. Н. Савоськин, Н. С. Лавлинская, П. Ю. Иванов.** Применение упругозащищенного гидравлического гасителя колебаний в рессорном подвешивании локомотивов ..... 134–147
- Н. Д. Шилин, С. Н. Прокофьев.** Поосное перераспределение силы тяги для электровозов с асинхронными тяговыми двигателями ..... 148–156

### АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

- А. Ф. Бородин, В. В. Панин, М. А. Агеева, А. Ю. Соколов, С. Ю. Кириллова, Е. О. Дмитриев, А. А. Кравченко.** Оценка баланса провозной способности полигонов сети железных дорог ..... 158–169
- С. П. Вакуленко, М. В. Роменская, К. А. Калинин, К. И. Шведин.** Комплексный анализ эффективности использования современного подвижного состава при перевозках массовых грузов ..... 170–178
- О. В. Москвичев, Е. А. Мищенко, С. Н. Титаренко.** Концептуальная модель организации продвижения вагонопотоков на основе сквозного контроля сроков доставки грузов ..... 179–187

### ВНИИЖТ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

- А. Б. Косарев, О. Н. Римская, И. В. Анохов, И. В. Сиротенко.** Журналу ВНИИЖТ — 80 лет! Часть II. Победа, послевоенное восстановление и современное развитие ..... 189–202

№ 3

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

- В. И. Киселев, Т. О. Вахромеева, А. И. Федянин.** Повышение надежности тяговых электродвигателей тепловозов с учетом теплофизических параметров изоляции и проводников обмотки якоря ..... 213–220
- Н. В. Миронос, М. Н. Емельянова, Д. В. Тартынский.** Влияние аэродинамических параметров токоприемника на токосъем при скорости движения до 160 км/ч ..... 221–229
- А. Н. Савоськин, Н. Д. Шилин.** Анализ управления скольжением колесных пар грузового электровоза с асинхронными тяговыми двигателями ..... 230–239
- Г. М. Стоякин, А. В. Костин, С. Н. Науменко.** Использование теплоты отработавших газов тепловозного двигателя для отопления пассажирских вагонов ..... 240–246

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ  
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

- Н. П. Григорьев, И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, В. А. Ковалев, В. В. Шаталов.** Повышение работоспособности системы тягового электроснабжения Дальневосточной железной дороги ..... 248–257
- Р. Г. Король, О. Н. Числов.** Моделирование терминально-логистических процессов переработки внешнеторговых грузов на пограничной станции Гродеково ..... 258–266
- О. В. Москвичев, Е. Е. Москвичева.** Системный анализ математических моделей размещения транспортно-логистических объектов различного уровня ..... 267–276

**ВНИИЖТ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА**

- В. Н. Каплин, О. Н. Римская.** Экспериментальному кольцу АО «ВНИИЖТ» – 90 лет ..... 278–285

№ 4

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

- В. И. Беляев, Д. В. Горский, Д. А. Ступин, А. Н. Коньшков.** Определение нагруженности сцепных устройств электропоездов ..... 297–305
- И. А. Гаджиев.** Разработка бортовой системы диагностирования технического состояния поверхности катания колес грузовых вагонов ..... 306–317
- Б. Н. Зензинов, Ю. С. Ромен, М. В. Криволапов.** Актуализация критериев оценки состояния пути по данным путеизмерительных средств ..... 318–329
- А. Е. Миронов, И. С. Гершман, А. А. Крылов, П. О. Мусерский.** Монометаллические моторно-осевые подшипники тепловозов: замена материала с бронзы на комплексно-легированный алюминиевый сплав ..... 330–338
- Е. Н. Токмакова, И. Е. Перков, П. В. Иванов, К. Л. Заграничек.** Разработка рельсов новой категории для применения в особо тяжелых условиях эксплуатации ..... 339–346

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ  
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

- К. С. Беломестных, А. Н. Бардин, С. Н. Вечканов, А. А. Крылов.** Исследование распространения волн импульса грозового перенапряжения в контактной сети электрифицированных железных дорог ..... 348–358
- М. И. Мехедов, Е. А. Сотников, П. С. Холодняк, А. А. Капырин, Н. В. Корниенко.** Методические положения по определению основных параметров организации перевозочного процесса при внедрении вагонов с повышенной осевой и погонной нагрузкой ..... 359–369
- К. М. Попов.** Некоторые вопросы практического использования бортовых систем учета топлива тепловозов ..... 370–382

- Содержание журнала за 2022 год** ..... 383–384

# Журналу «Вестник ВНИИЖТ» — 80 лет!



Мне повезло в научной жизни. Более 60 лет я читаю высокопрофессиональный журнал института — «Вестник ВНИИЖТ», в котором публиковались и публикуются выдающиеся ученые железнодорожного транспорта. Журнал освещал важнейшие направления развития железных дорог: разработку и внедрение тепловозной и электрической тяги, современных грузовых вагонов с автосцепными устройствами, мощных инфраструктурных комплексов. Наши ученые были впереди в создании и внедрении силовых полупроводников; вычислительная техника на железных дорогах по результативности управления работой большой системы значительно опережала другие отрасли промышленности. По экономии энергии на тягу поездов мы и в настоящее время находимся на передовых позициях в мире.

Поздравляя «Вестник ВНИИЖТ» с замечательным юбилеем — 80-летием, сотрудникам научно-издательского отдела института, научной общественности пожелаем вдохновляться замечательным прошлым журнала, успехами сегодняшнего дня и стремиться к укреплению близкого и далекого будущего журнала.

Л. А. Мугинштейн, д-р техн. наук, профессор,  
главный научный сотрудник АО «ВНИИЖТ»



Работа железнодорожной отрасли освещается десятком различных периодических изданий. Особое место среди них занимает журнал «Вестник ВНИИЖТ». Это, пожалуй, старейшее научное издание в области железнодорожного транспорта. Это журнал, который давно преодолел границы российских железных дорог и активно изучается специалистами и исследователями в смежных отраслях, а также в других странах. «Вестник ВНИИЖТ» для меня — лучший индикатор того, в каком направлении сегодня развивается отраслевая научная мысль.

О. Н. Назаров, канд. техн. наук,  
зам. начальника Департамента технической политики ОАО «РЖД»



Уважаемые коллеги! Примите самые теплые и искренние поздравления со славным юбилеем журнала! Совершенно очевидно, что «Вестник ВНИИЖТ» является авторитетным изданием и пользуется заслуженным уважением среди ученых и специалистов в холдинге РЖД! Сегодня он изменился, выведен на новый уровень, индексируется не только в российских, но и в известных международных базах данных! Появились интересные рубрики, рассказывающие об истории института и происходящих в нем событиях, а также о результатах интеллектуальной деятельности и их пользе для потребителей. Желаю, чтобы во всех делах коллективу редакции сопутствовала удача, чтобы наш журнал, как и прежде, оставался помощником для ученых, специалистов и аспирантов в популяризации результатов научных исследований, содействующих развитию железнодорожного транспорта! С юбилеем!

С. Н. Науменко, д-р техн. наук, ученый секретарь АО «ВНИИЖТ»



«Вестник ВНИИЖТ» — самое авторитетное периодическое научное издание железнодорожной отрасли. Его публикации отражают важнейшие результаты и направления научно-технического развития транспорта, за которыми следуют широко внедряемые инновационные решения, прогрессивные нормативно-методические документы. Именно таким журнал оставался на протяжении восьмидесятилетий и вступил в девятое десятилетие своей плодотворной работы.

А. Ф. Бородин, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой (РУТ) МИИТ,  
начальник отдела АО «ИЭРТ»

# Журналу «Вестник ВНИИЖТ» — 80 лет!



Регулярно читаю статьи, посвященные вопросам электроснабжения железных дорог, опубликованные в журнале «Вестник ВНИИЖТ». Хочу отметить строгий отбор, высокий научный уровень, а также актуальность, теоретическую и практическую значимость размещаемых в журнале материалов.

А. В. Крюков, д-р техн. наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения



Всем профессорско-преподавательским составом Ташкентского государственного транспортного университета поздравляем с юбилеем любимый журнал «Вестник ВНИИЖТ»! Журнал является результатом кропотливой профессиональной работы крупнейших ученых железнодорожного транспорта, который формирует целостное восприятие науки и предоставляет возможности для обмена результатами научной деятельности. В период возрождения Великого Шёлкового пути ваш журнал имеет важное значение для «Пространства 1520», поскольку является главной информационной площадкой и научным изданием номер один в постсоветском пространстве для инженеров железнодорожной отрасли. Развивайтесь и оставляйте за собой первенство в мире!

Р. В. Рахимов, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» ТГТУ



К журналу «Вестник ВНИИЖТ» отношусь с особым вниманием и большим уважением. На протяжении всей своей истории журнал информировал своих читателей о всех направлениях развития железнодорожного транспорта в нашей стране и всегда шел в ногу с научно-техническим прогрессом. Спектр публикуемых статей всегда охватывает все самые новые и востребованные направления научных исследований по развитию главных транспортных артерий нашей страны — железных дорог. По характеру и серьезности публикаций «Вестник ВНИИЖТ» — это сочетание неувядающей классики и яркой научной новизны! От всей души поздравляю редакционный совет и всех сотрудников журнала со знаменательным юбилеем!

О. А. Сидоров, д-р техн. наук, профессор ОмГУПС, заслуженный изобретатель Российской Федерации, почетный железнодорожник



«Вестник ВНИИЖТ» по праву является лучшим научно-техническим изданием в отрасли. В период моей учебы в аспирантуре ВНИИЖТ и во время написания диссертации я постоянно обращалась к публикациям журнала, точно зная, что там найду результаты самых передовых исследований. Публикация в Вестнике очень помогла мне при защите диссертации. Желаю журналу «Вестник ВНИИЖТ» новых интересных статей и благодарных читателей!

М. А. Хижняк, канд. техн. наук, ведущий эксперт ПКТБ-ЦЦТ ОАО «РЖД»



«Вестник ВНИИЖТ» всегда был и остается той площадкой, где публично обсуждаются действительно передовые результаты и направления именно научных исследований по тематике железнодорожного транспорта. Причем всегда гарантирована достоверность и надежность этих результатов. Изучая публикации Вестника, можно четко отслеживать научные и проблемные тренды отрасли, т. к. публикуемые статьи всегда содержат материалы, посвященные в т. ч. и практическому применению научных достижений. Именно это сочетание в статьях Вестника — мощная научная составляющая материалов и практическая направленность — и выделяет главную линию формирования содержания журнала, и полностью соответствует девизу института — «Превращаем науку в результат»!

О. А. Сулов, д-р техн. наук, технический эксперт НЦ «РСТМ» АО «ВНИИЖТ»

# Журналу «Вестник ВНИИЖТ» — 80 лет!

Научно-технический журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта / Russian Railway Science Journal» приветствует читателей, авторов и рецензентов.

Журнал ведет свою историю с 1942 г. и первоначально носил название «Техника железных дорог» (до 1956 г.). Уже на протяжении 80-ти лет журнал непрерывно развивается, следуя вызовам времени и сохраняя при этом свою уникальность. С момента создания и до настоящего времени сотрудники редакции журнала стремятся воплощать в жизнь возложенную на издание миссию: поддержание высокого уровня российской железнодорожной науки.

Развитие отрасли во многом зависит от инженеров и ученых, которые раскрывают результаты своих передовых исследований в публикациях авторитетного научно-технического журнала. Это, в свою очередь, содействует прорывным изменениям в транспортных технологиях и технических средствах железнодорожных дорог. Сохраняя исторические традиции ведущего научно-технического издания отрасли, журнал **«Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта / Russian Railway Science Journal»** в тоже время стремится стать не только всероссийской, но и международной площадкой для популяризации актуальных научных исследований. Трансформация передового российского научно-технического журнала в глобальное издание послужит развитию всей транспортной отрасли.

Журнал в настоящее время индексируется в наиболее значимых российских и международных базах данных, а также входит в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата или доктора наук. Статьям, опубликованным в журнале, присваиваются уникальные идентификаторы DOI и EDN. Контроль качества и поддержание научного уровня публикаций обеспечиваются действующей системой двухстороннего слепого рецензирования всех поступающих в редакцию материалов с привлечением ведущих ученых отрасли, представляющих различные научные и образовательные организации.

Страницы нашего издания всегда открыты для авторов, которые серьезно занимаются транспортной наукой и вносят свой вклад в решение приоритетных задач по развитию железных дорог.

Редакция журнала  
«Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта  
(Вестник ВНИИЖТ)»  
<https://www.journal-vniizht.ru>



9 772223 973003