

Главный редактор А. М. Евстафьев, д-р техн. наук, профессор
Editor-in-chief A. Evstafev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Заместитель главного редактора А. К. Канаев, д-р техн. наук, профессор
Deputy chief editor A. Kanayev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Научный редактор Т. С. Титова, д-р техн. наук профессор
Scientific Editor T. Titova, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Перевод на английский язык Д. В. Деметьева
English translation Daria V. Dementieva
Литературное редактирование и корректура Н. В. Юдина
Editing and proofreading Nadezhda V. Yudina
Верстка И. Г. Иваньшина
Layout Irina G. Ivanshina

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Издатель

Общество с ограниченной ответственностью «Издательский Центр РИОР» по договору № ЭА94514 от 19.12.2022

Founder

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Publisher

Limited Liability Company "Publishing Center RIOR", under contract N ЭА94514 dated 19.12.2022

Контакты

190031, СПб., Московский пр., 9, тел. (812) 457-85-36;
e-mail: brni@pgups.ru;
127214, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1, оф. 402

Contacts

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 457-85-36;
e-mail: brni@pgups.ru;
127214, Russia, Moscow, Polyarnaya str., 31Bc1, office 402

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ЭЛ № ФС 77-45490 от 22.06.2011 выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Mass media registration certificate number

ЭЛ N ФС 77-45490 dd. 22.06.2011 issued by the The Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

The Journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI)

Журнал имеет институт рецензирования

The Journal has the Peer-review division

Журнал распространяется через Интернет без ограничений и по адресно-целевой подписке через редакцию

The Journal is distributed via Internet for free and by subscription via Editorial office

Минимальные системные требования

Тип компьютера, процессор, сопроцессор, частота: Pentium IV и выше; оперативная память (RAM): 256 Мб и выше; необходимо на винчестере: не менее 64 Мб; ОС MacOS, Windows (XP, Vista, 7); видеосистема: встроенная; дополнительное ПО: Adobe Reader версия от 7.X или аналог. Защита от незаконного распространения: реализуется встроенными средствами Adobe Acrobat

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

INTERNATIONAL EDITORIAL

Паньчев Александр Юрьевич, канд. экон. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель Совета
Alexander Panychev, PhD Econ. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial board

Хамидов Отабек Рустамович, д-р техн. наук, доц., Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Республика Узбекистан
Otabek Khamidov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Tashkent State Technical University, Tashkent, The Republic of Uzbekistan

Вэйли Ли, профессор, Институт электрических машин и приборов, Пекинский университет Цзяотун, Пекин, Китай
Weili Li, PhD Degree and Professor, School of Electrical Engineering, Director of Institute of Electrical Machinery and Appliances, Beijing Jiaotong University, Beijing, China

Ли Фуншэн, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай
Li Fusheng, PhD, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou, China

Поляк Милош, профессор, Жилинский университет, Жилин, Словацкая Республика
Milos Poliak, Ing. PhD, Professor, University of Zilina, Zilina, Slovak Republic

Стыскала Витезслав, профессор, Оставский технический университет, Острава, Чешская Республика
Vitezslav Styskala, PhD, Associate Professor, Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic

Чжан Чжунъян, профессор, Чжэнчжоуский железнодорожный профессионально-технический колледж, Чжэнчжоу, Китай
Zhang Zhongyang, University Degree, Professor, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Professor, Secretary of the School of Locomotives and Rolling Stock, Zhengzhou, China

Бельтюков Владимир Петрович, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Vladimir Belyukov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Блашко Людмила Сергеевна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Ludmila Blazhko, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Бороненко Юрий Павлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Yuriy Boronenko, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Грачев Владимир Васильевич, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Vladimir Grachev, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Грищенко Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Alexander Grishchenko, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Дудкин Евгений Павлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Evgeniy Dudkin, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Евстафьев Андрей Михайлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Andrey Evstafev, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Журавлева Наталья Александровна, д-р экон. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Natalya Zhuravleva, D. Econ. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Ким Константин Константинович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Konstantin Kim, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Колпакчян Павел Григорьевич, д-р техн. наук, доц., РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия
Pavel Kolpakchyan, D. Eng. Sci., Associate Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

Лепидус Лариса Владимировна, д-р экон. наук, профессор, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
Larisa Lapidus, D. Econ. Sci., Professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Никитин Александр Борисович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Alexander Nikitin, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Никитин Виктор Валерьевич, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Victor Nikitin, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Покровская Оксана Дмитриевна, д-р техн. наук, доц., ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Oksana Pokrovskaya, D. Eng. Sci., Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Пудовиков Олег Евгеньевич, д-р техн. наук, доц., РУТ, Москва, Россия
Oleg Pudovikov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Russian University of Transport, Moscow, Russia

Рачек Светлана Витальевна, д-р экон. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия
Svetlana Rachek, D. Econ. Sci., Professor, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia

Титова Тамила Семеновна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Tamila Titova, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Штыков Валерий Иванович, член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия
Valerij Shtykov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, D. Eng. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ, ПРЕДЛАГАЕМЫМ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «БЮЛЛЕТЕНЬ РУЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ

1.1 Тема и содержание представляемой для публикации статьи должны соответствовать профилю журнала, обладать научной новизной и представлять интерес для специалистов.

1.2 Статьи, ранее опубликованные или переданные в другие издания, в журнал не принимаются.

1.3 Результаты исследований должны соответствовать одному из научных направлений: Транспортные системы, Энергетика и электротехника, Экономика.

1.4 Нижеперечисленные материалы предоставляются в электронном виде в одном архивном файле (zip или rar):

Файл 1 – рукопись научной статьи в формате MS Word.

Файл 2 – первая страница рукописи, подписанная автором (авторами).

Файл 3 – согласие на обработку персональных данных, заверенное личной подписью, в сканированном виде.

Файл 4 – информация об авторах:

- ФИО полностью,
- дата рождения,
- место работы, должность,
- ученая степень и звание,
- паспортные данные (серия, номер, кем и когда выдан),
- e-mail, телефон,
- адрес.

Файл 5 – название статьи, аннотация, ключевые слова, библиографический список на английском языке в формате MS Word.

Файл 6 – экспертное заключение о возможности опубликования рукописи в открытом доступе, заверенное по месту обучения или работы, в сканированном виде.

Файл 7 – рецензия научного руководителя (для студентов-исследователей, магистров, аспирантов и соискателей ученых степеней).

Файл 8 – лицензионный договор.

1.5 Все рукописи проходят рецензирование (внешняя экспертная оценка).

В случае отрицательного отзыва рукопись возвращается автору на доработку. В случае повторного отрицательного отзыва статья отклоняется.

После получения положительной рецензии с рекомендацией к публикации рукопись передается в издательство и проходит предпечатную подготовку.

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕКСТУ

Объем статьи – не менее 8 и не более 15 страниц при наборе текста в формате Word 14-м кеглем через одинарный интервал.

На первой странице рукописи помещаются УДК, фамилии авторов (с указанием места обучения или работы), название статьи, аннотация и ключевые слова. Текст должен содержать введение, озаглавленные разделы, заключение.

Формулы должны быть набраны шрифтом Times New Roman в тексте статьи или в программе Math Type. Буквы латинского алфавита в тексте и формулах набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – обычным шрифтом. Нумеровать нужно только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Формат страницы – А4; каждое поле – 2,5 см; абзацный отступ – 1 см; размер шрифта 14, выравнивание по левому краю; автор (авторы) с указанием места обучения или работы – размер шрифта 14, полужирное начертание, выравнивание по левому краю; название рукописи – размер шрифта 14, строчные буквы, полужирное начертание, выравнивание по левому краю; аннотация, ключевые слова – размер шрифта 12, выравнивание по ширине.

Требуемый объем **аннотации** – 200–250 слов. В аннотации должны быть указаны цель, методы, результаты, практическая значимость работы.

Библиографический список приводится в конце статьи и составляется по мере упоминания работ в тексте. Ссылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках.

Рисунки, графики и таблицы должны иметь номер и заголовок (размер шрифта 12, выравнивание по центру).

Внимание! Рисунки и формулы не должны быть сканированными!

Фотографии предоставляются в двух вариантах: в тексте статьи и в виде отдельных файлов TIFF и JPEG без сжатия. Название файла должно соответствовать подрисуночной подписи. Сканирование материалов из альбомов, журналов, буклетов, газет и книг влечет за собой сильное понижение качества изображения. Используйте функцию Descreen. Если Вы сканируете фото самостоятельно, выставляйте разрешение 300 dpi (большее не имеет смысла, меньшее приведет к понижению качества). То же самое касается рисунков, графиков и диаграмм, созданных в CorelDRAW и Illustrator. Помещайте в файл в формате Word рисунки только в качестве preview-версии, не забывая прилагать отдельно исходники.

Важная информация. Настоящие требования могут быть изменены без оповещения авторов. Неисключительные права на все материалы, опубликованные на сайте журнала, кроме оговоренных случаев, принадлежат ФГБОУ ВО ПГУПС. Все материалы, авторские права на которые принадлежат ФГБОУ ВО ПГУПС, могут быть перепечатаны при наличии письменного разрешения ФГБОУ ВО ПГУПС. Требуется предварительное согласие на перепечатку со стороны издателя.

Содержание

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

А. Г. Нуриев, Э. Ю. Чистяков, Н. А. Битюцкий	Развитие использования дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар	7
Н. М. Панченко, Д. А. Басовский	К вопросу выбора наиболее рационального сочетания землеройной и транспортной техники при производстве земляных работ	19
Ван Синьтун, А. Ф. Колос, А. В. Петряев	Методы расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна высокоскоростных магистралей в условиях холодного климата в КНР	26
Ю. Н. Канонин, А. В. Лыщик	Пожарная опасность электромобилей	38

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Д. А. Басовский, О. В. Востриков, Н. М. Панченко	Возможность продления срока службы трамвайного пути в Санкт-Петербурге	52
Д. В. Серебряков	Исследование конструкции земляного полотна на свайном основании с гибким ростверком	61
А. В. Кабанов	Операционный анализ вариантов организации строительства транспортных обходов городов на целевых и технологических графах	69
А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян	Экспериментальное исследование энергетической эффективности асинхронного тягового привода электровозов при изменяющейся нагрузке	77
Синь Вэньшао, А. Ф. Колос, А. В. Петряев	Влияние верхнего граничного условия на гидротермическое поле земляного полотна железных дорог в районах вечной мерзлоты	93

И. К. Самаркина, А. А. Соболев, Н. А. Битюцкий, И. В. Павельев, С. А. Стопницкий	Исследование возникновения и развития трещин при упрочнении деталей подвижного состава индукционно-металлургическим способом	105
--	--	-----

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Н. А. Журавлева, О. И. Сакович	Алгоритмизация производственных процессов в сфере продаж услуг грузовых железнодорожных перевозок	114
А. Г. Коринной	Специальные инструменты выявления и противодействия недобросовестным практикам с цифровыми финансовыми активами	125
Л. М. Чеченова	Перспективы транспортировки грузов в границах стран пространства 1520	133

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

А. В. Саидова, А. В. Гусев, Е. А. Рудакова	Сравнение требований стандартов разных стран к оценке динамических качеств и воздействия на путь грузовых вагонов	147
А. В. Петряев, А. А. Сайдалиев	Лабораторные исследования упругих материалов подшпального основания трамвайных путей	161
Н. О. Жухин, В. И. Легкая	Решение задачи параметрического синтеза для САУ скоростью длинносоставного грузового поезда	170
В. А. Болотин, К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин, Н. Г. Янковская, А. Д. Иванова	Совершенствование методики расчета крепления колесной техники на открытом железнодорожном подвижном составе	183
К. И. Иванова, А. Ф. Колос	Динамические силы воздействия колеса на рельс при безбалластной конструкции пути RHEDA 2000	197
Е. П. Дудкин, А. В. Петряев	Изменение количества отступлений рельсовой колеи после укладки геосинтетических материалов в подшпальное основание	206

Contents

GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

A. G. Nuriev, E. Y. Chistyakov, N. A. Bitutsky	Development of the Usage of Remote Measurements to Define Wheelset Geometric Parameters	17
N. M. Panchenko, D. A. Basovskiy	On the Issue of Choice of the Most Rational Combination of Earth-Moving and Transport Equipment in Earthwork Production	24
Wang Xintong, A. F. Kolos, A. V. Petriaev	Methods of Calculating Soil Freezing Depth of High-Speed Railway (HSR) Subgrade in Cold Climate Conditions in People's Republic of China	36
Yu. N. Kanonin, A. V. Lyshchik	Fire Danger of Electric Vehicles	48

PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

D. A. Basovsky, O. V. Vostrikov, N. M. Panchenko	Possibility of Extending Tramway Track Service Life in St. Petersburg	59
D. V. Serebriakov	Investigation of Subgrade Construction on Pile Foundation with Flexible Grillage	67
A. V. Kabanov	Operational Analysis of Options for Construction Organization of City Transport Bypasses on the Basis of Target and Technological Graphs	75
A. A. Zarifyan, P. G. Kolpahchyan	Experimental Research of Energetic Efficiency of Electric Locomotive Asynchronous Traction Drive at Changing Load	90
Xin Wenshao, A. F. Kolos, A. V. Petriaev	Influence of Upper Boundary Condition on Railway Subgrade Hydrothermal Field in Permafrost Areas	103

I. K. Samarkina, A. A. Sobolev, N. A. Bityutsky, I. V. Paveliev, S. A. Stopnitsky	Investigation of Crack Appearance and Development at Strengthening Rolling Stock Parts by Inductive-Metallurgical Method	111
---	--	-----

ECONOMICS AND MANAGEMENT

N. A. Zhuravleva, O. I. Sakovich	Algorithmizing Production Processes in Freight Rail Service Sales	123
A. G. Korinnoy	Special Instruments to Reveal and Resist Unfair Practices with Cryptocurrencies and Digital Financial Assets	131
L. M. Chechenova	Cargo Transportation Aspect in the Borders of Countries of 1520 Area	144

HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

A. V. Saidova, A. V. Gusev, E. A. Rudakova	Comparison of Requirements for Standards of Different Countries to Assessment of Freight Car Dynamic Qualities and Impact on Track	159
A. V. Petriaev, A. A. Saydaliev	Laboratory Studies of Elastic Materials for Sleeper Base of Tram Tracks	168
N. O. Zhukhin, V. I. Legkaya	Parametric Synthesis Task Solution for Automatic Control Systems (ACS) by Speed of Long Freight Train	181
V. A. Bolotin, K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin, N. G. Yankovskaya, A. D. Ivanova	Methodology Improvement to Calculate Wheeled Vehicles Bracing on Open Railway Rolling Stock	194
K. I. Ivanova, A. F. Kolos	Dynamic Forces of Wheel Impact on Rail at Ballastless Track Structure RHEDA 2000	204
E. P. Dudkin, A. V. Petriaev	Changes in the Number of Rail Gauge Crimes after Laying Geosynthetics under the Sleeper Base	214

УДК 629.4.027.5

Развитие использования дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар

А. Г. Нуриев, Э. Ю. Чистяков, Н. А. Битюцкий

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Нуриев А. Г., Чистяков Э. Ю., Битюцкий Н. А. Развитие использования дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 7–18. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-7-18

Аннотация

Цель: Измерение является важным процессом для нахождения значений любой физической величины. Первостепенным требованием любого измерения является точность. Постепенно заменяются, улучшаются и автоматизируются процессы. Измерение геометрических параметров стало одним из самых популярных процессов во всех отраслях промышленности. С ее улучшений и начались первые достижения. Развитие использования дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар даст огромные преимущества перед ручными измерениями для железнодорожной отрасли, так как они облегчат и ускорят процесс измерений с минимальной погрешностью. Статья посвящена исследованию применения дистанционных измерений для определения геометрических параметров колесных пар. В статье рассмотрены преимущества использования дистанционных измерений при проведении геометрических исследований колесных пар. Авторы предлагают методы и алгоритмы, которые могут быть использованы для более точного определения геометрических параметров колесных пар. Также авторы предлагают ряд рекомендаций по использованию дистанционных измерений при исследовании колесных пар для достижения максимальной точности измерений. Кроме того, рассматриваются риски ручных шаблонов, которые дистанционный способ измерений помогает избежать. Помимо самих измерений, которые производят ручной и дистанционный способы, рассмотрены также их калибровки. Описана калибровка ручного шаблона УТ-1 в соответствии с его методикой калибровки, а также приведены сложности калибровки системы контроля колесных пар на ходу 3DWheel, приведена схема, которая показывает составляющие для его калибровки. В заключение авторы обсуждают перспективы дальнейшего использования дистанционных измерений для изучения геометрии колесных пар. Целью работы является рассмотрение использования дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар. **Методы:** Оценка использования дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар на примере тестировщиков. **Результаты:** Определена возможность использования дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар, выявлены преимущества и недостатки перед ручными измерениями. **Практическая значимость:** Оценена возможность использования дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар, которая позволит снизить затраты на транспортировку ручных шаблонов для их периодической калибровки и уменьшит затрачиваемое время на метрологическое обслуживание.

Ключевые слова: Дистанционное измерение, информационные технологии, колесная пара, ручные измерения, шаблон УТ-1, погрешность.

Введение

В настоящее время для измерения геометрических параметров колесных пар применяются ручные приборы. Одним из таких средств измерения является шаблон УТ-1 (универсальный тяговый). Им измеряют каждое отдельное колесо, на что тратится достаточное количество сил и времени. Данный способ вжился в железнодорожную среду, но технический прогресс не стоит на месте и с каждым днем придумывают новые методы и способы улучшить или заменить «устаревшие» методики измерений. Альтернативой ручному способу измерений являются дистанционные измерения по определению геометрических параметров колесных пар.

Как и любые приборы, их нужно калибровать. Калибровка средств измерений — совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений [1].

В данной статье будет рассмотрено развитие использования дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар на примере системы контроля колесных пар на ходу 3DWheel, также их преимущества и недостатки. Предполагается, что использование такой системы приведет к положительному эффекту.

Геометрические параметры колесной пары

Колесные пары представляют собой конструкцию, в которую входят два или более колес. Они широко используются для транспортировки тяжелых грузов, а также для улучшения управляемости и увеличения точности перемещения [2–6].

В данной статье рассмотрим колесную пару как основной элемент ходовой части локомотива, а именно бандажную колесную пару электровоза. Колесная пара электровоза состоит из оси, зубчатого колеса, двух колесных центров и двух бандажей с бандажными кольцами (рис. 1) [7, 8].

Одним из основных геометрических параметров колесной пары является расстояние между внутренними поверхностями гребней колес колесной пары. Для российских дорог это расстояние равно 1440 мм с допусками ± 3 мм для колеи шириной 1520 и 1524 мм [9].

На рис. 2 изображены измеряемые в эксплуатации параметры бандажа.

Измерение геометрических параметров колесной пары ручным способом

Для измерения геометрических параметров колесной пары ручным способом необходим шаблон УТ-1, который предназначен для измерения и контроля толщины гребня и его высоты, параметра крутизны гребня проката и ползуна на поверхности катания бандажа у колесных пар с новыми профилями бандажей.

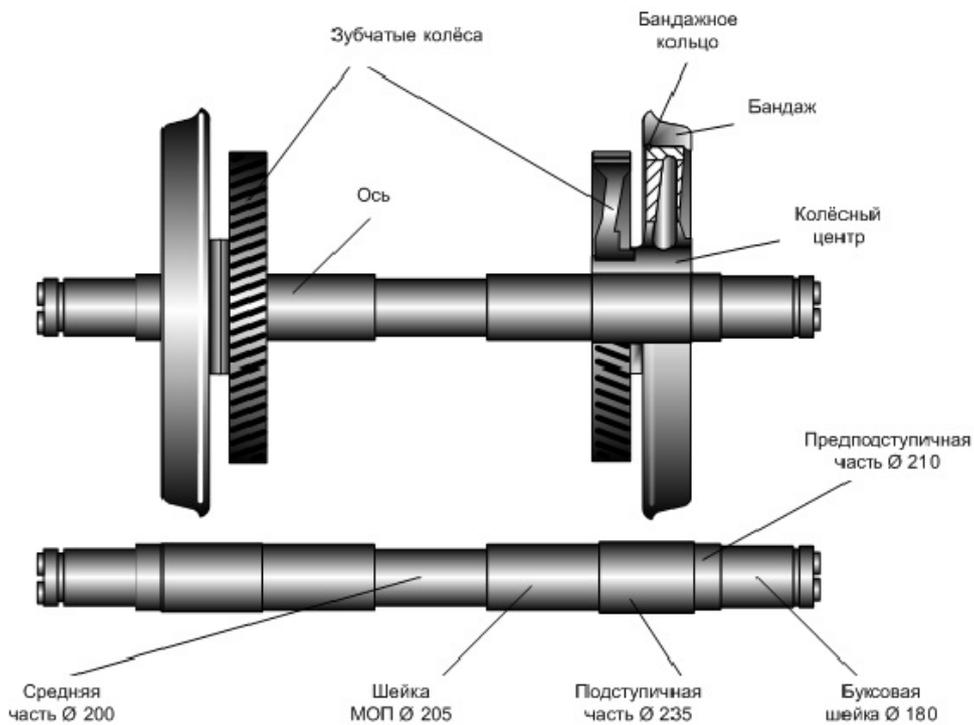


Рис. 1. Составляющие колесной пары [8]

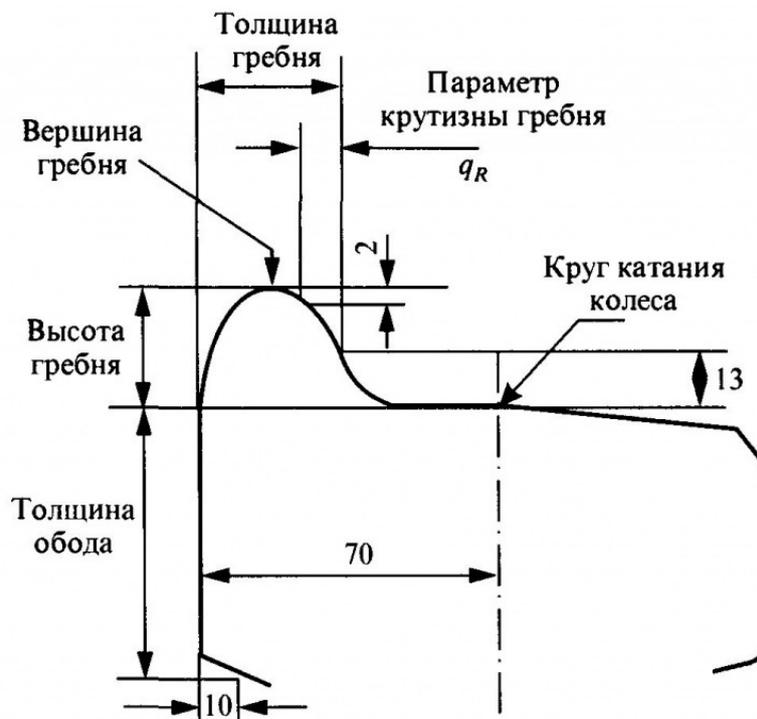


Рис. 2. Измеряемые параметры бандажа [10]

Шаблон модели УТ-1 (рис. 3) представляет собой сборный металлический каркас с системой рамок с зажимными устройствами и измерительных линеек. Количество линеек определяется числом контролируемых параметров и равно трем.

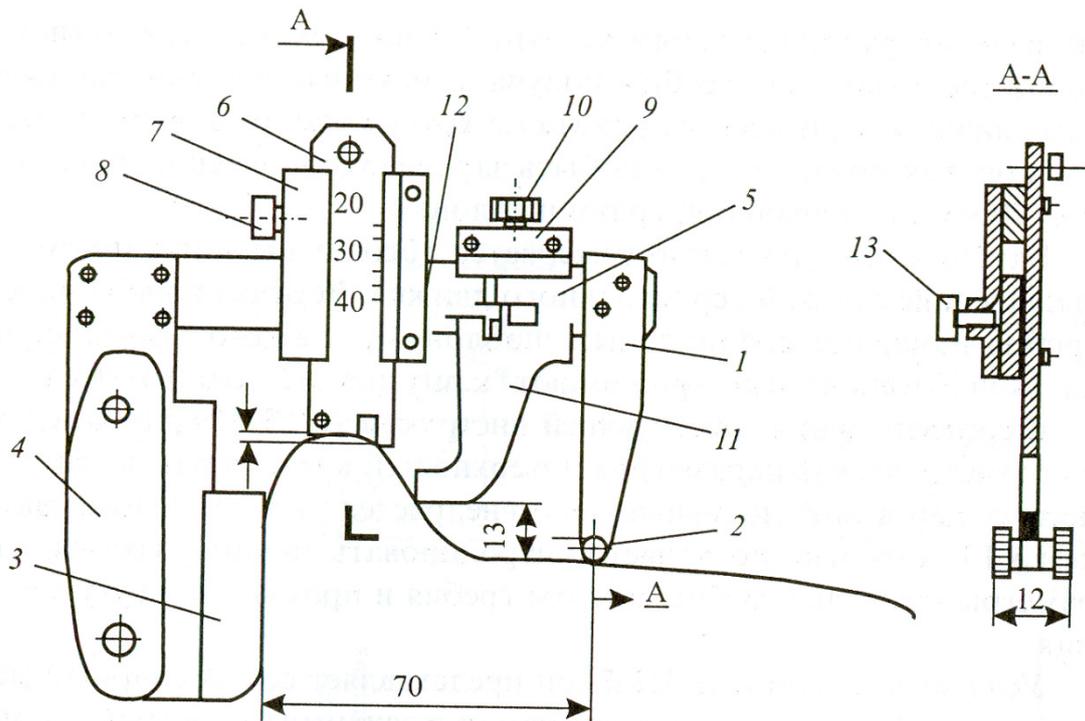


Рис. 3. Шаблон УТ-1

При подготовке шаблона к замерам контролируемого колеса освобождают все зажимные винты 8, 10, затем отводят рамку 9 с измерительной ножкой 11 вправо, отводят рамку 7 также вправо, поднимают линейку 6 вверх. Шаблон устанавливают на контролируемое колесо в его радиальной плоскости так, чтобы вертикальная опора 1 оперлась на поверхности катания, а постоянный магнит 3 плотно прилегал к внутренней грани обода.

Смещая линейку 6 по вертикали вниз до соприкосновения ее торца с вершиной гребня и сдвигая рамку 7 по горизонтали влево до упора 2 миллиметрового выступа линейки с поверхностью гребня, винтом 8 и винтом на задней части шаблона фиксируют положение линейки 6, рамки 7. Перемещают рамку 9 по горизонтальной штанге 5 влево до упора измерительной ножки 11 в поверхность гребня колеса и фиксируют рамку винтом 10. Сняв шаблон с колеса, считывают показания по трем контролируемым параметрам:

- на вертикальной линейке 6 — высота гребня;
- на шкале горизонтальной штанги-линейки 5 — толщина гребня;
- на линейке 12 — параметр крутизны гребня.

Для повышения устойчивости при опирании шаблона на круг катания вертикальный упор 1 имеет дополнительную опору 2, увеличивающую ширину опирания до 12 мм [10]. За фиксацию рамки отвечает зажимной винт 13, расположенный с тыльной стороны шаблона.

Помимо проведения измерений шаблон УТ-1 необходимо калибровать, чтобы удостовериться, что прибор точный и значения не выходят за установленные границы.

При проведении калибровки должны применяться следующие средства измерений:

- лупа типа ЛИ 3-10х ГОСТ 25706;
- образцы шероховатости ГОСТ 9378—93;
- набор щупов № 2 ТУ2-034-225—87;
- линейка ЛД-1-80 ГОСТ 8026—92;
- плита 1-1-630х500 ГОСТ 10905—86;
- плоскопараллельные концевые меры длины 4 разряда МИ 1604—87;
- стойка 15СТ-М ТУ2-034-623;
- микроскоп УИМ-23 ГОСТ 8074—82;
- микрометр МК-25 ГОСТ 6507—90.

Допускается использование других средств калибровки, имеющих аналогичные характеристики [11]. Все используемые средства калибровки должны иметь действующие документы о поверке.

На калибровку данного прибора необходимо отвести большое количество времени, так как она проводится по 11 параметрам и каждое измерение должно тщательно проверяться.

Исходя из перечисленной методики измерений колесной пары, ручной способ измерения предусматривает измерение каждого колеса отдельно, следовательно, необходимо большое количество времени, человеческих ресурсов и материально-технического обеспечения. Альтернативным способом является дистанционное измерение геометрических параметров колесных пар.

Измерение геометрических параметров колесной пары дистанционным способом

Для проведения дистанционного измерения геометрических параметров колесной пары используется система контроля колесных пар на ходу 3DWheel (рис. 4).

Система предназначена для бесконтактного автоматического измерения геометрических параметров колесных пар железнодорожного подвижного состава (локомотивов, вагонов, метро, трамваев) в реальном времени и использует комбинацию 2D лазерных сканеров, установленных по обе стороны рельса [12].

Система легко устанавливается на любом типе рельсовой инфраструктуры.

Цикл измерения начинается, когда индуктивный датчик обнаруживает колесо.

Профили колес снимаются в момент прохождения их через зону сканирования (рис. 5).

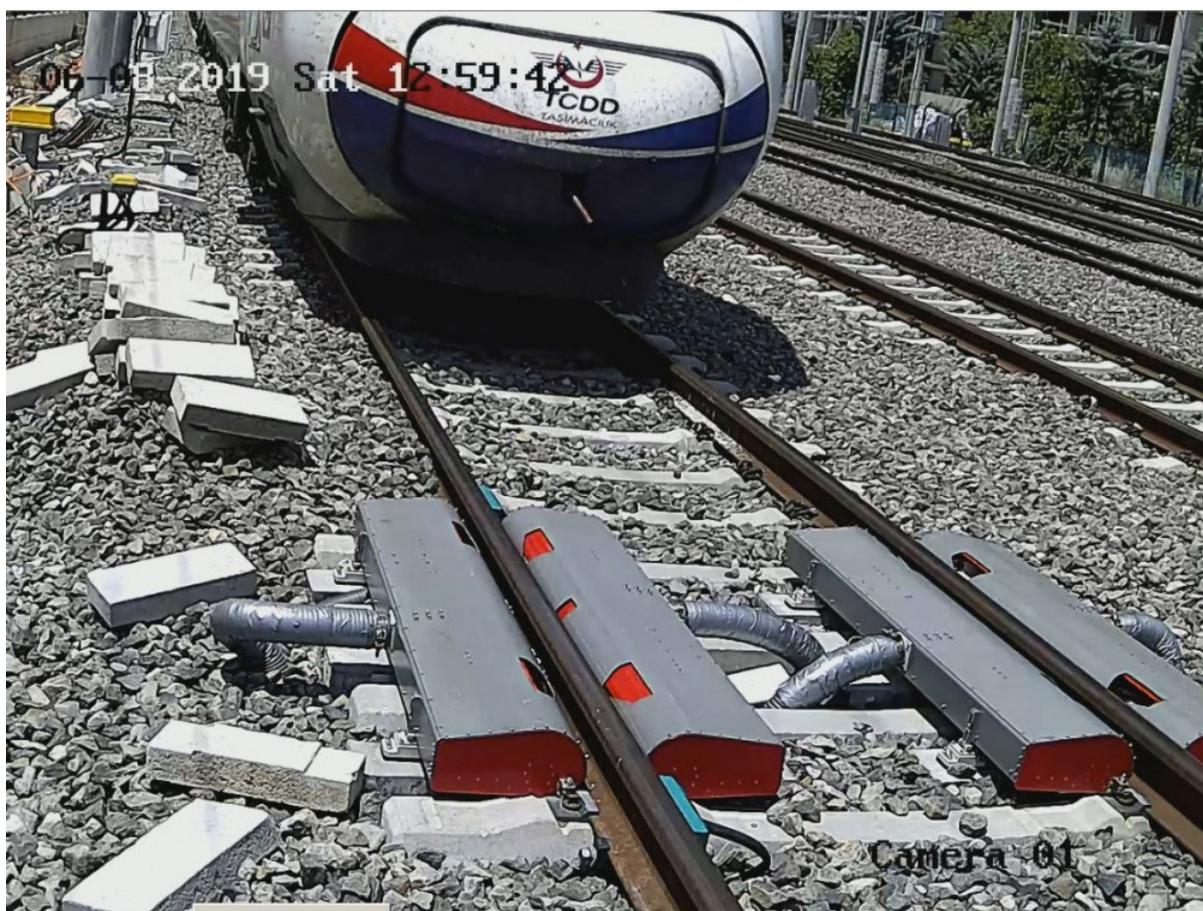


Рис. 4. Установленная система контроля колесных пар на ходу 3DWheel

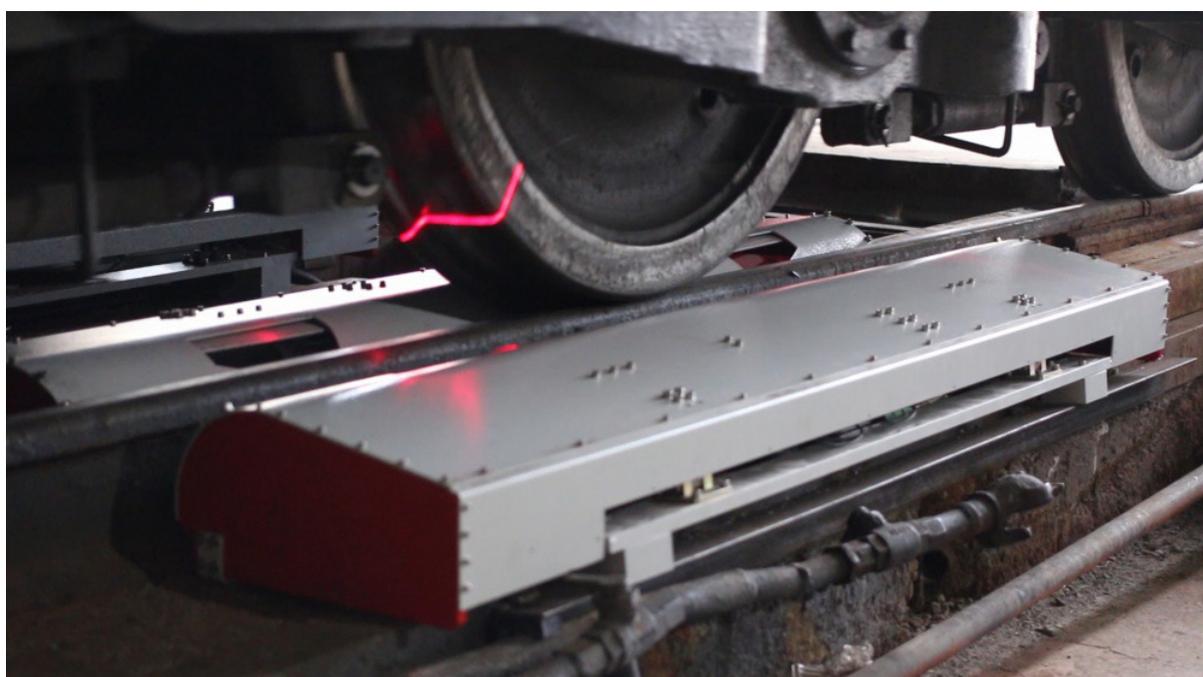


Рис. 5. Считывание геометрических параметров колесных пар системой контроля 3DWheel

ТАБЛИЦА 1. Погрешность измерений системы контроля 3DWheel при разных скоростях поезда

Измеряемые параметры	Максимальная погрешность измерения при скорости поезда		
	до 10 км/ч	до 60 км/ч	до 120 км/ч
Высота гребня, мм	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$	$\pm 0,6$
Толщин гребня, мм	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$	$\pm 0,6$
Крутизна гребня, мм	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$	$\pm 0,6$
Толщина бандажа, мм	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$
Ширина бандажа, мм	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$
Диаметр колеса, мм	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$
Межбандажное расстояние, мм	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$

Все показания измерений посылаются через Ethernet на управляющий компьютер для построения профилей колес и расчета размеров. Все результаты измерений сохраняются в базе данных управляющего компьютера.

Существуют две модели системы контроля колесных пар на ходу 3DWheel: 3DWheel.60 и 3DWheel.120. Модель 3DWheel.60 предназначена для грузовых и пассажирских поездов, максимальная скорость которых не превышает 60 км/ч. Модель 3DWheel.120 предназначена для высокоскоростных поездов, максимальная скорость которых не превышает 120 км/ч.

В табл. 1 указаны погрешности системы контроля колесных пар на ходу 3DWheel при разных скоростях поезда. Они получены экспериментальным путем и проведены многократно, что подтверждает точность максимальной погрешности измеряемых параметров.

Недостатками данной системы контроля являются его дороговизна по сравнению с ручным шаблоном и сложность выполнения калибровки системы 3DWheel.

Алгоритм выполнения калибровки системы контроля 3DWheel представлен в руководстве пользователя Real Time Wheels Geometry Measurement System [13]. Необходимые составляющие для калибровки 3DWheel представлены на рис. 6.

Из данного рисунка мы можем сделать вывод, что сложность калибровки системы контроля колесных пар на ходу 3DWheel заключается в наличии специального оборудования и знаний.

В ходе анализа статьи были выявлены риски, которые дистанционный способ измерений помогает избежать в сравнении с ручным способом. Они изображены на рис. 7.

Исходя из рис. 7 мы можем оценить полезность дистанционного способа измерений, так как он исключает большое количество рисков. Одним из важных рисков является субъективная погрешность, которая может привести к сходу поезда с рельсов, следовательно, к большим человеческим жертвам и повреждению грузов. Дистанционный способ поможет быстро среагировать и заменить колесную пару на новую, которая удовлетворяет установленным требованиям.



Рис. 6. Составляющие для калибровки системы 3DWheel

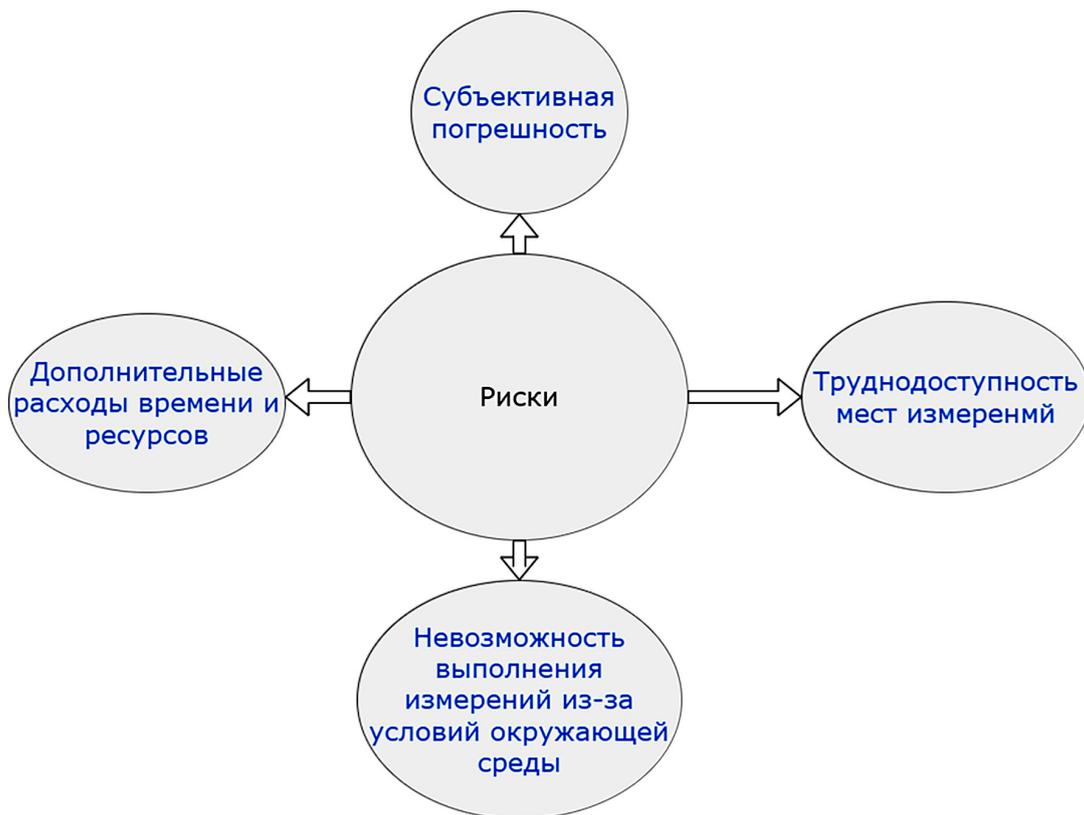


Рис. 7. Риски, возникающие при ручных измерениях геометрических параметров колесных пар

Заключение

Развитие использования дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар железнодорожных путей имеет ряд преимуществ. Дистанционная система контроля геометрических параметров колесных пар железнодорожных путей имеет следующие плюсы перед ручными измерениями:

- скорость и точность измерений выше, чем у ручных шаблонов, что дает возможность сделать более точные измерения;
- исключение человеческого фактора, появления субъективной погрешности;
- основные затраты составят покупка и установка оборудования;
- быстрое реагирование и замена колесной пары, которая не удовлетворяет установленным требованиям по полученным измерениям;
- нет необходимости в наличии большого количества осматривающих;
- не нужны рабочие для контроля процесса измерения;
- удобный доступ к измерениям;
- бесконтактный метод измерения, который выполняется на движущихся поездах;
- автоматическое распознавание номера поезда и автоматический запуск процесса измерения;
- возможность получать данные по электронной почте или SMS.

Также существуют случаи, когда прямые наблюдения сложно выполнить. Например, когда окружающая среда (ландшафт) является труднодоступной. В этом случае дистанционные измерения являются удобным решением.

Недостатками дистанционной системы контроля геометрических параметров колесных пар железнодорожных путей являются:

- дорогостоящая система относительно ручного шаблона;
- сложная методика калибровки для понимания работниками, так как необходимы знания в области компьютерного обеспечения и специальные знания об устройстве датчиков для его калибровки.

Несмотря на эти недостатки, дистанционный способ измерений геометрических параметров колесных пар точнее, быстрее и удобнее. А именно к этим свойствам и стремится технический прогресс.

Библиографический список

1. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» // Российская газета. — 2008. — № 140.
2. Кротов С. В. Контакт железнодорожного колеса с рельсом / С. В. Кротов, Д. П. Кононов, А. А. Воробьев. — Казань, 2023.

3. Валинский О. С. Повышение работоспособности колесных пар подвижного состава / О. С. Валинский, А. А. Воробьев, С. И. Губенко и др. — Казань, 2022.
4. Иванов И. А. К вопросу о влиянии структуры поверхности слоя на эксплуатационные свойства железнодорожного колеса / И. А. Иванов, С. И. Губенко, А. А. Воробьев // Транспорт Урала. — 2010. — № 2(25). — С. 56–60.
5. Орлова А. М. Определение параметров контакта колеса с рельсом для различных условий эксплуатации полувагона / А. М. Орлова, А. А. Воробьев, А. В. Саидова и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2015. — № 2(43). — С. 74–84.
6. Воробьев А. А. Исследование напряженного состояния пятна контакта колеса и рельса / А. А. Воробьев, П. Г. Сорокин // Новые материалы и технологии в машиностроении. — 2004. — № 3. — С. 8–18.
7. Приказ от 23 июня 2022 г. № 250 «Об утверждении правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации».
8. Дайлидко А. А. Конструкция электровозов и электропоездов: для студентов техникумов и колледжей железнодорожного транспорта / А. А. Дайлидко, Ю. Н. Ветров, А. Г. Брагин. — ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2014. — 346 с.
9. Николаев А. Ю. Устройство и работа электровоза ВЛ80с: учебное пособие для образовательных учреждений железнодорожного транспорта, осуществляющих профессиональную подготовку // А. Ю. Николаев, Н. В. Сесявин; под ред. А. Ю. Николаева. — М.: Маршрут, 2006. — 510 с.
10. Выписка из инструкции № ЦТ-329 от 14 июня 1996 г. «Инструкция по формированию, ремонту и содержанию колесных пар тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм».
11. Шаблон универсальный УТ-1М. Методика калибровки. 08ДК.401112.480 ДМК. — Челябинский завод измерительных приборов, 2018. — 10 с.
12. Система контроля колесных пар на ходу 3DWheel. — URL: https://riftek.com/ru/products/real_time_wheels_geometry_measurement_system/.
13. User's manual. Real time wheels geometry measurement system. 3DWheel Series // Riftek. — 2020. — 54 p.

Дата поступления: 01.02.2023

Решение о публикации: 01.03.2023

Контактная информация:

НУРИЕВ Али Гасаналиевич — студент; informatiks20@gmail.com

ЧИСТЯКОВ Эдуард Юрьевич — ст. преподаватель; chistyakov@pgups.ru

БИТЮЦКИЙ Никита Александрович — канд. техн. наук, доц. кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»; bna@engcenter.ru

Development of the Usage of Remote Measurements to Define Wheelset Geometric Parameters

A. G. Nuriev, E. Y. Chistyakov, N. A. Bitutsky

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Nuriev A. G., Chistyakov E. Yu., Bityutsky N. A. Development of the Usage of Remote Measurements to Define Wheelset Geometric Parameters. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 7–18. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-7-18

Summary

Purpose: Measuring is an important process for finding any physical quantity values. Any measurement primary requirement is an accuracy. Processes are being replaced, improved and automated gradually. Geometric parameter measurement has become one of the most popular processes in all industries. With its improvements, the first achievements have begun. The development of the usage of remote measurements to determine wheelset geometric parameters will give huge advantages over manual measurements for railway industry as they will facilitate and accelerate measurement process with minimal error. The article is devoted to the study of remote measurement application to determine wheelset geometric parameters. The article considers the advantages of remote measurement usage when conducting wheelset geometric research. The authors propose methods and algorithms that can be used for more accurate definition of wheelset geometric parameters. The authors also propose a number of recommendations on the use of remote measurements at wheelset investigation to achieve maximum measurement accuracy. In addition, the risks of manual templates, which remote measurement method helps to avoid, are considered. Besides the measurements themselves, which are implemented by manual and remote methods, their calibrations are also considered. The calibration of manual template UT-1 in accordance with its calibration methodology is described as well as the difficulties in the calibration of wheelset control system 3DWheel on a move are given, the scheme, which shows the components for this template calibration, is given. In conclusion, the authors discuss the prospects of further use of remote measurements to research wheelset geometry. The work purpose is to consider the application of remote measurements to define wheelset geometric parameters. **Methods:** Evaluation of the use of remote measurements to determine wheelset geometric parameters on tester examples. **Results:** The possibility to use remote measurements to define wheelset geometric parameters is determined, advantages and disadvantages over manual measurements are revealed. **Practical importance:** The capability of using remote measurements to define wheelset geometric parameters is evaluated that'll lower the costs on hand template transportation for template periodic calibration and reduce the time spent on metrological maintenance.

Keywords: Remote measurement, informational technologies, wheelset, manual measurements, UT-1 template, error.

References

1. Federal'nyy zakon ot 26 iyunya 2008 g. № 102-FZ “Ob obespechenii edinstva izmereniy” [Federal Law № 102-FZ of 26.06.2008 “On ensuring the uniformity of measurements”]. *Rossiyskaya Gazeta* [Russian newspaper]. 2008, № 140. (In Russian)
2. Krotov S. V., Kononov D. P., Vorobyov A. A. *Kontakt zheleznodorozhnogo koleasa s rel'som* [Contact of a railway wheel with a rail]. Kazan, 2023. (In Russian)
3. Valinsky O. S., Vorobyov A. A., Gubenko S. I. et al. *Povyshenie rabotosposobnosti kolesnykh par podvizhnogo sostava* [Improving the performance of wheel sets of rolling stock]. Kazan, 2022. (In Russian)

4. Ivanov I. A., Gubenko S. I., Vorobyev A. A. K voprosu o vliyaniy struktury poverkhnosti sloya na ekspluatatsionnye svoystva zheleznodorozhnogo koleasa [On the question of the influence of the layer surface structure on the operational properties of the railway wheel]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2010, Iss. 2(25), pp. 56–60. (In Russian)

5. Orlova A. M., Vorobyov A. A., Saidova A. V. et al. Opredelenie parametrov kontakta koleasa s rel'som dlya razlichnykh usloviy ekspluatatsii poluvagona [Determination of parameters of wheel-rail contact for various operating conditions of a gondola car]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University]. 2015, Iss. 2(43), pp. 74–84. (In Russian)

6. Vorobyev A. A., Sorokin P. G. Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya pyatna kontakta koleasa i rel'sa [Investigation of the stress state of the contact spot of the wheel and rail]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii* [New materials and technologies in mechanical engineering]. 2004, Iss. 3, pp. 8–18. (In Russian)

7. *Prikaz ot 23 iyunya 2022 g. № 250 “Ob utverzhdenii pravil tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii”* [Order № 250 dated June 23, 2022 “On Approval of the Rules of Technical Operation of Railways of the Russian Federation”]. (In Russian)

8. Dailidko A. A., Vetrov Yu. N., Bragin A. G. *Konstruktsiya elektrovozov i elektropoezdov: dlya studentov tekhnikumov i kolledzhey zheleznodorozhnogo transporta* [Construction of electric locomotives and electric trains: for students of technical schools and colleges of railway transport]. FGBOU “Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zh.-d. transporte” [FGBOU “Educational and Methodological Center for education on railway transport”], 2014, 346 p. (In Russian)

9. Nikolaev A. Y., Sesyavin N. V. *Ustroystvo i rabota elektrovoza VL80c: uchebnoe posobie dlya obrazovatel'nykh uchrezhdeniy zheleznodorozhnogo transporta, osushchestvlyayushchikh professional'nyu podgotovku* [The device and operation of the VL80s electric locomotive: a textbook for educational institutions of railway transport engaged in professional training]. Moscow: Marshrut Publ., 2006, 510 p. (In Russian)

10. *Vypiska iz instruktsii № TsT-329 ot 14 iyunya 1996 g. “Instruktsiya po formirovaniyu, remontu i sodержaniyu kolesnykh par tyagovogo podvizhnogo sostava zheleznykh dorog kolei 1520 mm”* [Extract from Instruction № TsT-329 dated June 14, 1996 “Instructions for the Formation, Repair and Maintenance of Wheel Sets of Traction Rolling Stock of 1520 mm Gauge Railways”]. (In Russian)

11. *Shablon universal'nyy UT-1M. Metodika kalibrovki. 08DK.401112.480 DMK* [Universal template UT-1M. Calibration procedure. 08DK.401112.480 DMK]. Chelyabinskii zavod izmeritel'nykh priborov [Chelyabinsk Plant of measuring instruments], 2018, 10 p.

12. *Cistema kontrolya kolesnykh par na khodu 3DWheel* [Wheelset control system on the move 3DWheel]. Available at: https://riftek.com/ru/products/real_time_wheels_geometry_measurement_system/. (In Russian)

13. User Manual. Real-time wheel geometry measurement system. 3DWheel series. Riftek, 2020, 54 p.

Received: February 01, 2023

Accepted: March 01, 2023

Author's information:

Ali G. NURIEV — Student; informatiks20@gmail.com

Eduard Yu. CHISTYAKOV — Senior Lecturer; chistyakov@pgups.ru

Nikita A. BITYUTSKY — PhD in Engineering, Associate Professor, “Ground Transport and Technological Complexes” Department; bna@engcenter.ru

К вопросу выбора наиболее рационального сочетания землеройной и транспортной техники при производстве земляных работ

Н. М. Панченко, Д. А. Басовский

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Панченко Н. М., Басовский Д. А. К вопросу выбора наиболее рационального сочетания землеройной и транспортной техники при производстве земляных работ // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 19–25. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-19-25

Аннотация

Цель: Анализ проблемы выбора оптимального комплекта машин при возведении объектов транспортного строительства. Проблема выбора рационального сочетания техники в землеройных комплектах всегда является актуальной. Производительность строительного процесса, сроки строительства, трудозатраты, себестоимость продукции и многие другие показатели эффективности строительства зависят от того, насколько рационально подобрана техника в строительных комплектах машин. **Методы:** Инструментом для исследования и анализа проблемы выбора оптимального комплекта машин при возведении объектов транспортного строительства являются расчетные формулы теории надежности, теории больших систем и теории массового обслуживания. Так как строительные процессы, рассматриваемые автором, обладают всеми признаками больших систем, они динамичны и могут быть вероятностно прогнозируемы. **Результаты:** В статье предложены варианты рационального сочетания землеройной и транспортной техники для систем «экскаватор — самосвалы» применительно к комплектам техники с машинами, имеющими различные технические параметры, и для различной дальности транспортирования грунта. Представленные варианты получены путем расчета с использованием математического аппарата теорий надежности и массового обслуживания. **Практическая значимость:** Представленные авторами результаты предложены в удобной для использования табличной форме и имеют практическую значимость, так как в случае применения их строительными организациями способны повысить производительность строительного процесса и сократить сроки строительства объектов.

Ключевые слова: Теория массового обслуживания, землеройная и транспортирующая техника, теория вероятности, рациональное сочетание строительной техники, производительность строительного процесса, земляные работы.

При проектировании и последующем возведении строительных объектов особенно важным является, чтобы эти объекты были выстроены и запущены в намеченные планом сроки, чтобы их качественные характеристики соответствовали действующим стандартам качества и требованиям потребителя. Кроме этого, необходимо учитывать и такие аспекты, как при наименьших затратах рабочего времени людей и машин, человеческих, технических, энергетических ресурсов, материалов получить максимальную прибыль. Создание принципиально новых производительных машин является процессом достаточно длительным и весьма затратным. Доказано, что чем больше в любую продукцию (будь то машина,

конструкция, объект) вложено интеллекта, тем эта продукция будет дороже [1]. Да и не всегда применение наиболее производительной машины дает при строительстве объектов желаемый результат. Обычно такое применение влечет за собой изменение технологии или смену парка машин, что увеличивает затраты на строительство данного объекта. Строитель заинтересован в снижении затрат, поэтому решением данной проблемы может послужить применение таких комплектов строительной техники, которые обеспечивали бы максимальную производительность работ и при этом, в процессе своего функционирования, имели бы минимальные простои рабочего времени. Такие комплекты обозначим как комплекты с наиболее рациональным сочетанием техники.

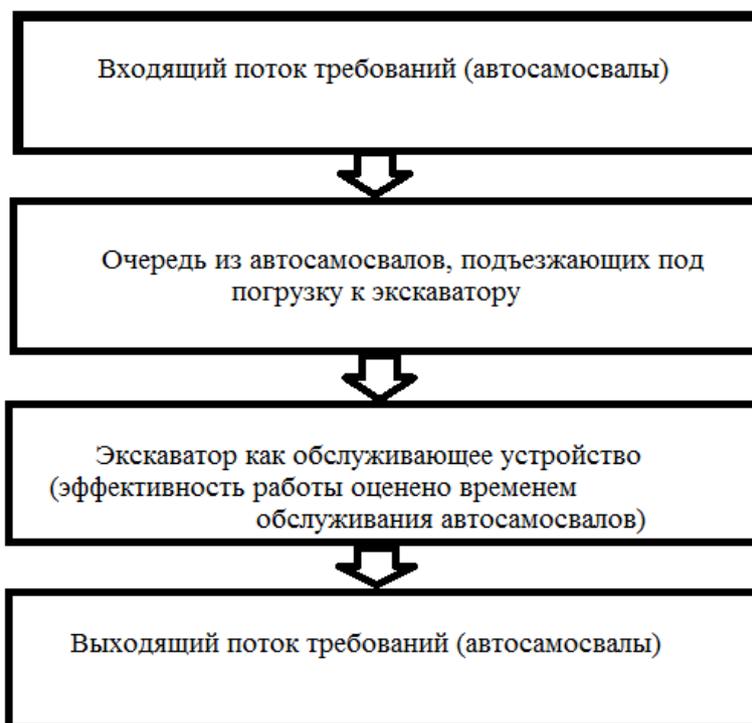
Распространенными объектами транспортной инфраструктуры являются: земляное полотно автомобильных и железных дорог, металлические и железобетонные трубы, мосты. Для возведения подобных объектов обычно применяют самый универсальный комплект техники, в состав которого входит строительный экскаватор и автосамосвалы. От того, насколько ритмично будут выполняться работы, какой процент простоев от времени рабочей смены той или иной техники, зависят эффективность функционирования строительного процесса и сроки введения объекта в эксплуатацию. Поэтому решение проблемы выбора комплекта машин с наиболее рациональным сочетанием техники представлено на примере процесса производства земляных работ для комплекта техники «экскаватор — самосвалы».

Доказано, что любой строительный процесс состоит из элементов (рабочих и техники), в процессе функционирования элементы взаимодействуют между собой, образуя прямые и обратные связи, сочетаются и образуют микросистемы, которые, в свою очередь, объединяются в макросистемы — возведение объекта в целом [2]. Данные системы функционируют, подчиняясь законам теории вероятностей, так как на них оказывают свое влияние множество факторов, имеющих вероятностный характер, например:

- поломки машин и механизмов;
- низкое качество материалов и конструкций;
- незапланированные изменения в проекте строительства, произошедшие в момент проведения строительных работ;
- устранение возникшего в процессе строительства брака;
- факторы климатические, социальные и др.

Взаимодействие между элементами процесса в микросистеме также имеет вероятностный характер [3]. Например, при возведении участка земляного полотна самосвалы (вспомогательные машины строительного процесса) маневрируют по строительной площадке и встают под погрузку к экскаватору (ведущей машине строительного процесса), образуя очередь. Чтобы обеспечить данной системе бесперебойное функционирование, нужно оптимизировать простои машин, на

которые влияет множество факторов: от технического состояния и количества машин, атмосферных явлений, качества дорог до расстояния, на которое требуется перемещаться самосвалу. Все факторы учесть невозможно, но добиться оптимизации простоя машин за счет наиболее рационального сочетания техники в комплекте можно, воспользовавшись математическим аппаратом теории массового обслуживания [4]. Структура анализируемой системы массового обслуживания представлена на рисунке.



Структура системы массового обслуживания «экскаватор — автосамосвалы»

В качестве примера определим наиболее рациональное сочетание единиц техники для комплекта, состоящего из строительного экскаватора JCB с емкостью ковша: $q = 0,9 \text{ м}^3$, $q = 1,19 \text{ м}^3$, $q = 1,2 \text{ м}^3$, $q = 1,85 \text{ м}^3$ и автосамосвалов КАМАЗ-43255 грузоподъемностью 7 т и КАМАЗ-43118-46 грузоподъемностью 10 т, при различной дальности транспортировки грунта. Входящим потоком требований в данной системе массового обслуживания являются автосамосвалы, подъезжающие под погрузку к экскаватору. Такой поток требований подчиняется закону распределения Пуассона, поэтому является простейшим. На обработку и обслуживание каждого требования необходимо время, поэтому возможно образование очереди, возникает простой техники при наличии очереди, простой автосамосвалов, при отсутствии очереди — экскаватора. Возникают вопросы, насколько загружена система массового обслуживания и каков процент простоя техники от времени рабочей смены [5].

ТАБЛИЦА

Комплект техники	Рациональные параметры работы техники	Дальность транспортировки грунта, км					
		0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
экскаватор JCB $q = 0,9 \text{ м}^3$, автосамосвалы КАМАЗ-43255, $q = 7 \text{ т}$	простой экскаватора P_0 , %	7,9	9,6	9,5	10,3	9,1	8,7
	простой каждого самосвала в комплекте T_a , %	30,2	28,0	26,0	24,1	23,8	21,5
	количество самосвалов N , шт.	5	6	8	9	11	14
экскаватор JCB $q = 1,19 \text{ м}^3$, автосамосвалы КАМАЗ-43255, $q = 7 \text{ т}$	простой экскаватора P_0 , %	12,9	10,7	8,2	8,0	9,8	10,7
	простой каждого самосвала в комплекте T_a , %	23,5	26,7	29,2	28,3	24,5	22,5
	количество самосвалов N , шт.	4	5	6	8	9	11
экскаватор JCB $q = 1,85 \text{ м}^3$, автосамосвалы КАМАЗ-43255, $q = 7 \text{ т}$	простой экскаватора P_0 , %	15,3	12,5	14,3	8,4	11,5	9,5
	простой каждого самосвала в комплекте T_a , %	21,6	25,0	20,3	26,5	21,2	22,0
	количество самосвалов N , шт.	4	5	7	9	10	13
экскаватор JCB $q = 1,85 \text{ м}^3$, автосамосвалы КАМАЗ-43118-46, $q = 10 \text{ т}$	простой экскаватора P_0 , %	10,2	14,8	8,5	14,4	8,3	12,7
	простой каждого самосвала в комплекте T_a , %	26,0	22,3	29,4	24,7	27,9	22,6
	количество самосвалов N , шт.	4	5	6	6	8	9

В качестве обслуживающего устройства принимаем экскаватор и оцениваем его работу согласно тому времени, которое он затрачивает на обслуживание одного требования, поступление более одного требования на обслуживание в течение малого промежутка времени исключается [6]. Под выходящим потоком будем понимать автосамосвалы, загруженные и перемещающиеся к месту отсыпки грунта.

Количество входящих и выходящих требований, время их поступления и обслуживания — все это случайные величины, которые подвержены влиянию случайных факторов. Следовательно, выше описанная система массового обслуживания будет считаться вероятностной или стохастической системой [7, 8].

Методика для расчета наиболее рационального сочетания техники в экскаваторном комплекте подробно представлена в работах [9, 10]. Применение данной методики в качестве математического аппарата для расчетов выбранной нами строительной системы дали результаты, которые представлены в таблице.

Расчет был произведен с использованием конкретных марок машин с наиболее часто применяемыми в строительстве техническими параметрами (емкость ковша и грузоподъемность) и для определенных дальностей транспортирования грунта к месту его отсыпки — от 0,5 км до 5,0 км с шагом, кратным 1 км.

В представленной таблице четко просматриваются рациональные параметры работы техники для соответствующего экскаваторного комплекта: какое количество автосамосвалов при определенном расстоянии дальности возки грунта будет

являться оптимальным и какой процент от времени рабочей смены будет при этом простаивать каждая из машин.

Полученными результатами расчета, сведенными в таблицу, удобно пользоваться.

Вывод: любой строительный процесс следует рассматривать с точки зрения вероятностной (стохастической) системы, для определения рационального сочетания техники в экскаваторных комплектах использование математического аппарата теории массового обслуживания дает возможность получения результатов с высокой степенью достоверности для любой системы «экскаватор — автосамосвалы» с заданными техническими параметрами данной техники и расстоянием транспортировки грунта. Использование полученных результатов позволит строительным организациям — производителям земляных работ наилучшим образом организовать строительный процесс с наименьшими простоями техники, а следовательно, сократить сроки строительства и повысить эффективность строительного процесса.

Библиографический список

1. Неснов В. И. Бизнес и политика в теории эргатических систем / В. И. Неснов. — СПб., 2000. — 142 с.
2. Гусаков А. А. Моделирование организационно-технологической надежности строительства / А. А. Гусаков, Ю. Б. Монфред, Б. В. Прыкин. — М.: SVR-Аргус, 1994. — 472 с.
3. Губинский А. И. Надежность и качество функционирования эргатических систем / А. И. Губинский. — Л.: Наука, 1982. — 262 с.
4. Панченко Н. М. К вопросу выбора комплекта строительной техники при производстве земляных работ / Н. М. Панченко // Вопросы образования и науки: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, 30 июня 2020 г. — Тамбов, 2020. — Ч. 1. — С. 85–87.
5. Спиридонов Э. С. Научные основы оптимизации организации и управления комплексом работ по переустройству транспортных объектов / Э. С. Спиридонов, А. В. Максимов. — М.: Известия, 1998. — 290 с.
6. Половко А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С. В. Гуров. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. — 704 с.
7. Соболев В. И. Совершенствование организационно-технологического проектирования строительного производства: монография / В. И. Соболев. — Новочеркасск: Юж.-Рос. гос. техн. ун-т, 2001. — С. 86–96.
8. Соболев В. И. Экономико-математическое моделирование организации строительных работ / В. И. Соболев, В. В. Соболев // Научная мысль Кавказа: сборник трудов. — Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский научный центр высшей школы Южного федерального университета, 2002. — С. 85–90.
9. Панченко Н. М. Выбор рационального сочетания землеройной и транспортной техники при производстве земляных работ / Н. М. Панченко // Тенденции развития науки и образования. Рецензируемый научный журнал. — 2022. — № 87. — Ч. 3. — С. 70–74.

10. Панченко Н. М. К вопросу оценки качества функционирования технологических процессов в строительстве через их производительность и сроки выполнения работ / Н. М. Панченко // Тенденции развития науки и образования. Рецензируемый научный журнал. — 2021. — № 78. — Ч. 2. — С. 90–93.

Дата поступления: 23.12.2022

Решение о публикации: 07.02.2023

Контактная информация:

ПАНЧЕНКО Наталия Михайловна — канд. техн. наук, доц.; panchnat@rambler.ru

БАСОВСКИЙ Дмитрий Аркадьевич — канд. техн. наук, доц.; basovskiy76@mail.ru

On the Issue of Choice of the Most Rational Combination of Earth-Moving and Transport Equipment in Earthwork Production

N. M. Panchenko, D. A. Basovskiy

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Panchenko N. M., Basovskiy D. A. On the Issue of Choice of the Most Rational Combination of Earth-Moving and Transport Equipment in Earthwork Production. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 19–25. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-19-25

Summary

Purpose: Analysis of the problem of choosing the optimal set of machines in the building of transport construction facilities. The problem of choosing equipment rational combination choice in earthmoving sets is always relevant. Construction process productivity, construction time, labor costs, production costs and many other indicators of construction efficiency depend on how rationally equipment is chosen in machine construction sets. **Methods:** The calculation formulas of reliability theory, the theory of large systems and mass service theory are the tool for the research and analysis of the issue of machine optimal set choice at transport facility construction. Since construction processes, being considered by the author, possess all the features of large systems, they are dynamic and can be probabilistically predictable. **Results:** The article proposes options for rational combination of earth-moving and transport equipment for “excavator — dump trucks” systems in relation to sets of equipment with machines having different technical parameters and for different ranges of soil transportation. The presented variants are obtained by calculation using mathematical apparatus of reliability and mass service theories. **Practical significance:** The results, presented by the authors, are proposed in easy-to-use tabular form and have practical significance, since if used by construction organizations, they are capable to increase construction process productivity and to reduce facility construction time.

Keywords: Mass service theory, earth-moving and transporting equipment, probability theory, rational combination of construction equipment, construction process productivity, earthworks.

References

1. Nesnov V. I. *Biznes i politika v teorii ergaticheskikh sistem* [Business and politics in the theory of ergatic systems]. St. Petersburg, 2000, 142 p. (In Russian)

2. Gusakov A. A., Monfred Yu. B., Prykin B. V. *Modelirovanie organizatsionno-tekhnologicheskoy nadezhnosti stroitel'stva* [Modeling of organizational and technological reliability of construction]. Moscow: SVR-Argus Publ., 1994, 472 p. (In Russian)
3. Gubinsky A. I. *Nadezhnost' i kachestvo funktsionirovaniya ergaticheskikh sistem* [Reliability and quality of functioning of ergatic systems]. L.: Science Publ., 1982, 262 p. (In Russian)
4. Panchenko N. M. *K voprosu vybora komplekta stroitel'noy tekhniki pri proizvodstve zemlyanykh rabot. Voprosy obrazovaniya i nauki: sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 30 iyunya 2020 g.* [On the issue of choosing a set of construction equipment in the production of earthworks. Questions of education and science. Collection of scientific papers based on the materials of the international scientific and practical conference June 30, 2020]. Tambov, 2020, part 1, pp. 85–87. (In Russian)
5. Spiridonov E. S., Maksimov A. V. *Nauchnye osnovy optimizatsii organizatsii i upravleniya kompleksom rabot po pereustroystvu transportnykh ob'ektov* [Scientific basis for optimizing the organization and management of a set of works on the reconstruction of transport facilities]. Moscow: Izvestia Publ., 1998, 290 p. (In Russian)
6. Polovko A. M., Gurov S. V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of the theory of reliability]. St. Petersburg: BHV-Petersburg Publ., 2008, 704 p. (In Russian)
7. Sobolev V. I. *Sovershenstvovanie organizatsionno-tekhnologicheskogo proektirovaniya stroitel'nogo proizvodstva: monografiya* [Improvement of organizational and technological design of building production: monograph]. Novocherkassk: Yuzh.-Ros. gos. tekhn. un-t Publ., 2001, pp. 86–96. (In Russian)
8. Sobolev V. I., Sobolev V. V. *Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie organizatsii stroitel'nykh rabot* [Economic and mathematical modeling of the organization of construction works]. *Nauchnaya mysl' Kavkaza: sbornik trudov* [Scientific thought of the Caucasus: a collection of works]. Rostov-on-Don: Severo-Kavkazskiy nauchnyy tsentr vysshey shkoly Yuzhnogo federal'nogo universiteta Publ., 2002, pp. 85–90. (In Russian)
9. Panchenko N. M. *Vybor ratsional'nogo sochetaniya zemleroynoy i transportnoy tekhniki pri proizvodstve zemlyanykh rabot* [The choice of a rational combination of earth-moving and transport equipment in the production of earthworks]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya. Retsenziruemyy nauchnyy zhurnal* [Trends in the development of science and education. Peer-reviewed scientific journal]. 2022, Iss. 87, part 3, pp. 70–74. (In Russian)
10. Panchenko N. M. *K voprosu otsenki kachestva funktsionirovaniya tekhnologicheskikh protsessov v stroitel'stve cherez ikh proizvoditel'nost' i sroki vypolneniya rabot* [On the issue of assessing the quality of the functioning of technological processes in construction through their productivity and terms of work]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya. Retsenziruemyy nauchnyy zhurnal* [Trends in the development of science and education. Peer-reviewed scientific journal]. 2021, Iss. 78, part 2, pp. 90–93. (In Russian)

Received: December 23, 2022

Accepted: February 07, 2023

Author's information:

Nataliya M. PANCHENKO — PhD in Engineering, Associate Professor; panchnat@rambler.ru

Dmitriy A. BASOVSKIY — PhD in Engineering, Associate Professor; basovskiy76@mail.ru

Методы расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна высокоскоростных магистралей в условиях холодного климата в КНР

Ван Синьтун, А. Ф. Колос, А. В. Петряев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Ван Синьтун, Колос А. Ф., Петряев А. В. Методы расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна высокоскоростных магистралей в условиях холодного климата в КНР // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 26–37. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-26-37

Аннотация

Цель: Разрабатываются методы расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна высокоскоростных магистралей с учетом его многослойной конструкции. **Методы:** Рассмотрены существующие методы расчета глубины промерзания грунта, предложены усовершенствованный метод Берггрена для расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна ВСМ и метод численного моделирования температурного режима земляного полотна на основе математической модели с учетом миграции влаги. Достоверность расчетов подтверждается сравнением с результатами численного моделирования и результатами расчета методом по китайским и российским нормам строительства железных дорог. **Результаты:** Результаты расчетов глубины промерзания земляного полотна по разным методам аналогичны. Усовершенствованный метод Берггрена целесообразно использовать для расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна многослойной системы. Метод численного моделирования дает возможность прогнозировать глубину промерзания грунта, в том числе изменение глубины промерзания и оттаивания, вызванных потеплением климата. **Практическая значимость:** Для расчета глубины промерзания земляного полотна ВСМ целесообразно применять усовершенствованный метод Берггрена. Разработанная модель может быть использована как для изучения закономерности распределения теплового режима земляного полотна при промерзании и оттаивании, так и для проектирования толщины защитных слоев от мороза для конструкции земляного полотна высокоскоростных магистралей.

Ключевые слова: Глубина промерзания грунтов, земляное полотно высокоскоростных магистралей, усовершенствованный метод Берггрена, численное моделирование, температурный режим.

Введение

Глубина сезонного промерзания является наибольшей глубиной промерзания грунта за год [1], под слоем сезонного промерзания находятся немерзлые грунты. В условиях холодного климата глубина промерзания значительно влияет на прогнозирование пучения грунтов земляного полотна, проектирование морозозащитных слоев земляного полотна. Таким образом, расчет глубины промерзания является важной задачей при изучении температурного режима земляного полотна и определение ее значения актуально для проектирования и строительства железных дорог.

В нормах проектирования высокоскоростных магистралей разных стран конструкция земляного полотна ВСМ обычно устанавливается с двумя защитными слоями с целью обеспечения несущей способности, исключения неравномерных остаточных деформаций, в том числе деформаций морозного пучения. В связи с этим при проектировании защитных слоев общая их толщина должна быть больше, чем глубина промерзания грунтов земляного полотна.

В настоящее время методы расчета глубины промерзания грунта земляного полотна в основном базируются на формулах для проектирования однослойной конструкции земляного полотна железных дорог, это не полностью применимо к требованиям для двухслойной конструкции земляного полотна ВСМ. Поэтому в данной работе рассмотрены существующие методы расчета глубины промерзания грунта, предложен усовершенствованный метод Берггрена для расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна ВСМ. Кроме этого, приведен пример расчета на основе климатических условий на северо-востоке КНР. Достоверность расчетов подтверждается сравнением с результатами численного моделирования и результатами расчета существующих в КНР и РФ методов.

Существующие методы расчета глубины промерзания грунта

В связи со сложностью процессов, происходящих в грунтах при замерзании, глубина промерзания грунтов зависит от многих метеорологических и теплофизических факторов, например продолжительности отрицательной температуры воздуха, типа грунта, его влажности, толщины снежного покрова и других. Многие исследователи или ученые занимались вопросами определения глубины промерзания грунтов и предлагали разнообразные методы и способы, по которым можно определить глубины промерзания. Существующие методы расчета глубины промерзания грунта можно разделить на теоретические, эмпирические и статистические.

Одной из первых теоретических формул для определения глубины промерзания однородного грунта является формула Стефана [2]:

$$h = \sqrt{\frac{2,23kF}{L}}, \quad (1)$$

где h — глубина промерзания грунта, м;

k — теплопроводность, Дж / (с · м² · °С);

F — индекс промерзания, определен суммой градусо-дней с отрицательными температурами при промерзании грунта, °С · дни ;

L — скрытая теплота плавления, Дж / м³.

В связи с непрактичностью точных математических решений задачи Стефана многими исследователями (В. С. Лукьянов, И. А. Золотарь, П. А. Пузаков,

А. В. Павлов, В. М. Сиденко и т. д.) разработаны приближенные решения [3]. Более того, в связи со сложностью формул, при практических расчетах разработаны номограммы.

Для упрощения определения глубины промерзания мерзлотооведами предложены эмпирические формулы, разработанные на основе наблюдаемых данных глубины промерзания в естественных условиях [3–5]. Но эмпирические формулы характеризуются ограниченностью применения при разных условиях.

К настоящему времени исследователями разработан метод определения глубины промерзания, основанный на статистических данных наблюдений. И. И. Леонovich [6] предложил эмпирические способы для определения глубины промерзания при наличии или отсутствии фактических данных о ней.

По норме, представленной в «Проектировании оснований и фундаментов зданий и сооружений в Китае» [7], нормативную глубину промерзания принимают равной средней из ежегодных максимальных глубин сезонного промерзания грунтов (по данным наблюдений за период не менее 10 лет) на открытой, оголенной от снега горизонтальной площадке при уровне подземных вод, расположенном ниже глубины сезонного промерзания грунтов, при отсутствии данных наблюдений нормативную глубину определяют по карте изолиний нормативной глубины сезонного промерзания, составленной в [7]. При проектировании земляного полотна железных дорог [8] в Китае расчетная глубина Z_d определяется по формуле:

$$Z_d = Z_0 \cdot \psi_{zs} \cdot \psi_{zw} \cdot \psi_{zc} \cdot \psi_{zt0}, \quad (2)$$

где Z_0 — нормативная глубина промерзания грунта, м;

ψ_{zs} — коэффициент, зависящий от типов грунта;

ψ_{zw} — коэффициент, зависящий от характера пучения;

ψ_{zc} — коэффициент, зависящий от условий окружающей среды;

ψ_{zt0} — коэффициент, зависящий от рельефа местности.

При проектировании земляного полотна железнодорожного пути в РФ по СП 32-104—98 [9] расчетная глубина промерзания определяется произведением поправочных коэффициентов по формуле:

$$Z_d = qnm \cdot Z_{\max}, \quad (3)$$

где q — коэффициент, учитывающий вид дренирующего грунта;

n — коэффициент, учитывающий вид конструкции земляного полотна;

m — коэффициент, учитывающий увеличение глубины промерзания земляного полотна по сравнению с многолетними и средними данными;

Z_{\max} — максимальная глубина сезонного промерзания земляного полотна из дренирующих грунтов от верха балластной призмы; определяется по среднему

многолетнему значению суммы градусо-дни ($\Omega, ^\circ\text{C} \cdot \text{сут.}$) отрицательных температур наружного воздуха с помощью номограммы, которую принимают по [10].

При дорожном строительстве методы определения глубины промерзания грунтов земляного полотна, принимаемые в Японии и Франции путем эмпирической формулы, аналогичны (используется индекс промерзания). В Германии на основании измерений территория подразделяется на три дорожно-климатические зоны, толщина защитных слоев от мороза определяется в разных дорожно-климатических зонах с учетом категории линий, уровня нагрузки и скорости движения.

Усовершенствованный метод Берггрена

Усовершенствованный метод Берггрена представляет собой одномерное решение для расчета глубины промерзания многослойной конструкции, по которому глубина промерзания X определяется по формуле [11]:

$$X = \lambda \sqrt{\frac{172800kF}{L}}, \quad (4)$$

где λ — безразмерный коэффициент;

k — теплопроводность грунта, $\text{кал} / \text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}$;

L — скрытая теплота плавления льда, $\text{кал} / \text{см}^3$;

F — индекс промерзания, определенный суммой градусо-дней с отрицательными температурами при промерзании грунта, $^\circ\text{C} \cdot \text{сут.}$

Для многослойной системы значение $\frac{L}{k}$ в формуле (4) определяется в следующем виде:

$$\frac{L}{k} = \frac{2}{X^2} \left[L_1 d_1 \left(\frac{d_1}{2k_1} \right) + L_2 d_2 \left(\frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{2k_2} \right) + \dots + L_n d_n \left(\frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \dots + \frac{d_n}{2k_n} \right) \right], \quad (5)$$

где k_i — теплопроводность грунта в i -ом слое, $\text{кал} / \text{см} \cdot \tilde{n} \cdot ^\circ\text{C}$;

L_i — скрытая теплота плавления льда в i -го слое, $\text{кал} / \text{см}^3$;

d_i — толщина i -го слоя, см ;

X — глубина промерзания, в том числе $X = \sum_{i=1}^n d_i$, см .

Формула (4) отличается от формулы Стефана (3) безразмерным коэффициентом λ , зависящим от критерия температурного отношения α и критерия фазовых переходов μ :

критерий температурного отношения α :

$$\alpha = \frac{T}{F/t}; \quad (6)$$

критерий фазовых переходов μ :

$$\mu = \frac{Q_{wt}T}{L_{wt}t}, \quad (7)$$

где T — среднегодовая температура воздуха, °С ;

F — индекс промерзания, °С · сут ;

t — продолжительность промерзания, сут ;

Q_{wt} — средневзвешенная теплоемкость, $Q_{wt} = \frac{1}{X} \sum_{i=1}^n Q_i \cdot d_i$, кал / (см³ · °С);

L_{wt} — средневзвешенная скрытая теплота, $L_{wt} = \frac{1}{X} \sum_{i=1}^n L_i \cdot d_i$, кал / см³;

Q_i — теплоемкость грунта в i -ом слое, кал / см³ · °С.

Коэффициент λ может определяться по номограмме в работе [11] или по формуле:

$$\lambda = \beta \sqrt{\frac{2}{\mu}}. \quad (8)$$

Значение β определяется по решению системы уравнений:

$$\frac{\exp(-\beta^2)}{G(\beta)} - \alpha \frac{\exp(-\beta^2)}{1 - G(\beta)} = \frac{\sqrt{\pi}}{\mu} \beta. \quad (9)$$

$$G(\beta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\beta \exp(-z^2) dz. \quad (10)$$

На рисунке показана схема последовательности расчета по усовершенствованному методу Берггрена. Исходные данные для расчета включают в себя климатические данные на участке, теплофизические характеристики грунтов земляного полотна и основания и толщину каждого слоя в них.

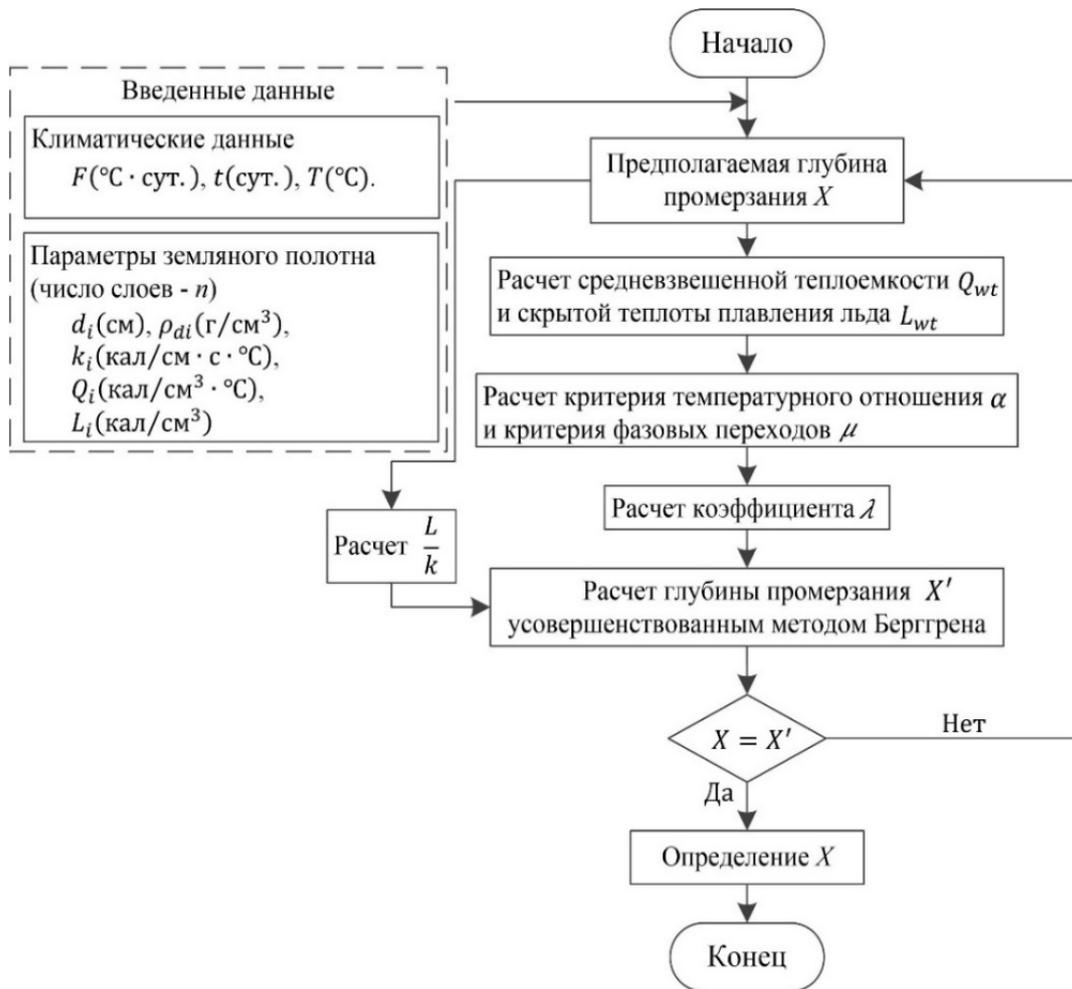


Схема последовательности расчета по усовершенствованному методу Берггрена

При расчете необходимо предположить значение глубины промерзания X ,

чтобы определить средневзвешенное значение $\frac{L}{k}$ и безразмерный коэффициент λ .

Если вычисленная глубина промерзания X' усовершенствованным методом Берггрена совпадает с предполагаемой глубиной X , то расчет завершен. В противном случае расчет повторяется до тех пор, пока X' не равна X .

Метод численного моделирования

В условиях холодного климата грунты земляного полотна подвергаются сезонному промерзанию, температурный режим земляного полотна изменяется с изменением температуры воздуха в течение года. Таким образом, глубина промерзания также определяется максимальной глубиной термоизоплета $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ путем математического моделирования температурного поля земляного полотна. В данной работе температурный режим земляного полотна описывается совмещенной моделью, которая

базируется на основе теории теплопроводности и ненасыщенной влагопроводности. Система уравнений модели приведена в виде:

$$\begin{cases} C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + L \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta_w}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta_w) \frac{\partial \theta_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D(\theta_w) \frac{\partial \theta_w}{\partial y} + K(\theta_w) \right), \\ \theta_i = \theta_w \cdot B_I \end{cases}, \quad (11)$$

где C — объемная теплоемкость грунта, Дж/(м³·К);

λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

L — удельная теплота фазового перехода, Дж/кг;

ρ_i — плотность льда, кг/м³;

θ_i — суммарная льдистость мерзлого грунта, м³/м³;

T — температура, К;

t — время, с;

θ_w — объемная влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды, м³/м³;

ρ_w — плотность воды, кг/м³;

$D(\theta_w)$ — коэффициент диффузии влаги, который определяется как отношение коэффициента влагопроводности к удельной влагоемкости, м²/с; $K(\theta_w)$ — коэффициент влагопроводности в ненасыщенной зоне, м/с;

B_I — соотношение между суммарной льдистостью θ_i и объемной влажностью мерзлого грунта за счет незамерзшей воды θ_w .

Значение B_I описывается кусочной функцией в виде:

$$B_I = \frac{\theta_i}{\theta_w} = \begin{cases} 1,1 \left(\frac{T - 273,15}{T_{bf} - 273,15} \right)^b - 1,1, & T < T_{bf}, \\ 0, & T \geq T_{bf} \end{cases}, \quad (12)$$

где T_{bf} — температура начала замерзания грунта, К;

b — коэффициент, зависящий от вида и засоленности грунтов. При отсутствии экспериментальных данных принимается 0,56 для глины, 0,47 для суглинка, 0,61 для песка.

Для получения единственного решения системы уравнений тепломассопереноса необходимо знать краевые (начальные и граничные) условия и геометрическую форму тела. Обычно начальные условия задают распределение температуры

или влажности внутри тела в начальный момент. Граничные условия описываются законом взаимодействия поверхности тела с окружающей средой на границах.

Необходимые теплофизические характеристики грунта для вычисления определены в соответствии с СП 25.13330.2012 [12], гидрофизические параметры описаны аппроксимирующими функциями на основе модели Ван Генухтена-Муалема [13].

Примеры расчетов

Для проверки работоспособности представленных методов выполнены расчеты глубины промерзания земляного полотна при климатических условиях на северо-востоке КНР следующими методами: усовершенствованным методом Бергрена, методом численного моделирования, по нормам ТВ 10035—2018 в КНР и СП 32-104—98 в РФ для расчетов глубины промерзания земляного полотна.

Выбранные участки для расчетов находятся в Харбине и Чанчуни. В соответствии с данными из китайского центра метеорологической информации КНР необходимые климатические данные для расчетов представлены в табл. 1 [14]. При численном моделировании температура на поверхности задана с учетом амплитуды колебания температуры воздуха.

Конструкция земляного полотна высокоскоростных магистралей состоит из двух защитных слоев и насыпи по норме ТВ 10621—2014 «Проектирование высокоскоростных железных дорог в КНР» [15], физические параметры грунтов земляного полотна представлены в табл. 2. При численном моделировании конструкции земляного полотна соответствующие теплофизические параметры и температурные условия взяты из работы [16]. Расчет методом численного моделирования выполнен на 5 лет с шагом 1 день.

ТАБЛИЦА 1. Климатические данные на разных участках

Участок	Индекс промерзания (°С·сут)	Продолжительность промерзания (сут)	Среднегодовая температура воздуха (°С)
Харбин	1582	140	4,9
Чанчунь	1260	134	6,1

ТАБЛИЦА 2. Физические параметры грунтов земляного полотна

Слой грунта*	Толщина слоя (см)	Плотность сухого грунта (кг/м ³)	Влажность (%)	Теплопроводность (кал/(см·с·°С))
1	70	1,78	10	0
2	230	2,12	9	0

*1 — щебенистый грунт, 2 — грунты крупнообломочные и песчаные.

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчетов глубины промерзания земляного полотна по разным методам

Участок	Расчетная глубина промерзания земляного полотна (см)			
	По усовершенствованному методу Берггрена	По численному моделированию	По норме ТВ 10035—2018 (КНР)	По норме СП 32-104—98 (РФ)
Харбин	220	224	226	218
Чанчунь	185	187	181	185

Результаты расчетов глубины промерзания земляного полотна по разным методам приведены в табл. 3. Очевидно, что расчетная глубина промерзания по разным методам близки друг другу, погрешность результатов расчетов от среднего значения не более 1,9 %.

Таким образом, усовершенствованный метод Берггрена целесообразно использовать для расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна многослойной системы. По сравнению с методом численного моделирования этот метод отличается простотой ввода данных и эффективным вычислением.

Метод численного моделирования дает возможность прогнозировать глубину промерзания грунта, в том числе изменение глубины промерзания и оттаивания, вызванных потеплением климата. Разработанная модель может быть использована как для изучения закономерности распределения теплового режима земляного полотна при промерзании и оттаивании, так и для проектирования толщины защитных слоев от мороза для конструкции земляного полотна высокоскоростных магистралей.

Заключение

1. На основе анализа существующих методов расчета глубины промерзания грунта в данной работе предложен усовершенствованный метод Берггрена для расчета глубины промерзания грунтов земляного полотна ВСМ многослойной системы. Показатели расчетной глубины, вычисленной разными методами, в основном согласуются друг с другом. Усовершенствованный метод Берггрена целесообразно применять для расчета глубины промерзания земляного полотна ВСМ.

2. Приведенные результаты решения методом численного моделирования показывают, что этот метод математического моделирования процесса промерзания грунтов земляного полотна дает удовлетворительный прогноз динамики температурного поля, а также возникающей глубины промерзания в многослойной системе. Численный метод является эффективным средством определения глубины промерзания земляного полотна и может быть использован при проектировании толщины защитных слоев земляного полотна ВСМ.

Библиографический список

1. ГОСТ 24847—2017. Грунты. Методы определения глубины сезонного промерзания. — М.: Стандартиформ, 2018. — 19 с.
2. Carlson H. Calculation of depth of freezing and thawing under pavements / H. Carlson, M. S. Kersten // Soil temperature and ground freezing. — 1953. — Iss. 71. — Pp. 81–98.
3. Леонович И. И. Механика земляного полотна. / И. И. Леонович, Н. П. Вырко. — Минск: Наука и техника, 1975. — 232 с.
4. Zhang Yu. Study on the Stability of High-speed Railway Roadbed in Deep Seasonally Frozen Region: Doctoral dissertation / Yu. Zhang. — Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. — 161 p.
5. Yan H. Experimental Study on Frost Depth of High Speed Railway Subgrade in Cold Region / H. Yan, D. Cai, G. Yang et al. // China Railway Science. — 2015. — Iss. 36(03). — Pp. 1–6.
6. Леонович И. И. Статистический метод определения глубины промерзания грунтов / И. И. Леонович, Н. П. Вырко, М. Н. Демидко // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. — Минск: БГТУ, 2015. — № 2. — С. 27–31.
7. GB 50007—2011. Code for design of building foundation. — Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. — 333 p.
8. TB 10035—2018. Code for Design on Special Railway Earth Structure. — Beijing: China Railway Publishing House, 2018. — 281 p.
9. СП 32-104—98. Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм. — Москва: ГУП ЦПП, 1999. — 90 с.
10. Технические указания по устранению пучин и просадок железнодорожного пути. — М.: Транспорт, 1998. — 74 с.
11. Aldrich Jr. Frost Penetration Below Highway And Airfield Pavements / P. Harl, Jr. Aldrich // Highway Research Board Bulletin. — 1956. — Iss. 135. — Pp. 124–149.
12. СП 25.13330.2020 «СНиП 2.02.04—88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». — Утв. Приказом Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 30 декабря 2020 г. № 915/пр. — М.: ФАУ «ФЦС», 2020. — 135 с.
13. Lu N. Unsaturated soil mechanics / N. Lu, W. J. Likos. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2004. — 556 p.
14. CMA Meteorological Data Centre: National Meteorological Information Centre. — Beijing, 2016. — URL: <http://data.cma.cn/en/?r=data/index&cid=0b9164954813c573> (дата обращения: 11.11.2022).
15. TB 10035—2018. Code for Design on Special Railway Earth Structure. — Beijing: China Railway Publishing House, 2018. — 281 p.
16. Wan X. Optimization Study for Subgrade Structure of HSR in Deep Seasonally Frozen Region Based on Temperature Field: Master's Thesis / X. Wang. — Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. — 101 p.

Дата поступления: 23.12.2022

Решение о публикации: 20.02.2023

Контактная информация:

ВАН Синьгун — аспирант; wangxintong@mail.ru

КОЛОС Алексей Федорович — канд. техн. наук, доц.; kolos2004@inbox.ru

ПЕТРЯЕВ Андрей Владимирович — канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; pgups60@mail.ru

Methods of Calculating Soil Freezing Depth of High-Speed Railway (HSR) Subgrade in Cold Climate Conditions in People's Republic of China

Wang Xintong, A. F. Kolos, A. V. Petriaev

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Wang Xintong, Kolos A. F, Petriaev A. V. Methods of Calculating Soil Freezing Depth of High-Speed Railway (HSR) Subgrade in Cold Climate Conditions in People's Republic of China. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 26–37. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-26-37

Summary

Purpose: Methods for calculating soil freezing depth of high-speed railway subgrade are developed given its multilayer structure. **Methods:** Existing methods for soil freezing depth calculation have been reviewed, advanced Berggren method for calculating soil freezing depth of HSR subgrade and numerically modeling method for subgrade temperature regime on the basis of mathematical model given moisture migration are proposed. The calculation reliability is confirmed by comparison with numerical simulation results and the results of the calculation by method based on Chinese and Russian railway construction standards. **Results:** The results of soil freezing depth calculations by different methods are similar. It is reasonable to use advanced Berggren method to calculate soil freezing depth for multilayer system. Numerical modeling method makes it possible to predict soil freezing depth including depth change of freezing and thawing caused by climate warming. **Practical significance:** To calculate soil freezing depth of HSR subgrade, it is advisable to use advanced Berggren method. The developed model can be used both to study the logic of subgrade thermal regime distribution at freezing and thawing and to project the thickness of protective layers against a frost for HSR subgrade construction.

Keywords: Soil freezing depth, HSR subgrade, advanced Berggren method, numerical simulation, temperature regime.

References

1. GOST 24847—2017. *Grunty. Metody opredeleniya glubiny sezonnogo promerzaniya* [GOST 24847—2017. Soils. Methods for determining the depth of seasonal freezing]. Moscow: Standartinform Publ., 2018, 19 p. (In Russian)
2. Carlson H., Kersten M. S. Calculation of depth of freezing and thawing under pavements. *Soil temperature and ground freezing*, 1953, Iss. 71, pp. 81–98.
3. Leonovich I. I. *Mekhanika zemlyanogo polotna* [Subgrade mechanics]. Minsk: Nauka i tekhnika Publ., 1975, 232 p. (In Russian)
4. Zhang Yu. Study on the Stability of High-speed Railway Roadbed in Deep Seasonally Frozen Region: Doctoral dissertation. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015, 161 p.
5. Yan H., Cai D., Yang G. et al. Experimental Study on Frost Depth of High Speed Railway Subgrade in Cold Region. *China Railway Science*, 2015, Iss. 36(03), pp. 1–6.

6. Leonovich I. I. *Statisticheskij metod opredeleniya glubiny promerzaniya gruntov. Trudy BGTU. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Statistical method for determining the depth of soil freezing. Proceedings of BSTU. Forestry and woodworking industry]. Minsk: BGTU Publ., 2015, Iss. 2(175), pp. 27–31. (In Russian)
7. GB 50007—2011. Code for design of building foundation. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011, 333 p.
8. TB 10035—2018. Code for Design on Special Railway Earth Structure. Beijing: China Railway Publishing House, 2018, 281 p.
9. SP 32-104—98. *Proektirovanie zemlyanogo polotna zheleznyh dorog kolei 1520 mm* [SP 32-104—98. Design of subgrade for 1520 mm gauge railways]. Moscow: GUP CPP Publ., 1999, 90 p. (In Russian)
10. *Tekhnicheskie ukazaniya po ustraneniyu puchin i prosadok zheleznodorozhnogo puti* [Technical instructions for eliminating deeps and drawdowns of the railway track]. Moscow: Transport Publ., 1998, 74 p. (In Russian)
11. Aldrich Jr., Harl P. Frost Penetration Below Highway And Airfield Pavements. Highway Research Board Bulletin. 1956, Iss. 135, pp. 124–149.
12. SP 25.13330.2020 “SNiP 2.02.04—88 Osnovaniya i fundamenty na vechno-merzlykh gruntakh”. *Utv. Prikazom Ministerstvom stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva RF ot 30 dekabrya 2020 g. № 915/pr* [SP 25.13330.2020 “SNiP 2.02.04—88 Bases and foundations on permafrost soils”. Approved. By order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 30, 2020 № 915/pr]. Moscow: FAU “FTsS” Publ., 2020, 135 p. (In Russian)
13. Lu N., Likos W. J. Unsaturated soil mechanics. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004, 556 p.
14. CMA Meteorological Data Centre: National Meteorological Information Centre. Beijing, 2016. Available at: <http://data.cma.cn/en/?r=data/index&cid=0b9164954813c573> (accessed: November 11, 2022)
15. TB 10035—2018. Code for Design on Special Railway Earth Structure. Beijing: China Railway Publishing House, 2018, 281 p.
16. Wan X. Optimization Study for Subgrade Structure of HSR in Deep Seasonally Fro-zen Region Based on Temperature Field: Master's Thesis. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019, 101 p.

Received: December 23, 2022

Accepted: February 20, 2023

Author's information:

Xintong WANG — Postgraduate Student; wangxintong@mail.ru

Aleksey F. KOLOS — PhD in Engineering, Associate Professor; kolos2004@inbox.ru

Andrey V. PETRYAEV — PhD in Engineering, Senior Researcher; pgups60@mail.ru

Пожарная опасность электромобилей

Ю. Н. Канонин, А. В. Лыщик

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Канонин Ю. Н., Лыщик А. В. Пожарная опасность электромобилей // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 38–51. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-38-51

Аннотация

Цель: Оценить динамику увеличения количества электромобилей (электробусов) в Российской Федерации, рассмотреть факторы, приводящие к их воспламенению и оценить риск такого происшествия. Предложить мероприятия по снижению тяжести последствий воспламенения электромобилей (электробусов). **Методы:** Произведен обзор информации по данному вопросу по различным источникам. **Результаты:** Оценена динамика увеличения количества электромобилей в России, которая на сегодняшний день показывает практически ежегодное удвоение количества электромобилей в стране. Показано, что частота воспламенения электромобилей гораздо ниже, чем у автомобилей с двигателем внутреннего сгорания. Однако пожар электромобилей развивается по другому сценарию, чем у автомобилей с ДВС, и, как правило, с более тяжелыми последствиями. Определены факторы, приводящие к воспламенению электромобилей (тепловой разгон в аккумуляторной батарее вследствие термических, механических и электрических воздействий) и основные опасности, возникающие при их горении. Рассмотрены современные методы предотвращения возгораний электромобилей, а также способы их тушения. **Практическая значимость:** Предложены меры по снижению риска пожаров электромобилей и мероприятия по уменьшению последствий таких пожаров.

Ключевые слова: Электромобили, факторы, приводящие к воспламенению, тепловой разгон, предотвращение пожаров электромобилей, тушения пожаров электромобилей.

На сегодняшний день количество электромобилей в стране незначительное. В соответствии с данными Автостата количество электромобилей и гибридов в России на 1 июля 2022 года составило 23,3 тысячи, или 0,05 % от общего количества транспортных средств. Соответственно, из них гибридов 5,8 тысячи, остальные чистые электромобили. В то же время по сравнению с 2020 годом рост числа электромобилей в стране более чем в два раза [1].

В соответствии с [1] к концу 2024 года в России будет выпускаться 25 тысяч электротранспортных средств. А в конце текущего десятилетия каждый десятый автомобиль, выпускаемый в России, будет электрическим с использованием батарей российского производства.

А вот по количеству электробусов в России есть определенные успехи. Например, московский парк электробусов всего за четыре года стал одним из крупнейших в мире и на сегодняшний день составляет около 1050 единиц, которые курсируют по 79 маршрутам [2].

Для повышения привлекательности владения электромобилей государство планирует не только мероприятия по развитию парковочного пространства и зарядной инфраструктуры, но и ряд других мер, включающих в себя программы субсидирования приобретения электромобилей, введение пониженной ставки транспортного налога на владельцев электромобилей и гибридов, предоставление льгот при пользовании платными автодорогами и ряд других [3].

Рост количества электромобилей обусловлен имеющимися по ряду параметров преимуществами по отношению к транспортным средствам с двигателем внутреннего сгорания, к которым можно отнести экологичность на стадии эксплуатации, почти полную бесшумность, большой межсервисный пробег и дешевое техническое обслуживание, связанные с простотой конструкции и устройством автомобиля, его надежность и долговечность и ряд других.

В то же время в средствах массовой информации все чаще упоминаются случаи пожаров электромобилей, вследствие чего возникает ощущение высокой пожароопасности данного вида транспорта. Но статистика это не подтверждает. Так, в 2021 году на 100 тыс. проданных электромобилей пришлось около 25 возгораний. У автомобилей с ДВС этот показатель вырастает до 1500, но наиболее неблагоприятная картина у гибридов — около 3500 инцидентов на 100 тыс. проданных машин [4]. С учетом того, что пробеги автомобилей с ДВС значительно больше, чем у электромобилей, в перерасчете на миллиард пройденных миль, по данным Tesla, показатели для машин с ДВС улучшаются, но все равно хуже в 11 раз, чем у электромобилей (соответственно 5 и 55).

Редкий случай возгораний электромобилей не попадает на страницы СМИ, а некоторые просто невозможно пройти мимо, даже если этим вопросом не интересуешься. Одним из таких является случай с грузовым судном Felicity Ace, где 16 февраля 2022 года произошло возгорание литий-ионной аккумуляторной батареи на одном из перевозимых транспортных средств. Возгорание из-за отсутствия специального пожарного оборудования потушить не удалось, огонь перекинулся на другие автомобили и само судно. Пожар продолжался несколько суток, в итоге 1 марта судно перевернулось и затонуло. Вместе с ним на дно отправилось 3965 автомобилей концерна Volkswagen AG [5]. Неудивительно, что после такого события некоторые судоходные компании отказались перевозить на своих кораблях электромобили и гибриды [6].

Однако внимание СМИ к пожарам электромобилей совсем не случайно. И вызвано это особенностью этих пожаров, связанных с тепловым разгоном и возгоранием литий-ионных аккумуляторов. Тепловой разгон, приводящий к возгоранию аккумуляторов и далее самого электромобиля, может возникнуть в результате неправильной эксплуатации или дорожно-транспортного происшествия. Как правило, тепловой разгон представляет собой разложение активного материала, реакцию между анодом материала и электролита, разрушение сепаратора и разложение

катада. При этом выход из строя батареи, как правило, сопровождается выбросом ядовитого газа, реактивным пламенем и взрывом. Тепловой разгон происходит по механизму цепных реакций, в ходе которых одна за другой происходят реакции разложения материалов компонентов батареи. И литий-ионный аккумулятор с высокой плотностью энергии и увеличенным сроком службы является наиболее популярным выбором аккумуляторов для электромобилей [7].

При воспламенении и горении электромобиля и автомобиля с ДВС тепловыделения вполне сопоставимы. Но из-за аккумулятора, расположенного на электромобиле, его тушение сильно затруднено. Это связано с герметичностью аккумуляторной батареи, необходимостью большого количества воды для ее охлаждения и возможностью повторного возгорания. Сочетание данных факторов приводит к тому, что в случае возгорания электромобиль, как правило, полностью выгорает.

Для того чтобы обеспечить возможность быстрого набора скорости и приемлемый запас хода без подзарядки, аккумуляторные батареи электромобилей обладают мощностью до 100 кВт и удельной энергоемкостью до 270 Вт · ч/кг. Хотя аккумуляторная батарея имеет низкую вероятность самовозгорания, она уязвима для внешних термических, механических и электрических воздействий, которые могут проявиться в экстремальных условиях эксплуатации или инцидентах, способных привести к ее возгоранию.

Эксплуатация электромобилей в условиях повышенных температур может привести к перегреву батарей, что при плохом отводе тепла приводит к тепловому разгону и в итоге к возгоранию электромобиля. В свою очередь, при эксплуатации в условиях низких температур в аккумуляторе увеличивается внутреннее сопротивление, способствующее росту дендритов металлического лития, вызывающее внутри батареи дополнительные эффекты нагрева, что увеличивает вероятность ее возгорания [8, 9].

Для защиты от теплового разгона и последующего воспламенения аккумуляторной батареи производители каждую аккумуляторную ячейку оснащают небольшим электронным блоком и датчиком температуры. Электронные блоки следят за токами заряда/разряда и за температурой каждой ячейки. При повышении температуры электрическая цепь разрывается, и все опасные химические процессы в ячейке останавливаются. При продолжении процесса дальше в ячейке плавится пористый сепаратор, полностью перекрывающий движение ионов между электродами. Кроме этого, можно упомянуть применение альтернативных материалов для изготовления аккумуляторов, способных расширить температурные пределы эксплуатации [10]. К сожалению, данная система не всегда способна эффективно противостоять внешним воздействиям.

При горении литий-ионных аккумуляторов выделяется целый букет взрывопожароопасных и токсичных газов, основными из которых являются водород, метан, окись углерода, фтористый водород и цианистый водород, способствующие

усилению горения, а также приводящие к отравлению не только людей, находящихся в машине, но и оказавшихся рядом [9]. Кроме этого, аккумуляторная батарея в среднем содержит 8 кг лития, 35 кг никеля, 20 кг марганца и 14 кг кобальта, а ее масса может достигать 600 килограмм [11].

Причиной пожара электромобиля может быть не только отказ аккумуляторной батареи, но и перегрузка кабеля, выход из строя зарядного устройства, воспламенение других материалов или поджог, а также механическое воздействие на аккумуляторную батарею.

Возгорание электромобиля возможно как на стоянке, во время зарядки аккумуляторных батарей, так и во время движения.

По данным Пекинского технологического института, 38,5 % пожаров электромобилей начинаются, когда машина стоит, 27,5 % — при зарядке аккумуляторной батареи. Также указывается, что в холодный период года риск возгорания растет при зарядке аккумуляторной батареи, а в теплый период года вероятность пожара возрастает при перегреве аккумуляторной батареи [12].

Вероятность же короткого замыкания при столкновении по результатам краш-тестов невысока [13], тем не менее такие случаи зафиксированы и в России, где количество таких транспортных средств невелико. Например, в августе 2019 года Tesla Model 3, двигавшаяся на автопилоте, врезалась в угол стоящего на МКАД автомобиля и через некоторое время загорелась, выгорев дотла [14]. Достаточно часто повреждение аккумулятора происходит из-за воздействия на днище машины, где часто располагаются аккумуляторные батареи, при выбоинах на дорогах или наезде на препятствия. Например, в октябре 2013 года Tesla Model S загорелась после столкновения в пригороде Сиэтла с дорожным мусором в виде большого металлического предмета, повредившего днище электромобиля и приведшего к его воспламенению [15]. Надо отдать должное компании Tesla, которая оперативно внесла несколько изменений в конструкцию электромобиля, установив полый алюминиевый брус, позволяющий отбрасывать встречающиеся на пути предметы, высокопрочную плиту из титана, защищающую уязвимые элементы силовой системы при наезде на препятствие и щит из алюминия, поглощающий и рассеивающий энергию удара [16].

Возгорание электромобиля возможно также при внешнем воздействии. Как информирует компания Tesla [17], с 2012 по 2018 год 15 % возгораний были связаны с поджогами и внешними пожарами.

И, естественно, не обойтись без пресловутого человеческого фактора. Так, южнокорейская комиссия по расследованию возгораний электромобилей установила, что большинство таких возгораний вызвано именно этой причиной, особенно некачественной установкой батареи и неправильным обращением с ней. Производственные же ошибки установлены только в одной из миллионов произведенных батарей [18].

Применение автопилота существенно повышают риск пожара и тяжесть последствий для пассажиров при авариях. Это связано с тем, что большинство таких случаев происходит на большой скорости из-за того, что электроника сработала некорректно, водитель проигнорировал предупреждение о необходимости перейти на ручное управление или система автономного управления не заметила препятствие на пути машины. И если при дорожно-транспортных происшествиях на небольшой скорости водители серьезных повреждений не получают и возпламенение вследствие теплового разгона происходит не сразу, давая возможность водителю и пассажирам покинуть электромобиль, то при высоких скоростях возпламенение происходит до того, как пострадавшим в аварии смогут оказать помощь. Так, 23 марта 2018 года в США электромобиль Tesla Model X потерял управление и на скорости 120 км/ч врезался в бетонный барьер. Практически сразу он загорелся и взорвался. Водитель погиб. Там же 8 мая 2018 года Tesla Model S на скорости около 100 км/ч врезался в бетонную стену и мгновенно воспламенился. Двое подростков в машине погибли от термического воздействия. 24 февраля 2019 года там же Tesla Model 3 врезался в пальму, воспламенился, водитель погиб в огне [19, 20].

Несмотря на невысокую вероятность возгорания электромобиля и незначительное количество таких транспортных средств в России, уже сегодня нужно готовиться к их тушению, учитывая сложность данного процесса и быстрый потенциальный рост численности электромобилей.

Опасность тушения возгорания электромобиля связана с высоким риском поражения электрическим током от высоковольтных систем, а также возможностью его взрыва, выделением чрезвычайно опасных вредных химических веществ и других опасных факторов пожара.

Сложность тушения электромобиля заключается в том, что литий-ионная аккумуляторная батарея герметизирована для защиты от проникновения пыли и влаги, она способна гореть без доступа кислорода, поскольку в ее составе уже имеются и горючее вещество, и окислитель. Сами аккумуляторные батареи защищены ударопрочной противопожарной конструкцией, препятствующей их повреждению при столкновении. Также во многих случаях аккумуляторные батареи размещены в нижней части электромобиля, вдали от мест возможных ударов. Таким образом, какое бы огнетушащее вещество не применялось для тушения, оно способно лишь воздействовать на видимое пламя. Учитывая, что при воспламенении аккумуляторная батарея уже находится в состоянии теплового разгона, то основной задачей огнетушащего вещества является резкое снижение ее температуры. С такой задачей потенциально справиться могут вода и углекислота. Вода обладает высокой теплоемкостью и доступностью, углекислота низкой температурой на выходе из огнетушителя. Но, в отличие от воды, возможность постоянно, до полного



Рис. 1. Контейнер для эвакуации электромобиля после тушения

прекращения реакции горения, подавать углекислоту к аккумуляторной батарее отсутствует.

Однако и вода в данном случае неидеальна. Она обладает высокой подвижностью и низкой смачивающей способностью, что приводит к ее большому расходу. Испытания показали, что для тушения электромобиля необходимо до 10 000 литров воды, в зависимости от размера и расположения батареи. Кроме того, рекомендуемая скорость потока — до 200 л/мин для тушения и охлаждения [9, 21]. В регламенте тушения Tesla это значение еще больше и составляет 11 000 литров. В ряде случаев электромобиль помещали на длительное время в резервуар с водой [9] (рис. 1), что напрямую приводило к его последующей утилизации. Известны случаи, когда даже такого количества воды было недостаточно. Например, в апреле 2021 года в США для тушения беспилотного Tesla Model S пожарным потребовалось 4 часа и более 100 тыс. литров воды [22].

Более экономичную и безопасную систему борьбы с горящими электромобилями предложили инженеры австрийской компании Rosenbauer. Это устройство малой толщины, устанавливаемое под днищем горящего электромобиля и способное специальным штырем пробить отверстие в корпусе аккумуляторного блока, через которое внутрь подается большое количество воды под давлением (рис. 2). Данное устройство позволяет управлять процессом тушения на расстоянии до 10 метров и снизить расход воды более чем в 4 раза [23].

Учитывая, что количество электромобилей в стране ежегодно увеличивается почти в два раза [24], встает вопрос о готовности служб спасения к тушению электромобилей. Большинство электромобилей сконцентрировано, по данным [25] на середину 2021 года, в следующих регионах: Приморский край — 1572; Иркутская

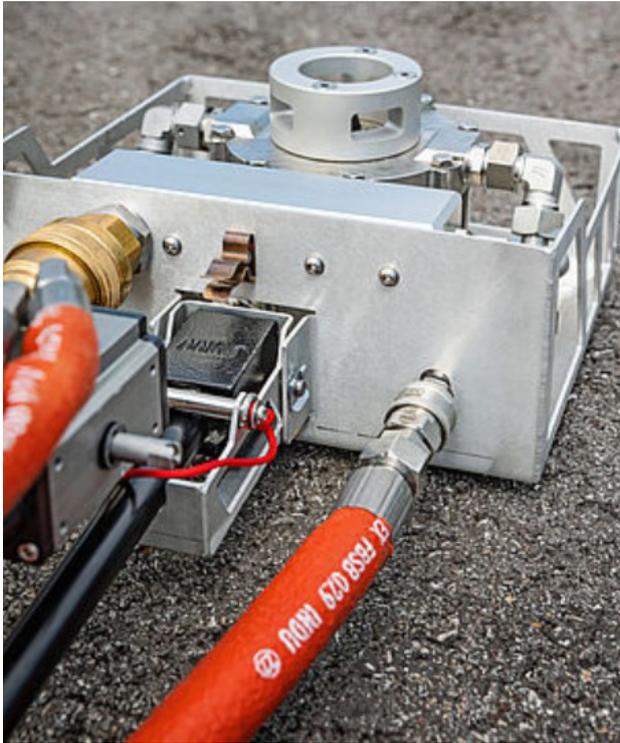


Рис. 2. Устройство компании Rosenbauer для ликвидации возгораний электромобилей

область — 1381; Москва — 1360. Далее с большим отрывом Хабаровский край — 812; Краснодарский край — 596; Московская область — 521; Новосибирская область — 516; Санкт-Петербург — 417. Однако по темпам прироста количество таких транспортных средств в 2021 году лидирует Москва — 924 (41 % от зарегистрированных в РФ электромобилей в 2021 году), 255 — Санкт-Петербург и 238 — Московская область [26]. Электромобили, учитывая состояние дорог в регионах, — по большей части городские машины, которые имеют определенные ограничения в запасе хода: для современных коммерческих электромобилей он составляет примерно 150–200 км, например 172 км для Nissan Leaf и

183 км для BMW i3. Ограничение общей дальности связано с ограниченным пространством для размещения аккумуляторной батареи на борту электромобиля. Обычно общий объем аккумуляторной батареи составляет примерно 220 литров для электромобиля и 400 литров для внедорожника [27]. И это позволяет целенаправленно точно подготовить спасателей к решению таких задач, оснастив их соответствующим оборудованием, которое из-за введенных санкций необходимо разрабатывать непосредственно в России.

При тушении возгораний электромобилей возможно поражение электрическим током, следовательно, пожарным, принимающим участие в тушении, необходимо уметь правильно идентифицировать такое транспортное средство, обладать знаниями устройства и практикой тушения пожаров электромобилей, позволяющими предпринять действия по недопущению воздействия электричества на них и на окружающих.

Для обучения пожарных тушению пожаров, возникающих на железнодорожном пассажирском подвижном составе, разработан ряд тренажеров. Например, тренажер «Искра 14С» позволяет моделировать различные ситуации пожара в пассажирском вагоне и до автоматизма довести навыки пожарных, необходимые в таких случаях [28, 29]. Представляется целесообразным создание тренажера по обучению пожарных тушению возгорания электромобиля в различных ситуациях.

И, конечно же, сами владельцы электромобилей должны представлять его устройство и в случае аварии или инцидента, способного привести к его воспламенению, обесточить транспортное средство. При вызове представителей служб спасения обязаны указать, с каким транспортным средством им придется иметь дело.

Поскольку повторное возгорание электромобилей и возгорание электромобилей, попавших в аварии, может произойти даже через несколько дней после указанных событий, в России необходимо перенять опыт стран с большой долей электрических транспортных средств по предупреждению об опасности такого воспламенения. Для этого применяется специальная маркировка для информирования окружающих, указывающая на необходимость парковки на достаточном удалении от других транспортных средств, легковоспламеняющихся веществ и материалов, категорический запрет на парковку в закрытом помещении [9]. Соответственно, такая маркировка должна быть разработана в РФ, а в Правила дорожного движения внесены соответствующие дополнения в разделы 2 «Общие обязанности водителей» и 12 «Остановка и стоянка».

При проектировании крытых паркингов необходимо предусматривать отдельные зоны для электромобилей с возможностью поддержания безопасной температуры, наличием сертифицированных устройств заряда аккумуляторных батарей и соответствующими средствами пожаротушения.

В целях повышения безопасности литий-ионных аккумуляторов и смягчения последствий теплового разгона ряд международных организаций разработали и приняли стандарты для оценки их безопасности [27, 30–32]. Эти стандарты требуют, чтобы литий-ионные аккумуляторы прошли установленные тесты на безопасность в различных условиях эксплуатации, включая перезарядку, чрезмерную разрядку, перегрев и механическое воздействие. Данные стандарты разработаны, чтобы попытаться гарантировать, что сертифицированные литий-ионные аккумуляторы имеют достаточно низкий риск аварии и, следовательно, могут безопасно использоваться. Стандарты испытаний на безопасность аккумуляторных батарей постоянно обновляются и оптимизируются, учитывая, что текущие испытания не могут полностью гарантировать безопасность.

Библиографический список

1. Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года. — URL: http://static.government.ru/media/files/bW9wGZ2_rDs3_BkeZHf7ZsaxnlbJzQbJJt.pdf (дата обращения: 27.12.2022).
2. Сергей Собянин: Электробусный парк Москвы за четыре года стал одним из крупнейших в мире. — URL: <https://www.msk.kp.ru/online/news/5106682/> (дата обращения 30.01.2023).

3. Методические рекомендации по стимулированию использования электромобилей и гибридных автомобилей в субъектах Российской Федерации, утвержденные распоряжением Минтранса России от 25 мая 2022 г. № АК-131-р. — URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/10/11866> (дата обращения: 27.12.2022).
4. Gas vs. Electric Car Fires [2023 Findings]. — URL: <https://www.autoinsuranceez.com/gas-vs-electric-car-fires/> (дата обращения: 25.12.2022).
5. Felicity Ace. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Felicity_Ace (дата обращения: 27.12.2022).
6. Junge Freiheit: норвежские паромы отказались перевозить электромобили. — URL: <https://russian.rt.com/inotv/2023-01-19/Junge-Freiheit-norvezhskie-paromi-otkazalis> (дата обращения: 28.12.2022).
7. Feng X. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review / X. Feng, M. Ouyang, X. Liu et al. // *Energe Storage Mater.* — 2018. — Iss. 10 (May 2017). — Pp. 246–267. — DOI: 10.1016/j.ensm.2017.05.013.
8. The History of the Electric Car. — URL: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car> (дата обращения: 20.12.2022).
9. Sun P. A Review of Battery Fires in Electric Vehicles / P. Sun, R. Bisschop, H. Niu et al. // *Fire Technology.* — 2020. — URL: <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3> (дата обращения: 20.12.2022).
10. Раздувание огня: все ли электромобили пожароопасны. — URL: <https://iz.ru/871987/evgenii-bagdasarov/razduvanie-ognia-vse-li-elektromobili-pozharoопасny> (дата обращения: 28.12.2022).
11. Батарейка на колесах. — URL: <https://trends.rbc.ru/trends/green/62671a189a7947c85bb26f0f/> (дата обращения: 09.01.2023).
12. В Китае опубликовали статистику по возгораниям электрокаров: BYD и GAC в топе. — URL: <https://matador.tech/news/v-kitae-opublikovali-statistiku-po-vozgoraniyam-elektrokarov-byd-i-gac-v-tope> (дата обращения: 24.12.2022).
13. VW Tiguan: Der SUV-Bestseller im Test. — URL: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/vw-e-up> (дата обращения: 29.12.2022).
14. Сбитый автопилот: возгорание Tesla на МКАД поставило вопросы о безопасности модели. Стоит ли доверять жизнь электронике и почему электромобили так ярко горят. — URL: <https://iz.ru/909885/evgenii-bagdasarov/sbityi-avtopilot-vozgoranie-tesla-na-mkad-postavilo-voprosy-o-bezopasnosti-modeli> (дата обращения: 05.01.2023).
15. Tesla Model S загорелась недалеко от Сиэтла, пострадавших нет. — URL: <https://www.autoblog.com/2013/10/02/tesla-model-s-fire/> (дата обращения: 15.01.2023).
16. Tesla Adds Titanium Underbody Shield and Aluminum Deflector Plates to Model S. — URL: <https://medium.com/@teslamotors/tesla-adds-titanium-underbody-shield-and-aluminum-deflector-plates-to-model-s-544f35965a0d> (дата обращения: 28.12.2022).
17. Tesla Vehicle Safety Report, 2019. — URL: <https://www.tesla.com/VehicleSafetyReport> (дата обращения: 13.01.2023).

18. Как горят электромобили. Тушение электромобилей. — URL: <https://carsclick.ru/obshhie/kak-gorjat-jelektromobili-tushenie-jelektromobilej/> (дата обращения: 18.01.2023).
19. За рулем робот: аварии, в которых виноват автопилот. — URL: <https://www.autonews.ru/news/5be4498c9a7947707744ab2b> (дата обращения: 31.01.2023).
20. Автопилот-убийца. Пять самых опасных аварий с участием Tesla. — URL: <https://360tv.ru/tekst/obschestvo/avtopilot-ubijtsa/> (дата обращения: 26.12.2022).
21. Verband der Automobilindustrie (VDA). Помощь при авариях и восстановление транспортных средств с высоким напряжением Системы. Verband Der Automobilindustrie EV. — 2017. — С. 1–30.
22. Инженеры разработали технологию тушения электромобилей. — URL: <https://habr.com/ru/news/t/590313/> (дата обращения: 26.12.2022).
23. Создана уникальная система тушения электромобилей. — URL: https://4pda.to/2021/11/27/393402/sozdana_unikalnaya_sistema_tusheniya_elektromobilej/ <https://carsclick.ru/obshhie/kak-gorjat-jelektromobili-tushenie-jelektromobilej/> (дата обращения: 20.01.2023).
24. Парк электромобилей в России достиг 2,5 тыс. экземпляров. — URL: <https://www.avtostat.ru/35576/> (дата обращения: 27.12.2022).
25. 35 % всех электрокаров в России приходятся на три региона. — URL: <https://news.drom.ru/85635.html> (дата обращения: 31.01.2023).
26. В каких регионах России любят электрокары. Почти половина всех проданных в 2021 году «зеленых» автомобилей пришлось на Москву. — URL: <https://motor.ru/news/russia-ev-sales-31-01-2022.htm> (дата обращения: 31.01.2023).
27. Lalinde I. Perspective Chapter: Thermal Runaway in Lithium-Ion Batteries / I. Lalinde, A. Berrueta, J. J. Valera et al. — Submitted: February 3rd, 2022. — Reviewed: July 13th, 2022. — Published: August 27th, 2022. — DOI: 10.5772/intechopen.106539.
28. Канонин Ю. Н. Тренажер для обучения проводников пассажирских вагонов действиям при пожаре / Ю. Н. Канонин, А. В. Лыщик, А. В. Лопаткина // Техносферная и экологическая безопасность на транспорте (ТЭБТРАНС-2018): материалы VI Международной научно-практической конференции. СПб., 2018. — С. 67–69.
29. Канонин Ю. Н. Устройство для обучения поездной бригады действиям при пожаре / Ю. Н. Канонин, А. В. Лопаткина // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке: материалы XII Санкт-Петербургского конгресса. — 2018. — С. 102.
30. Противопожарное, аварийно-спасательное оборудование и тренировочные комплексы для МЧС. Тренировочные комплексы ИСКРА-14С. — URL: <https://npp-topaz.ru/index-fire-iskra14c1.html> (дата обращения: 31.01.2023).
31. Mikolajczak C. Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment. SpringerBriefs in Fire / C. Mikolajczak, K. White, M. Kahn et al. — New York: Springer, 2011. — XII. — 115 p. — DOI: 10.1007/978-1-4614-3486-3.
32. Ruiz V. A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles / V. Ruiz, A. Pfrang, A. Kriston et al. // Renewable

and Sustainable Energy Reviews. — 2018. — Iss. 81 (May 2017). — Pp. 1427–1452. — DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.195.

Дата поступления: 15.02.2023

Решение о публикации: 01.03.2023

Контактная информация:

КАНОНИН Юрий Николаевич — канд. техн. наук, доц.; yu.n.kanonin@yandex.ru

ЛЫЩИК Андрей Владимирович — канд. техн. наук, доц.; mihali@yandex.ru

Fire Danger of Electric Vehicles

Yu. N. Kanonin, A. V. Lyshchik

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kanonin Yu. N., Lyshchik A. V. Fire Danger of Electric Vehicles. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 38–51. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-38-51

Summary

Purpose: To assess increase dynamics of the number of electric vehicles (electric buses) in the Russian Federation, to consider the factors leading to their ignition and to assess the risk of such an accident. To propose measures to reduce consequence severity of electric vehicle (electric bus) ignition. **Methods:** Information review on this issue from various sources was made. **Results:** Increase dynamics of electric vehicle number in Russia was assessed which shows at the moment almost annual doubling of electric vehicle number in the country. It is shown that electric vehicle ignition frequency is much lower than that of vehicles with gas-engine. However, the electric vehicle fire develops according to different scenario than of the vehicles with gas-engine and, as a rule, with more severe consequences. The factors leading to the ignition of electric vehicles (thermal runaway in battery due to thermal, mechanical and electrical impacts) and the main dangers arising from their combustion are determined. Modern methods to prevent electric vehicle fires as well as methods of their extinguishing are considered. **Practical significance:** Measures are proposed to reduce electric vehicle fire risk and measures to reduce such fire consequences.

Keywords: Electric vehicles, ignition factors leading to combustion, thermal runaway, electric vehicle fire prevention, electric vehicle fire extinguishing.

References

1. *Kontseptsiya po razvitiyu proizvodstva i ispol'zovaniya elektricheskogo avtomobil'nogo transporta v Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda* [Concept for the development of production and use of electric road transport in the Russian Federation for the period up to 2030]. Available at: http://static.government.ru/media/files/bW9wGZ2_rDs3_BkeZHf7ZsaxnlbJzQbJJt.pdf (accessed: December 27, 2022). (In Russian)

2. *Sergey Sobyenin: Elektrobusnyy park Moskvy za chetyre goda stal odnim iz krupneyshikh v mire* [Sergei Sobyenin: The Moscow electric bus fleet has become one of the largest in the world in four years]. Available at: <https://www.msk.kp.ru/online/news/5106682/> (accessed: January 30, 2023). (In Russian)

3. *Metodicheskie rekomendatsii po stimulirovaniyu ispol'zovaniya elektromobiley i gibridnykh avtomobiley v sub'ektakh Rossiyskoy Federatsii, utverzhennyye rasporyazheniem Mintransa Rossii ot 25 maya 2022 g. № AK-131-r* [Guidelines for promoting the use of electric vehicles and hybrid vehicles in the constituent entities of the Russian Federation, approved by the order of the Ministry of Transport of Russia dated May 25, 2022 № AK-131-r]. Available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/10/11866> (accessed: December 27, 2022). (In Russian)

4. Gas vs. Electric Car Fires [2023 Findings]. Available at: <https://www.autoinsuranceez.com/gas-vs-electric-car-fires/> (accessed: December 25, 2022).

5. Felicity Ace. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Felicity_Ace (accessed: December 27, 2022).

6. Junge Freiheit: Norwegian ferries refused to carry electric vehicles. Available at: <https://russian.rt.com/inotv/2023-01-19/Junge-Freiheit-norvezhskie-paromi-otkazalis> (accessed: December 28, 2022).

7. Feng X., Ouyang M., Liu X. et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energie Storage Mater.* 2018, Iss. 10 (May 2017), pp. 246–267. DOI: 10.1016/j.ensm.2017.05.013.

8. The History of the Electric Car. Available at: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car> (accessed: December 20, 2022).

9. Sun P., Bisschop R., Niu H. et al. A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. *Fire Technology*. 2020. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3> 1 (accessed: December 20, 2022).

10. *Razduvanie ognya: vse li elektromobili pozharoopasny* [Fanning the fire: are all electric vehicles a fire hazard]. Available at: <https://iz.ru/871987/evgenii-bagdasarov/razduvanie-ognia-vse-li- elektromobili-pozharoopasny> (accessed: December 28, 2022). (In Russian)

11. *Batareyka na kolesakh* [Battery on wheels]. Available at: <https://trends.rbc.ru/trends/green/62671a189a7947c85bb26f0f/> (accessed: January 09, 2023). (In Russian)

12. *V Kitae opublikovali statistiku po vozgoraniyam elektrokarov: BYD i GAC v tope* [China published statistics on electric car fires: BYD and GAC in the top]. Available at: <https://matador.tech/news/v-kitae-opublikovali-statistiku-po-vozgoraniyam-elektrokarov-byd-i-gac-v-tope> (accessed: December 24, 2022). (In Russian)

13. VW Tiguan: Der SUV-Bestseller im Test. Available at: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/vw-e-up> (accessed: December 29, 2022).

14. *Sbityy avtopilot: vozgoranie Tesla na MKAD postavilo voprosy o bezopasnosti modeli. Stoit li doveryat' zhizn' elektronike i pochemu elektromobili tak yarko goryat* [Downed autopilot: Tesla fire on the Moscow Ring Road raised questions about the safety of the model. Is it worth trusting life to electronics and why electric cars burn so brightly]. Available at: <https://iz.ru/909885/evgenii-bagdasara>

rov/sbityi-avtopilot-vozhgoranie-tesla-na-mkad-postavilo-voprosy-o-bezopasnosti-modeli (accessed: January 05, 2023). (In Russian)

15. Tesla Model S caught fire near Seattle, there were no casualties. Available at: <https://www.autoblog.com/2013/10/02/tesla-model-s-fire/> (accessed: January 15, 2023).

16. Tesla Adds Titanium Underbody Shield and Aluminum Deflector Plates to Model S. Available at: <https://medium.com/@teslamotors/tesla-adds-titanium-underbody-shield-and-aluminum-deflector-plates-to-model-s-544f35965a0d> (accessed: December 28, 2022).

17. Tesla Vehicle Safety Report, 2019. Available at: <https://www.tesla.com/VehicleSafetyReport> (accessed: January 13, 2023).

18. *Kak goryat elektromobili. Tushenie elektromobiley* [How electric cars burn. Extinguishing electric vehicles]. Available at: <https://carsclick.ru/obshhie/kak-gorjat-jelektromobili-tushenie-jelektromobilej/> (accessed: January 18, 2023). (In Russian)

19. *Za rulem robot: avarii, v kotorykh vinovat avtopilot* [Behind the wheel of a robot: accidents in which the autopilot is to blame]. Available at: <https://www.autonews.ru/news/5be-4498c9a7947707744ab2b> (accessed: January 31, 2023). (In Russian)

20. *Avtopilot-ubiytsa. Pyat' samykh opasnykh avariyy s uchastiem Tesla* [Killer autopilot. The five most dangerous accidents involving Tesla]. Available at: <https://360tv.ru/tekst/obschestvo/avtopilot-ubijtsa/> (accessed: December 26, 2022). (In Russian)

21. Verband der Automobilindustrie (VDA). Accident assistance and recovery of vehicles with high voltage Systems. Verband Der Automobilindustrie EV. 2017, pp. 1–30.

22. *Inzhenery razrabotali tekhnologiyu tusheniya elektromobiley* [Engineers have developed a technology for extinguishing electric vehicles]. Available at: <https://habr.com/ru/news/t/590313/> (accessed: December 26, 2022). (In Russian)

23. *Sozdana unikal'naya sistema tusheniya elektromobiley* [A unique system for extinguishing electric vehicles has been created]. Available at: https://4pda.to/2021/11/27/393402/sozdana_unikalnaya_sistema_tusheniya_elektromobilej/ <https://carsclick.ru/obshhie/kak-gorjat-jelektromobili-tushenie-jelektromobilej/> (accessed: January 20, 2023). (In Russian)

24. *Park elektromobiley v Rossii dostig 2,5 tys. ekzemplyarov* [The fleet of electric vehicles in Russia has reached 2.5 thousand copies]. Available at: <https://www.avtostat.ru/35576/> (accessed: December 27, 2022). (In Russian)

25. *35 % vseh elektrokarov v Rossii prikhodyatsya na tri regiona* [35 % of all electric cars in Russia are in three regions]. Available at: <https://news.drom.ru/85635.html> (accessed: January 31, 2023). (In Russian)

26. *V kakikh regionakh Rossii lyubyat elektrokary. Pochti polovina vseh prodannykh v 2021 godu "zelenykh" avtomobiley prishlas' na Moskvu* [What regions of Russia love electric cars. Almost half of all green cars sold in 2021 came from Moscow]. Available at: <https://motor.ru/news/russia-ev-sales-31-01-2022.htm> (accessed: January 31, 2023). (In Russian)

27. Lalinde I., Berrueta A., Valera J. J. et al. Perspective Chapter: Thermal Runaway in Lithium-Ion Batteries. Submitted: February 3rd, 2022. Reviewed: July 13th, 2022. Published: August 27th, 2022. DOI: 10.5772/intechopen.106539.

28. Kanonin Yu. N., Lyshchik A. V., Lopatkina A. V. *Trenazher dlya obucheniya provodnikov passazhirskikh vagonov deystviyam pri pozhare. Tekhnosfernaya i ekologicheskaya bezopasnost' na transporte (TEBTRANS-2018): materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [A simulator for training conductors of passenger cars to act in case of fire. Technospheric and environmental safety in transport (TEBTRANS-2018): Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference]. St. Petersburg, 2018, pp. 67–69. (In Russian)

29. Kanonin Yu. N., Lopatkina A. V. *Ustroystvo dlya obucheniya poezdnoy brigady deystviyam pri pozhare. Professional'noe obrazovanie, nauka i innovatsii v XXI veke: materialy XII Sankt-Peterburgskogo kongressa* [A device for training a train crew on actions in case of fire. Professional education, science and innovations in the XXI century: Materials of the XII St. Petersburg Congress]. 2018, p. 102. (In Russian)

30. *Protivopozharnoe, avariyno-spasatel'noe oborudovanie i trenirovochnye komplekсы dlya MChS. Trenirovochnye komplekсы ISKRA-14S* [Fire-fighting, rescue equipment and training complexes for the Ministry of Emergency Situations. Training complexes ISKRA-14S]. Available at: <https://npp-topaz.ru/index-fire-iskra14c1.html> (accessed: January 31, 2023). (In Russian)

31. Mikolajczak C., White K., Kahn M. et al. Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment. SpringerBriefs in Fire. New York: Springer, 2011. XII. 115 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-3486-3.

32. Ruiz V., Pfrang A., Kriston A. et al. A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018, Iss. 81 (May 2017), pp. 1427–1452. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.195.

Received: February 15, 2023

Accepted: March 01, 2023

Author's information:

Yury N. KANONIN — PhD in Engineering, Associate Professor; yu.n.kanonin@yandex.ru

Andrey V. LYSHCHIK — PhD in Engineering, Associate Professor; mihali@yandex.ru

УДК 625.4

Возможность продления срока службы трамвайного пути в Санкт-Петербурге

Д. А. Басовский¹, О. В. Востриков², Н. М. Панченко¹

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²СПб ГУП «Горэлектротранс», Российская Федерация, 196105, Санкт-Петербург, ул. Сызранская, 15

Для цитирования: Басовский Д. А., Востриков О. В., Панченко Н. М. Возможность продления срока службы трамвайного пути в Санкт-Петербурге // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 52–60. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-52-60

Аннотация

Цель: Рассмотреть ключевые факторы жизненного цикла трамвайного пути: применяемые конструкции пути и используемые в них сочетания типов рельс и оснований. Показать преимущества бесшпальной конструкции трамвайных путей на основании из железобетонной плиты, залитой в 2 слоя. Отдельно обратить внимание на свойства и виды трамвайных рельсов отечественного и импортного производства, выполнить оценку расчетного и фактического их срока службы. **Методы:** Сравнение эксплуатационных и технических показателей рельсов, уложенных в г. Санкт-Петербурге, в том числе импортного производства. **Результаты:** Определено влияние показателя твердости поверхности желобчатых рельсов на срок их службы. Вывод об увеличении межремонтных сроков трамвайных путей при использовании рельсов высокой твердости получен на основе анализа статистических материалов СПб ГУП «Горэлектротранс», который подтвержден результатами расчетов сроков службы рельсов. **Практическая значимость:** Определена экономическая целесообразность заявленных к производству отечественных рельсов ООО «ЕВРАЗ», имеющих высокие параметры твердости, полученные без термического упрочнения. Принята необходимость выполнения программы опытной эксплуатации новых российских трамвайных рельсов в г. Санкт-Петербурге. В рамках реализации этой программы на базе СПб ГУП «Горэлектротранс» изготовлены кривые радиусом 20,30 метра из новых отечественных рельсов, которые показали значения твердости на поверхности катания 342 НВ, 364НВ для рельсов разных марок стали. Выполненная опытная укладка полученных кривых в трамвайные пути г. Санкт-Петербурга позволит проанализировать результаты проводимых обследований в процессе эксплуатации для формирования рекомендаций по применению трамвайных рельсов ООО «ЕВРАЗ».

Ключевые слова: Трамвайный путь, твердость, желобчатый рельс, срок службы, конструкция.

Трамвай является одним из основных видов городского пассажирского транспорта, к достоинствам которого относятся экологичность, высокая провозная способность, бесшумность и комфортность, при условии удовлетворительного состояния путей и подвижного состава. Одними из важных элементов путевого хозяйства, которые обеспечивают развитие трамвайного движения и определяют безопасность пассажирских перевозок, являются конструкция и состояние рельсового пути.

Эффективно и своевременно выполненные ремонтные работы обеспечивают экономию эксплуатационных расходов за счет увеличения межремонтного интервала, сокращения затрат на обслуживание трамвайных путей, при поддержании их в нормативном состоянии [1].

Для решения этих задач требуется применение конструкций пути и материалов, продлевающих срок службы трамвайного пути до капитального ремонта.

Так, в Санкт-Петербурге при ремонте трамвайного пути, размещенного в совмещенном с автодорогой полотне, успешно применяются бесшпальные конструкции пути (рис. 1) на бетонном (монолитном) основании [2].

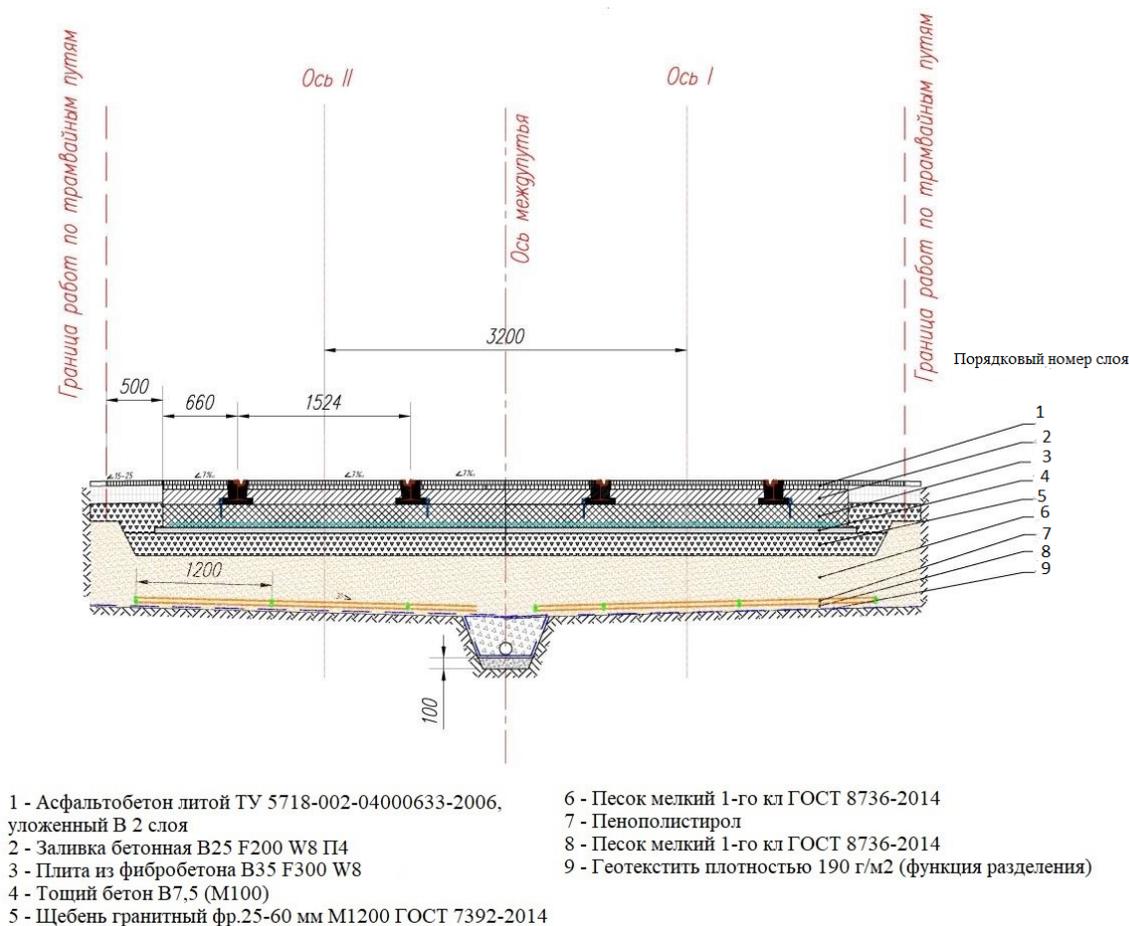


Рис. 1. Конструкция трамвайного пути на основании из железобетонной плиты, залитой в 2 слоя

Конструкция, представленная на рис. 1, не требует послеосадочной выправки, продлевает срок службы асфальтобетонного покрытия, обеспечивая равно нагруженную площадку земляного полотна, использование прирельсовых профилей, обеспечивает достижение приемлемых уровней шума и вибрации.

Срок службы такой конструкции пути зависит в основном от срока службы рельсов до замены, при которой обеспечивается возможность сохранения основания (нижней плиты) при разрушении верхнего слоя неармированного бетона [3, 4].

Для укладки в автодорожном полотне используются желобчатые трамвайные рельсы. На прямых участках допускается использование железнодорожных рельсов при условии формирования желоба для прохода гребня трамвайного колеса с помощью бетонных или полимерных прирельсовых вкладышей, однако такие решения являются более трудоемкими и не вполне технологичными.

Согласно требованиям нормативных документов (СП 98.13330.18), укладка железнодорожных рельсов в кривых допускается лишь при радиусах более 400 м по обеим рельсовым нитям и от 200 до 400 м рельсы железнодорожного типа укладываются с контррельсом, как по внутренней, так и по обеим ниткам. Во всех иных случаях ввиду особенностей вписывания экипажа трамвайного вагона в кривой остается необходимым применение для строительства трамвайных путей рельсов трамвайного профиля.

Однако выпускаемые в России до настоящего времени трамвайные желобчатые рельсы типа Т-62 [5]. имеют существенно меньший, по сравнению с железнодорожными рельсами типа Р-65, показатель твердости поверхности катания. В связи с чем в последнее время при ремонте трамвайных путей в совмещенном с автодорогой полотне применяются рельсы производства VoestAlpine (Австрия), имеющие показатель твердости 340 НВ, достигаемый путем термического упрочнения рельсов.

По данным СПб ГУП «Горэлектротранс», в настоящее время в Санкт-Петербурге эксплуатируются следующие типы рельсов (рис. 2).

Рельсы трамвайного типа, эксплуатируемые в Санкт-Петербурге, имеют разные показатели твердости на поверхности катания, значение которой влияет на их износ и срок службы (62Ri ,60Ri-360НВ; Т-62, Т-58, Тв-60-260НВ; Тв-65-380НВ).

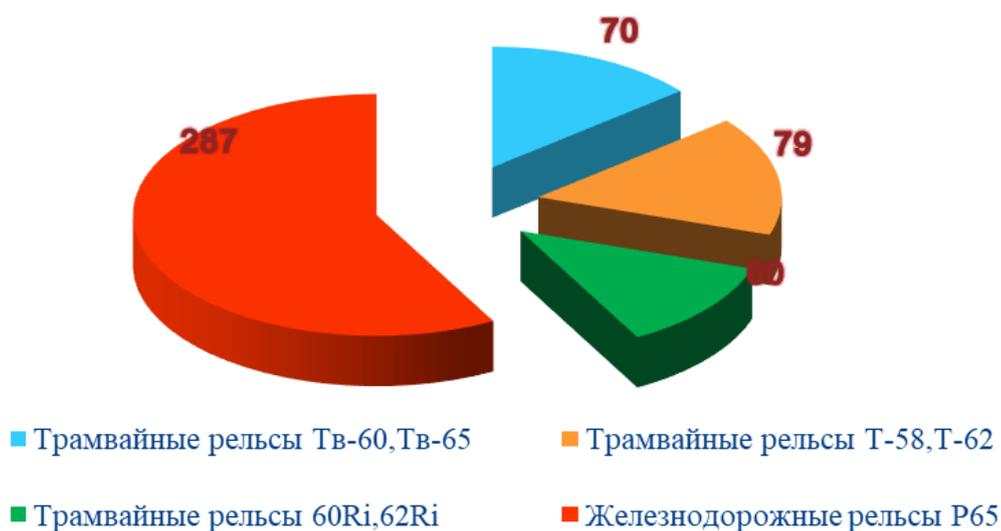


Рис. 2. Развернутая длина трамвайных путей СПб ГУП «Горэлектротранс» с рельсами различных типов на 1 января 2022 г., км оп.



Рис. 3. Интенсивность износа трамвайных рельсов на 1 млн тонн брутто в год

В ОСП «Служба пути» СПб ГУП «Горэлектротранс» были собраны и проанализированы статистические материалы по боковым и вертикальным износам головок различных типов рельсов трамвайного профиля на линиях с бесшпальными конструкциями пути на бетонном (монолитном) основании (рис. 3).

Оценивая полученные результаты на рассмотренных трамвайных линиях, можно сделать вывод, что для повышения надежности эксплуатации, увеличения межремонтных сроков трамвайных путей, исключения необходимости повторных затрат на укладку трамвайных рельсов, а также снижения эксплуатационных затрат целесообразно применять трамвайные рельсы высокой твердости.

Из данных рис. 3 следует, что рельсы типов 62Ri и 60Ri с твердостью до 360 НВ показывают на 40 % меньшую интенсивность износа по сравнению с рельсами типов Тв-62 с твердостью 260 НВ.

Кроме этого, по имеющимся эксплуатационным данным, величина и интенсивность появления волнообразного износа головок трамвайных рельсов малой твердости (Т-62, Т-58, Тв-60) в 2,5–3 раза больше, чем на рельсах повышенной твердости (Ri60, Ri62).

Дополнительно выполнен выборочный сравнительный расчет срока службы рельсов на линиях с бесшпальными конструкциями пути, по которым осуществляет движение современный подвижной состав с повышенными нагрузками на ось.

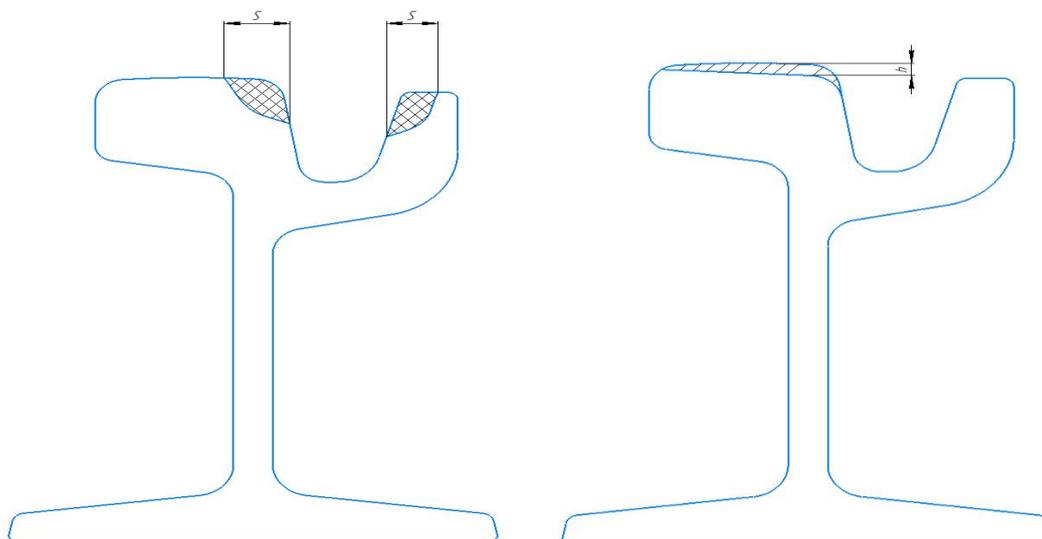


Рис. 4. Боковой и вертикальный износ головки и губки трамвайных рельсов

Величина износа головки рельса изменяется в зависимости от характеристик рельсового металла, способа изготовления рельсов, особенностей конструкции, состояния пути и подвижного состава.

В обычных для трамвая условиях работы предельное состояние рельсов определяется износом, который представляет собой основу для назначения капитального ремонта.

Срок службы трамвайного рельса определяется предельно допустимыми значениями вертикального и бокового износа [6].

ТАБЛИЦА 1. Допустимый боковой и вертикальный износ в соответствии с правилами технической эксплуатации трамвая

Виды износа рельсов	Тип рельсов	Допустимый износ, мм
Желобчатые рельсы		
Вертикальный износ	Тв-60, Т-58, Тв-65, Т-62	20
Боковой износ головки	Тв-60, Т-58, Тв-65, Т-62	18
Боковой износ губки	Тв-60, Т-58	10
	Тв-65, Т-62	18
Одновременный износ головки: по высоте боковой	Тв-60, Т-58	16
	Тв-65, Т-62	15

Для сравнения были выбраны трамвайные линии с использованием рельсов типа 62Ri, 60Ri и типа Тв-62. Результаты, полученные в ходе расчетов сроков службы рельсов [7, 8], подтверждают ранее сделанный вывод о том, что применение трамвайных рельсы высокой твердости 360 НВ увеличивает межремонтные сроки трамвайных путей.



Рис. 5. Прогнозируемый срок службы рельсов

Из данных рис. 5 следует, что срок службы рельсы типов 62Ri и 60Ri с твердостью до 360 НВ на 44 % больше срока службы с рельсами типа Тв-62 с твердостью 260 НВ.

Современная экономическая ситуация ставит вопрос не только о рентабельности поставок импортных рельсов, но и гарантированности требуемых объемов и сроков поставок из-за рубежа. В этих условиях особое значение приобретает вопрос соответствия технических характеристик отечественных трамвайных рельсов современным требованиям для безопасной и надежной эксплуатации трамвайных путей.

В настоящее время компания «ЕВРАЗ» ведет научно-технические разработки новой продукции, направленные на повышение прочности и износостойкости рельсов для городского электротранспорта без термоупрочнения. Научно-исследовательским отделом металлургического комбината АО «ЕВРАЗ ЗСМК» отработана технология производства рельсов типа РТ-62 без закалки с получением твердости и механических свойств рельсов, близких к термически упрочненным. По новой технологии компанией «ЕВРАЗ» изготовлены трамвайные рельсы из разных марок стали, химический состав которых позволяет достичь значений твердости на поверхности катания 320 и 340 НВ.

Исходя из зарубежного опыта и по информации специалистов компании «ЕВРАЗ», имеется положительный результат сравнения опытных партий рельсов типа РТ62 двух уровней твердости (320 и 340 НВ) с зарубежными термически упрочненными аналогами производства VoestAlpine. Повышение твердости достигается без термоупрочнения за счет корректировки химического состава стали и отдельных параметров технологического процесса. Скорректированный химический состав стали обеспечивает хорошую свариваемость, улучшает ремонтпригодность трамвайных рельсов.



Рис. 6. Опытный участок экспериментальных трамвайных рельсов РТ62 категории прочности НТ300 на Петергофском шоссе, конечный пункт «ЛЭМЗ»

СПб ГУП «Горэлектротранс» совместно с компанией ЕВРАЗ разработана программа проведения эксплуатационных испытаний трамвайных рельсов типа РТ62 класса прочности НТ300 двух вариантов химического состава.

В рамках первого этапа испытаний из полученных рельсов на производственной базе СПб ГУП «Горэлектротранс» с помощью рельсогибочного станка были изогнуты рельсы радиусом 20, 30 метров.

При изгибе на рельсах не наблюдается трещин, складок, разрыва металла. Измерения твердости поверхности катания полученных рельсов с помощью электронного твердомера «ТЕМП-2» были проведены согласно порядку работы с прибором. Полученные средние значения составили 342 НВ, 364 НВ для рельсов разных марок стали.

Следующим этапом в рамках реализации программы испытаний выполнена укладка опытных образцов трамвайных рельсов двух типов РТ62 НТ300, профиля Х, прямолинейности В, марки стали Э76ХФ, твердостью на поверхности катания 320НВ и РТ62 НТ300, профиля Х, прямолинейности В, марки стали Э90ХАФ, твердостью на поверхности катания 340 НВ в кривых участках пути, эксплуатируемых в Санкт-Петербурге.

В ходе опытной эксплуатации с учетом интенсивности движения и грузонапряженности участков пути будут проведены обследования экспериментальных участков путей. Последующий анализ полученных данных, выполненный с привлечением специалистов научного сообщества, может дать результаты, которые позволят сделать вывод о целесообразности применения новых трамвайных рельсов производства компании «ЕВРАЗ» при реконструкции, капитальном и текущем ремонте трамвайных путей для повышения их эффективной работы.

Библиографический список

1. Минкин Д. Ю. Совершенствование конструкций трамвайных стрелочных переводов в Санкт-Петербурге / Д. Ю. Минкин, Е. П. Дудкин, Д. А. Басовский и др. // Путь и путевое хозяйство. — 2022. — № 01. — С. 15–16.
2. Дудкин Е. П. Опыт эксплуатации трамвайных путей в Санкт-Петербурге / Е. П. Дудкин, С. В. Китаев, О. В. Востриков // Транспорт Российской Федерации. — 2019. — № 3(82). — С. 47–50.
3. Дудкин Е. П. Отчет о научно-технической работе. Обоснование конструкции трамвайных путей для нового строительства, реконструкции, производства текущего и капитального ремонта в Санкт-Петербурге / Е. П. Дудкин. — СПб.: ПГУПС, 2013.
4. Альбом типовых конструкций трамвайных путей Санкт-Петербурга. — СПб., 2020.
5. ГОСТ Р 55941—2014. Рельсы трамвайные желобчатые. Технические условия.
6. Вериго М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. — М.: Транспорт, 1986. — 556 с.
7. Садиков О. Н. Трамвайные пути. Устройство, ремонт и содержание / О. Н. Садиков. — М.: Транспорт, 1976. — 176 с.
8. Косой Ю. М. Путь и путевое хозяйство трамвая. Учебник для студентов строительных и транспортных специальностей вузов и системы послевузовского образования / Ю. М. Косой. — Нижний Новгород: Штрих-Н, 2008. — 332 с.

Дата поступления: 23.12.2022

Решение о публикации: 12.02.2023

Контактная информация:

БАСОВСКИЙ Дмитрий Аркадьевич — канд. техн. наук, доц.; basovskiy76@mail.ru

ВОСТРИКОВ Олег Владимирович — инженер, начальник службы пути; vost-ol@yandex.ru

ПАНЧЕНКО Наталья Михайловна — канд. техн. наук, доц.; panchnat@rambler.ru

Possibility of Extending Tramway Track Service Life in St. Petersburg

D. A. Basovsky¹, O. V. Vostrikov², N. M. Panchenko¹

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²St. Petersburg State Unitary Enterprise “Gorelektrotrans”, 15, Syzranskaya str., Saint Petersburg, 196105, Russian Federation

For citation: Basovsky D. A., Vostrikov O. V., Panchenko N. M. Possibility of Extending Tramway Track Service Life in St. Petersburg. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 52–60. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-52-60

Summary

Purpose: To consider tramway lifecycle key factors: track applied structures and used therein combinations of rail and foundation types. To show the advantages of sleeper-less tramway structure on the foundation with reinforced concrete slab filled in 2 layers. Separately, to pay attention on the properties and types of tram rails of domestic and imported production, to make assessment of their estimated and actual service life. **Methods:**

Comparison of operational and technical indicators of rails laid in St. Petersburg City, including imported ones. **Results:** The influence of surface hardness indicator of grooved rails on their service life is determined. The conclusion on increase of inter-repair time of tram tracks at the use of high-hardness rails was obtained based on the analysis of St. Petersburg State Unitary Enterprise “Gorelektrotrans” statistical materials which is confirmed by the results of service life calculations. **Practical significance:** Economic feasibility of declared for production EVRAZ LLC rails having hardness high parameters, obtained without thermal hardening, has been determined. The necessity of carrying out the program of experimental operation of new Russian tram rails in St. Petersburg has been accepted. In this program implementation frames, on the basis of St. Petersburg State Unitary Enterprise “Gorelektrotrans”, curves with 20-, 30-meter radius, made from new domestic rails, which have showed 342 HB, 364HB hardness values on rolling surface for different steel grade rails, have been made. Made experimental laying of obtained curves into tram tracks of St. Petersburg City will allow analyzing the results of conducted during operation explorations to form recommendations for the use of EVRAZ LLC tram rails.

Keywords: Tramway track, hardness, grooved rail, service life, structure.

References

1. Dudkin E. P., Kitaev S. V., Vostrikov O. V. Sovershenstvovanie konstruktsiy tramvaynykh strelochnykh perevodov v Sankt-Peterburge [Experience in the operation of tram tracks in St. Petersburg]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Transport of the Russian Federation]. 2019, Iss. 3(82), pp. 47–50. (In Russian)
2. Minkin D. Yu., Dudkin E. P., Basovsky D. A. et al. Opyt ekspluatatsii tramvaynykh putey v Sankt-Peterburge [Improving the design of tram turnouts in St. Petersburg]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Path and track facilities]. 2022, Iss. 01, pp. 15–16. (In Russian)
3. Dudkin E. P. *Otchet o nauchno-tekhnicheskoy rabote. Obosnovanie konstruktsii tramvaynykh putey dlya novogo stroitel'stva, rekonstruktsii, proizvodstva tekushchego i kapital'nogo remonta v Sankt-Peterburge* [Report on scientific and technical work. Justification of the design of tram tracks for new construction, reconstruction, maintenance and overhaul in St. Petersburg]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2013. (In Russian)
4. *Al'bom tipovykh konstruktsiy tramvaynykh putey Sankt-Peterburga* [Album of typical designs of tramways in St. Petersburg]. St. Petersburg, 2020. (In Russian)
5. *GOST R 55941—2014. Rel'sy tramvaynye zhelobchatye. Tekhnicheskie usloviya* [GOST R 55941—2014. Grooved tram rails. Technical conditions]. (In Russian)
6. Verigo M. F., Kogan A. Ya. *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava* [Interaction of track and rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1986, 556 p. (In Russian)
7. Sadikov O. N. *Tramvaynye puti. Ustroystvo, remont i soderzhanie* [Tram tracks. Device, repair and maintenance]. Moscow: Transport Publ., 1976, 176 p. (In Russian)
8. Kosoy Yu. M. *Put' i putevoe khozyaystvo tramvaya. Uchebnik dlya studentov stroitel'nykh i transportnykh spetsial'nostey vuzov i sistemy poslevuzovskogo obrazovaniya* [The way and track economy of the tram. Textbook for students of construction and transport specialties of universities and postgraduate education system]. Nizhniy Novgorod: Shtrik-N Publ., 2008, 332 p. (In Russian)

Received: December 23, 2022

Accepted: February 12, 2023

Author's information:

Dmitriy A. Basovsky — PhD in Engineering, Associate Professor; basovskiy76@mail.ru

Oleg V. Vostrikov — Engineer, Head of Track Service; vost-ol@yandex.ru

Natalia M. Panchenko — PhD in Engineering, Associate Professor; panchnat@rambler.ru

Исследование конструкции земляного полотна на свайном основании с гибким ростверком

Д. В. Серебряков

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: *Серебряков Д. В.* Исследование конструкции земляного полотна на свайном основании с гибким ростверком // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 61–68. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-61-68

Аннотация

Цель: Исследовать земляное полотно автомобильной дороги в конструкции свайного основания, объединенного гибким ростверком из геосинтетического материала. Исследовать, каким образом геосинтетический материал будет работать в таком ростверке. Создать аналитическую модель свайного основания с гибким ростверком. Определить прочность тканого материала, используемого в конструкции. Проанализировать достоинства и недостатки существующих методик расчета конструкции свайного основания, объединенного гибким ростверком из геосинтетического материала. **Методы:** Расчет параметров конструкции из гибкого ростверка, армированного геосинтетическим материалом, производился по трем методикам: британский стандарт BS 8006-2010, немецкая методика EBGEO, метод расчета гибких нитей. **Результаты:** Изучен возникающий в теле насыпи арочный эффект. Просчитаны прогибы в геосинтетическом материале при разных уровнях нагрузки конструкции грунтом. Получены экспериментальные значения усилий в геосинтетическом материале. Установлена «критическая высота» — расстояние от верха сваи, в пределах которого образуется арочный эффект. Установлено численное значение равномерной осадки, при которой на поверхности не проявляется разная жесткость свайного основания. Оценена прочность геосинтетического материала гибкого ростверка основания насыпи автомобильной дороги. Проанализированы существующие методики расчета на соответствие результатам эксперимента. **Практическая значимость:** Разработаны технические решения для конструкций гибких ростверков двух типов, как комбинированных, так и гибких с использованием одного или нескольких слоев высокопрочного геотекстиля с песком в виде геообоймы. Разработанные технические решения удовлетворяют всем требованиям существующих нормативных документов и полученным расчетным показателям, а также требованиям по прочности, надежности и долговечности конструкции. Предложенные конструкции могут быть рекомендованы к практическому использованию.

Ключевые слова: Слабые грунты, конструкция земляного полотна, свайное основание, гибкий ростверк, геосинтетические материалы.

Введение

Условия строительства линейных объектов на территории Российской Федерации достаточно трудные.

Во многом это связано с тем, что на значительной части нашей страны находятся зоны с грунтами, обладающими недостаточными прочностными и деформативными характеристиками.

Такие зоны образовались после схода ледяного покрова, в результате чего избыточное увлажнение грунта привело к ухудшению его характеристик.

Особенно часто территории с залеганием слабых грунтов встречаются на северо-западе России.

Строительство на таких участках может быть организовано по одному из трех основных методов:

- замена слабого грунта на привозной грунт, обладающий лучшими прочностными характеристиками;
- устройство эстакад на участках расположения слабых грунтов;
- применение мероприятий, которые обеспечивают устойчивость грунтов слабого основания.

Последний метод достаточно часто и успешно применяется [1–4].

Одним из таких решений является конструкция земляного полотна на свайном основании с гибким ростверком из геосинтетического материала.

Геосинтетический материал изготавливается из синтетических или природных полимеров, неорганических веществ и широко применяется в практике дорожного строительства [5].

Исследование особенностей работы гибкого ростверка из геосинтетического материала

По сравнению с традиционной конструкцией жесткого ростверка, который устраивается из железобетона, применение гибкого ростверка из геосинтетических материалов позволяет значительно снизить стоимость строительства. При этом надежность сооружения будет обеспечена при соблюдении всех требований нормативной, проектной и технологической документации.

Насыпь на свайном основании с гибким ростверком считается безосадочной и обеспечивает не только устойчивость сооружения, но и снижение временных затрат на выдержку насыпи до завершения процесса консолидации, а также исключает деформации, связанные с ползучестью слабых грунтов.

При расчете конструкции свайного основания, объединенного гибким ростверком из геосинтетического материала, необходимо учитывать так называемый арочный эффект (сводообразование), который перераспределяет напряжения на сваи.

При сводообразовании внутри грунта, если имеется свайное основание, формируется арка между отдельными сваями. В результате такого арочного эффекта на величину суммарной нагрузки будут влиять: высота дорожной насыпи, характеристики грунтов, из которых эта насыпь отсыпана, а также расположение свай в конструкции свайного основания, объединенного гибким ростверком из геосинтетического материала.

Специалисты ПГУПС изучали эффект сводообразования с помощью эксперимента [6], целью которого было выявление всех характеристик, необходимых для проведения расчетов по трем различным методикам. Важнейшим моментом эксперимента являлось определение так называемого коэффициента сводообразования. В дальнейшем, после достижения всех необходимых условий, заданных при проведении эксперимента, рассчитывались напряжения, возникающие в геосинтетическом материале.

Для выполнения эксперимента была создана модель (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид экспериментальной модели

Данная модель имитирует реальную насыпь для автомобильных дорог. Сваи упираются в более мощный слой грунта, роль которого в данной модели играет лист фанеры размером 50×50 см. В качестве свай в данной модели выступают деревянные квадратные бруски 50×50 мм. Чтобы показать упор свай в более крепкий грунт, все бруски были закреплены к листу фанеры на анкерные болты.

Таким образом была образована конструкция участка свайного поля с определенным расстоянием между сваями.

Куст свай объединен гибким ростверком. В качестве материала, выполняющего его роль, была выбрана пленка толщиной 200 мкм. Сверху пленка закреплена на объемную конструкцию, собранную так, чтобы сверху имелась возможность засыпать грунт и таким образом загрузить конструкцию свайного основания.

После сборки аналитической модели был проведен эксперимент для получения данных по прогибу материала гибкого ростверка и необходимых значений для изучения явления сводообразования.

Последовательность проведения эксперимента представлена на рис. 2 и 3.

Экспериментальная конструкция устанавливалась в исходное положение. Замерялся уровень прогиба пленки, который принимался за начальный.

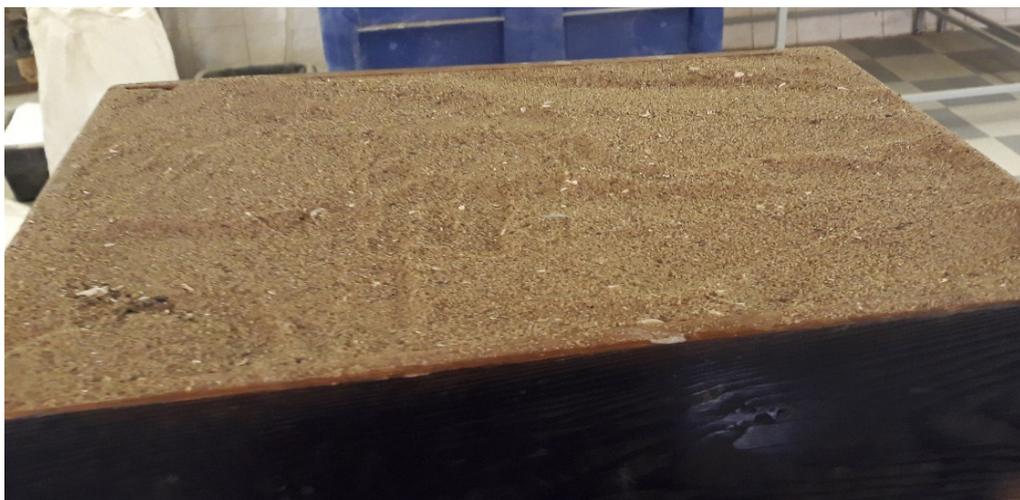


Рис. 2. Засыпка конструкции грунтом



Рис. 3. Прогиб геосинтетического материала под нагрузкой

Внутри экспериментальной конструкции слоями засыпался песок (рис. 2). Масса первого слоя составляла 5 кг. Масса второго слоя еще 5 кг, что в сумме с первым слоем составляло уже 10 кг. Масса третьего слоя составляла 10 кг, что в сумме с двумя предыдущими слоями давало уже 20 кг нагрузки и т. д.

После того, как производилась засыпка каждого слоя, измерялись значения прогиба пленки в разных точках экспериментальной модели (рис. 3). Эти значения использовались для расчета конструкции свайного основания, объединенного гибким ростверком из геосинтетического материала, на прочность.

В результате эксперимента была определена высота слоя грунта, при которой прекращается прогиб геосинтетического материала, и вся дальнейшая нагрузка воспринимается свайным основанием.

Расчет параметров конструкции с гибким ростверком, армированным геосинтетическим материалом

Расчет параметров конструкции с гибким ростверком, армированным геосинтетическим материалом, выполнялся по трем методикам: британский стандарт BS 8006—2010 [7], немецкая методика EBGEO [8], метод расчета гибких нитей [9]. Расчеты были приведены в соответствии с уровнем равномерной осадки, установленным ранее.

Проанализированы все достоинства и недостатки каждой из методик расчета. Все они по-разному зависят от геометрии конструкции свайного основания, от характеристик грунта. Кроме того, каждая из методик различается описанием возникновения арочного эффекта, а также различными свойствами, которые проявляются по мере проведения расчета.

По результатам расчета все методики проанализированы на соответствие результатам эксперимента.

Наиболее подходящей методикой расчета, исходя из результатов анализа, была принята методика EBGEO, которая учитывает деформации как в поперечном, так и в продольном направлении.

Заключение

В ходе данной работы были проанализированы различные варианты конструкций земляного полотна, опирающегося на слабое основание. Были выявлены их преимущества и недостатки. Подробно описана конструкция насыпи на свайном основании с гибким ростверком.

Детально изучен возникающий в теле насыпи арочный эффект. С этой целью была создана экспериментальная модель. Были просчитаны прогибы в геосинтетическом материале при разных уровнях нагрузки конструкции грунтом. Получены экспериментальные значения усилий в геосинтетическом материале. А также был установлен уровень равномерной осадки, когда грунтовая нагрузка воздействует только на оголовки свай.

Был проведен расчет конструкции модели по трем методикам: британский стандарт BS 8006-2010, немецкая методика EBGEO, метод расчета гибких нитей. В соответствии с результатами оценена прочность геосинтетического материала гибкого ростверка основания насыпи автомобильной дороги. А также все

существующие методики расчета были проанализированы на соответствие результатам эксперимента.

На основании полученных прочностных характеристик были разработаны типовые технические решения для конструкций гибких ростверков двух типов, как комбинированных, так и гибких с использованием одного или нескольких слоев высокопрочного геотекстиля с песком в виде геобоймы. Они удовлетворяют всем требованиям существующих нормативных документов и стандартов, а также требованиям по прочности, надежности и долговечности конструкции.

Библиографический список

1. Петряев А. В. Опыт применения передовых конструктивно-технологических решений при возведении земляного полотна мостового перехода через р. Волхов в Ленинградской области / А. В. Петряев, В. В. Ганчиц // Транспортное строительство. — 2018. — № 2. — С. 4–7.

2. Петряев А. В. Деформируемость железнодорожного балласта, армированного геосинтетическими материалами / А. В. Петряев // Транспорт Урала. — 2019. — № 1(60). — С. 49–53.

3. Петряев А. В. Несущая способность железнодорожного земляного полотна, армированного геосинтетическими материалами / А. В. Петряев // Транспорт Урала. — 2019. — № 1(60). — С. 71–75.

4. Kolos A. Study on railway elastic substructure vibration under heavy axle load / A. Kolos, A. Petriaev, A. Konon // AIP Conference Proceedings. Ser.: “Proceedings of the Scientific Conference on Railway Transport and Engineering, RTE 2021”. — 2021. — P. 060006.

5. ГОСТ Р 55028—2012. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Классификация, термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2019. — 11 с.

6. Манафова Д. А. Исследование особенностей работы геосинтетического материала в гибком ростверке / Д. А. Манафова, Т. А. Ткачук, Д. В. Серебряков // Сборник статей V Международной научно-практической конференции. — Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2020. — С. 40–43.

7. BSI BS 8006-1 + A1-2010. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills — CORR: June 30, 2012; AMD: July 31, 2016.

8. Kempfert H.-G. Berechnung von geokunststoffbewehrten Tragschichten über Pfahlelementen / H.-G. Kempfert, M. Stadel, D. Zaeske // Bautechnik. — 1997. — Vol 74. — Iss. 12.

9. Меркин Д. Р. Введение в механику гибкой нити / Д. Р. Меркин. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1980. — 240 с.

Дата поступления: 23.12.2022

Решение о публикации: 16.02.2023

Контактная информация:

СЕРЕБРЯКОВ Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук, доц.; master-cat@bk.ru

Investigation of Subgrade Construction on Pile Foundation with Flexible Grillage

D. V. Serebriakov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Serebriakov D. V. Investigation of Subgrade Construction on Pile Foundation with Flexible Grillage. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 61–68. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-61-68

Summary

Purpose: To investigate the roadbed in the construction of pile foundation united by flexible grillage made of geosynthetic material. To investigate how geosynthetic material will work in such a grillage. To create analytical model of pile foundation with flexible grillage. To determine the strength of such textile material used in the construction. To analyze the advantages and flaws of existing methods for calculating pile foundation structure united by flexible grillage made of geosynthetic material. **Methods:** Structure parameters of flexible grillage reinforced with geosynthetic material, were calculated using three methodologies: British standard BS 8006-2010, German EBGeo methods, flexible thread calculating method. **Results:** Arched effect arising in mound body has been studied. Deflections in geosynthetic material were calculated at different loading levels of the structure by soil. Experimental values of forces in geosynthetic material are obtained. “Critical height” is set - the distance from pile top which within, arched effect is formed. Numerical value of uniform emptying has been established which at, pile foundation different rigidity is not revealed on surface. The strength of geosynthetic material of flexible grillage of highway mound foundation is estimated. Existing calculation methods for compliance with experiment results are analyzed. **Practical importance:** Technical solutions have been developed for two types of flexible grillage structures, both, combined and flexible ones with the use of one or more layers of high-strength geotextile with sand in the form of geo-confining. The developed technical solutions meet all requirements of existing regulatory documents and obtained calculated indicators as well as the requirements for strength, reliability and structure durability. The proposed constructions can be recommended for practical use.

Keywords: Weak soils, subgrade construction, pile foundation, flexible grillage, geosynthetic materials.

References

1. Petryaev A. V., Ganchits V. V. Opyt primeneniya peredovykh konstruktivno-tekhnologicheskikh resheniy pri vozvedenii zemlyanogo polotna mostovogo perekhoda cherez r. Volkhov v Leningradskoy oblasti [Experience in the use of advanced structural and technological solutions in the construction of the subgrade of the bridge over the river. Volkhov in the Leningrad region]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction]. 2018, Iss. 2, pp. 4–7. (In Russian)
2. Petryaev A. V. Deformiruemost' zheleznodorozhnogo ballasta, armirovannogo geosinteticheskimi materialami [Deformability of railway ballast reinforced with geosynthetic materials]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2019, Iss. 1(60), pp. 49–53. (In Russian)
3. Petryaev A. V. Nesushchaya sposobnost' zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna, armirovannogo geosinteticheskimi materialami [Bearing capacity of a railway subgrade reinforced with

geosynthetic materials]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2019, Iss. 1(60), pp. 71–75. (In Russian)

4. Kolos A., Petriaev A., Konon A. Study on railway elastic substructure vibration under heavy axle load. AIP Conference Proceedings. Ser.: “Proceedings of the Scientific Conference on Railway Transport and Engineering, RTE 2021”. 2021, p. 060006.

5. *GOST R 55028—2012. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Materialy geosinteticheskie dlya dorozhnogo stroitel'stva. Klassifikatsiya, terminy i opredeleniya* [GOST R 55028-2012. Public automobile roads. Geosynthetic materials for road construction. Classification, terms and definitions]. Moscow: Standartinform Publ., 2019, 11 p. (In Russian)

6. Manafova D. A., Tkachuk T. A., Serebryakov D. V. *Issledovanie osobennostey raboty geosinteticheskogo materiala v gibkom rostverke. Sbornik statey V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Study of the features of the work of geosynthetic material in a flexible grillage. Collection of articles of the V International Scientific and Practical Conference]. Penza: MTsNS “Nauka i Prosveshchenie” Publ., 2020, pp. 40–43. (In Russian)

7. BSI BS 8006-1 + A1-2010. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills — CORR: June 30, 2012; AMD: July 31, 2016.

8. Kempfert H.-G., Stadel M., Zaeske D. Berechnung von geokunststoffbewehrten Tragschichten über Pfahlelementen. *Bautechnik*, 1997, vol 74, Iss. 12.

9. Merkin D. R. *Vvedenie v mekhaniku gibkoy niti* [Introduction to the mechanics of a flexible thread]. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit. Publ., 1980, 240 p. (In Russian)

Received: December 23, 2022

Accepted: February 16, 2023

Author's information:

Dmitrii V. SEREBRIAKOV — PhD in Engineering, Associate Professor; master-cat@bk.ru

Операционный анализ вариантов организации строительства транспортных обходов городов на целевых и технологических графах

А. В. Кабанов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Кабанов А. В. Операционный анализ вариантов организации строительства транспортных обходов городов на целевых и технологических графах // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 69–76. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-69-76

Аннотация

Цель: Научно-практические предложения по синхронизации комплексных строительных потоков при строительстве транспортных обходов (КАД). Определение порядковых и транзитивных соотношений темпов комплексных потоков в зависимости от приоритетов ввода в эксплуатацию участков КАД и выделения ресурсов по этим фронтам работ. Увязка специализированных потоков строительства автодорожного комплекса выполняется по линейным и сетевым графикам, с учетом критического пути и соотношения темпов потоков. Приоритеты темпов определяются по целевому графу. Получение эффективного варианта организации строительства автодороги по соотношению: «многоуровневая межобъектная взаимоувязка темпов потоков — эффективные эксплуатационно-целевые показатели законченного транспортного обхода». **Методы:** Построение многоуровневой целевой иерархической модели строительства транспортного обхода. Определение множества темпов строительных потоков для всех видов работ и объектов и их отражения на множестве эксплуатационно-целевых показателей при сооружении автодорожного обхода мегаполиса. Операционный анализ вариантов сочетаний темпов строительных потоков. Определение эффективного варианта сочетания темпов для достижения генеральной цели строительства. **Результаты:** Указана необходимость учета взаимосвязи темпов многоуровневых строительных потоков и эксплуатационно-целевых показателей промежуточной и полной готовности автодороги. Получена возможность эффективных вариантов организации строительства транспортных обходов по целевым приоритетам. **Практическая значимость:** Предлагаемые расчеты могут быть рекомендованы для получения эффективных организационно-технологических решений при проектировании и строительстве транспортных обходов городов.

Ключевые слова: Транспортные обходы городов, проект организации строительства, теория множеств, линейный оператор, теория графов, целевой граф, технологический граф, приоритет, тип строительных потоков, фронты работ.

Пятилетний план автодорожного строительства (2023–2027 гг.) является непосредственной реализацией целей национальных проектов Российской Федерации и федеральных программ [1–4]. Общий объем финансирования плана составляет 13,2 трлн руб. На этот период одним из ключевых объектов развития дорожно-транспортного комплекса страны является строительство таких автодорожных коммуникаций, как транспортные обходы городов (кольцевые автодороги — КАД).

В ближайшие 5 лет планируется завершить строительство 46 транспортных обходов мегаполисов, средняя длина каждого составляет 70–200 км. Поэтому исследование и разработка эффективных организационно-технологических решений строительства КАД является актуальным и перспективным направлением.

Целями строительства транспортных обходов городов являются:

1. Повышение уровня экономической связанности территорий страны в рамках развития федеральной магистральной сети.
2. Развитие стратегических транспортных коридоров «Север — Юг», «Запад — Восток».
3. Перенаправление логистических маршрутов в сторону предсказуемых для РФ торговых партнеров.
4. Разгрузка транспортных узлов мегаполисов за счет перенаправления грузопотоков и увеличения их скорости движения, за счет выведения за городскую черту автомобильных потоков и снижения нагрузки на городскую дорожную сеть.
5. Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга и Ленинградской области.
6. Обеспечение круглогодичной связи жителей северных и удаленных районов РФ.
7. Расширение существующих транспортно-логистических и создание новых грузовых транспортных коридоров.
8. Создание единых скоростных транспортных коридоров.
9. Развитие инфраструктуры прилегающих территорий.

Реализация целей народно-хозяйственного планирования развития автодорожных комплексов предполагает выполнение строительно-монтажных работ в установленные Правительством Российской Федерации директивные сроки строительства. Для решения поставленной задачи будущий автодорожный комплекс разделяется на очереди (в зависимости от возможности финансирования); этапы в зависимости от схемы ввода в эксплуатацию; на фронты работ (в зависимости от организационно-технологических решений проекта организации строительства ПОС); на лоты (по схеме конкурсного подбора подрядчиков) (рис. 1).

Размеры участков (лотов) определяются, как правило, от «развязки до развязки». Поэтому выполнение работ и сдача участка в эксплуатацию происходят в определенной очередности — по срокам самостоятельной эксплуатационной готовности [5–7]. Сроки сдачи в эксплуатацию участков определяют директивные темпы (V_i) полотовых строительных потоков.

В целевой постановке готовый автодорожный обход характеризуется эксплуатационно-целевыми показателями ($P_{эц}$), достижение которых является основной задачей проектных, подрядных и эксплуатационных организаций:

- общая протяженность обхода, км;
- пропускная способность, тыс.авт/сутки;
- срок строительства, мес.;
- темп строительства, км/мес.

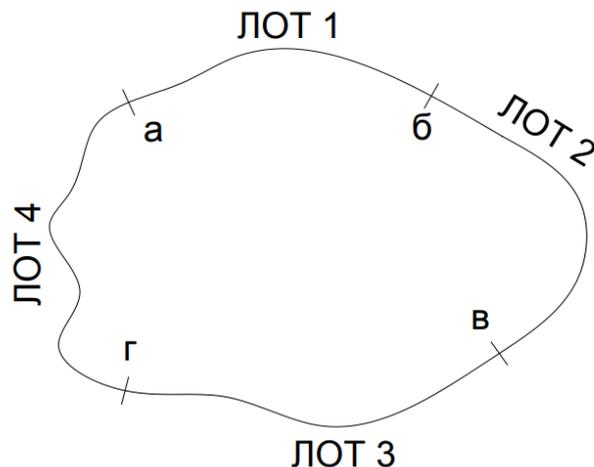


Рис. 1. Типовая схема определения фронтов работ при строительстве транспортных обходов (КАД):
 лоты 1–4 — участки КАД, выделяемые на конкурсной основе подрядным организациям; а–г — транспортные развязки по линии КАД

Достижение генеральной цели строительства (с показателем $P_{эц}$) является результатом реализации множества организационно-технологических решений Y_i , обеспечивающих темпы строительных потоков V_i .

Множество организационно-технологических решений « Y_i » формируется на технологическом графе возведения объектов (рис. 2).

Темпы работ на уровне специализированных потоков определяются на моделях технологических графов организации строительства отдельных видов работ, частных, объектных и специализированных потоков.

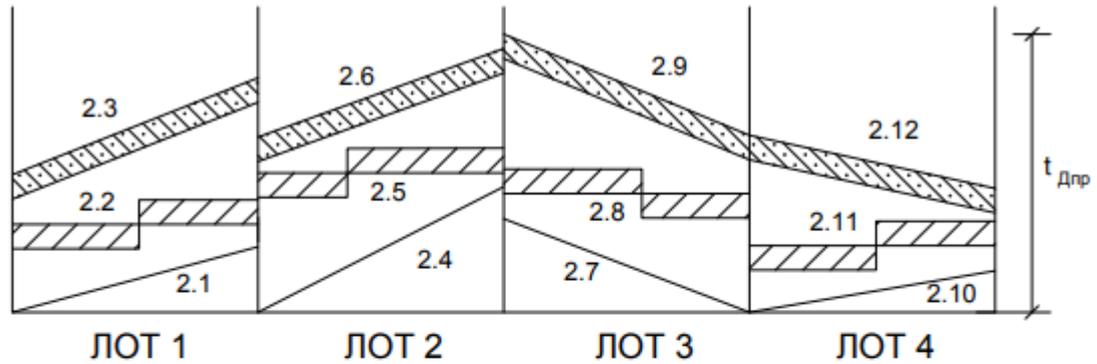
Применение сетевых технологических графиков и современных программных комплексов (Microsoft Project) [7] определяет приоритетный строительный поток с приоритетным темпом по методу критического пути. К сожалению, это не дает возможности синхронизировать развертывание потоков низового уровня (объектных, частных) с целевыми установками по всей стройке.

Синхронизация комплексных потоков (полотовых) необходима ввиду:

а) различной степени сложности участка:

- объем земляных работ на 1 км;
- количество искусственных сооружений на 1 км;
- наличие барьерных сооружений (больших мостов, тоннелей и т. д.);
- коэффициент логистичности для доставки материалов (расположения карьеров, асфальтобетонных заводов, щебеночных заводов и т. д.);
- объемы переноса инженерных сетей;

б) наличие приоритетов для отдельных участков (лотов) по срокам ввода в эксплуатацию. Например, социально-экономическая необходимость ввода участка и транспортных развязок, примыкающих к нему. При этом очередность, этапность



Реализация специализированных строительных потоков по:

- земляному полотну - 2.1, 2.4, 2.7, 2.10;
- искусственным сооружениям - 2.2, 2.5, 2.8, 2.11;
- дорожным одеждам - 2.3, 2.6, 2.9, 2.12.

Рис. 2. График строительства транспортного обхода

развертывания строительных потоков по лотам синхронизируются целевым графиком строительства (рис. 3) транспортного обхода [8–10].

Разработка целевого графа (рис. 3) позволяет осуществить основные решения по синхронизации потоков на уровне лотов (комплексные потоки и ранговые цели строительства; специализированные потоки).

Постановка задачи:

Множество эксплуатационно-целевых показателей ($P_{эц}$, уровень 0) является отображением (оператором) множества темпов строительных потоков (V_i — уровни 1,2).

Интегральным оператором (L) преобразования множество организационно-технологических решений ($F(y)$) на уровне ранговых целей в критерии вершин целевого графа $P_{эц}(g)$ (оценивающий уровень достижения цели) является темп соответствующего строительного потока:

$$L / F \rightarrow g.$$

Оператор L_i по каждому ребру целевого графа преобразует функцию $F \in y$, принадлежащую множеству организационно-технологических решений в функции $L(y) \in g$ на множестве критериев соответствующей вершины целевого графа. В случае появления предпочтения одному из операторов $L_1 - L_4$ ($\vartheta_1 - \vartheta_4$) на основе назначения приоритетов [8, 11–13] одному из лотов, например по степени

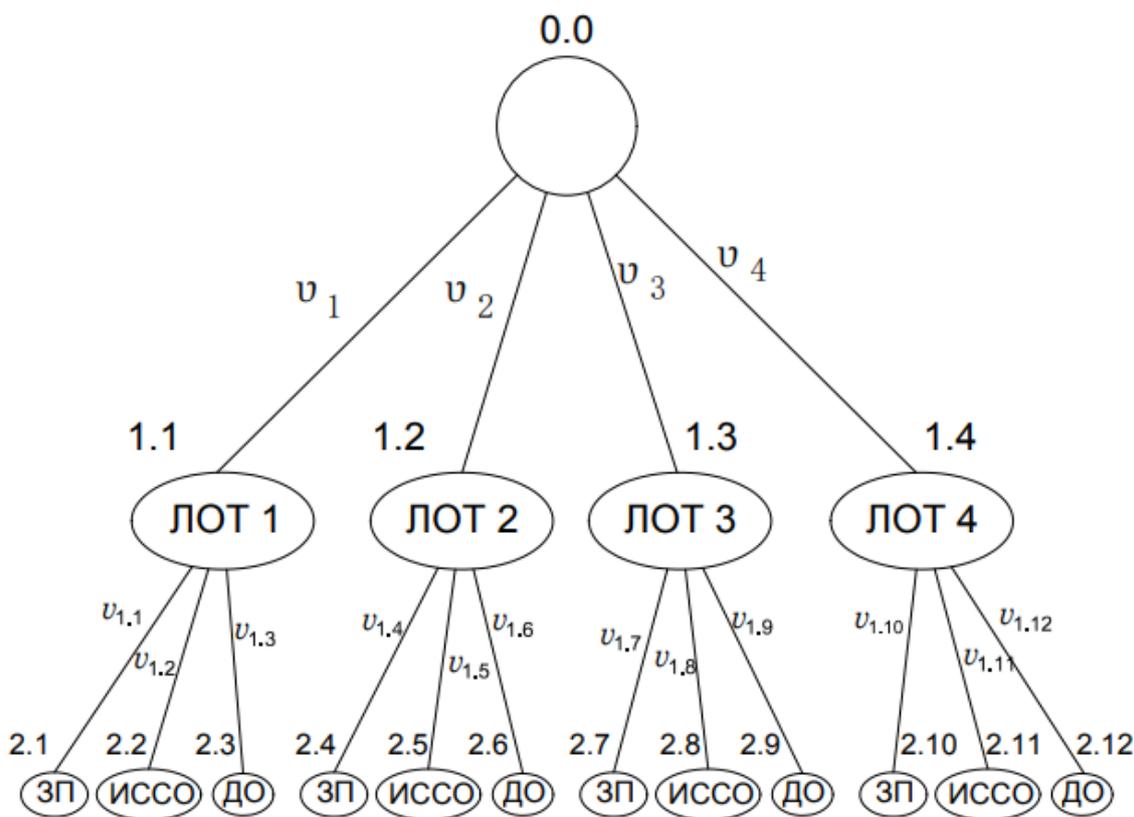


Рис. 3. Целевой граф строительства транспортных обходов (КАД):

- а) 0.0 — генеральная цель строительства КАД;
 б) 1.1–1.4 — ранговые цели строительства подрядчиком на участках по лотам (комплексные строительные потоки); в) 2.1–2.12 — реализация специализированных строительных потоков по земляному полотну (ЗП); искусственным сооружениям (ИССО); дорожным одеждам (ДО); г) $\vartheta_1 - \vartheta_4$ — темпы комплексных потоков; $\vartheta_{1.1} - \vartheta_{1.12}$ — темпы специализированных потоков

сложности (см. п. а), производится соответствующее перераспределение ресурсов для производства работ.

Совместное использование целевого графа и множества календарных графиков по объектам КАД позволяет синхронизировать соотношение темпов по ранговым целям (определяем доминирующие и подчиненные темпы комплексных потоков) и темпов специализированных и объектных потоков.

Это повышает эффективность принимаемых организационно-технологических решений за счет:

- определения приоритетов в развертывании строительных потоков;
- более целенаправленного распределения ресурсов;
- сокращения перерывов между смежными комплексными потоками;
- сокращения сроков производств работ.

Библиографический список

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года № 3363-р «О Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года». — 285 с.
2. Национальный проект «Безопасные качественные дороги». — URL: bkdrf.ru.
3. Перечень мероприятий по осуществлению дорожной деятельности в 2023–2027 годах в отношении автомобильных дорог общего пользования федерального значения, находящихся в доверительном управлении Государственной компании «Российские автомобильные дороги». Утвержден Распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 июня 2022 г. № 1601. — URL: <http://government.ru/docs/45794/>.
4. Федеральный проект «Развитие федеральной магистральной сети». — URL: <http://government.ru/docs/45794/>.
5. Орешкин Б. М. Организация производства земляных работ при строительстве автомобильных дорог / Б. М. Орешкин. — М.: Высшая школа, 1961. — 208 с.
6. Строительство автомобильных дорог: учебник / Коллектив авторов; под ред. В. В. Ушакова, В. М. Ольховикова. — М.: 2013. — 576 с.
7. Колос А. Ф. Управление строительными проектами: учеб. пособие / А. Ф. Колос, А. В. Кабанов, А. А. Конон. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. — 67 с.
8. Бурбаки Н. Основные структуры анализа. Книга 1. Теория множеств / Н. Бурбаки. — М.: Книга по требованию, 2013. — 460 с.
9. Садовничий В. А. Теория операторов / В. А. Садовничий. — 2е изд. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. — 368 с.
10. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев. — М.: Наука, 1981. — 320 с.
11. Абраменко Г. В. Практические рекомендации по применению системного анализа к проектированию сложных технических систем / Г. В. Абраменко. — М.: Оргсервис, 2015. — 265 с.
12. Бусленко Н. П. Лекции по теории сложных систем / Н. П. Бусленко. — М.: Советское радио, 1973. — 286 с.
13. Горлушкина Н. Н. Системный анализ и моделирование информационных процессов и систем / Н. Н. Горлушкина. — СПб.: ИТМО, 2016. — 121 с.

Дата поступления: 23.01.2023

Решение о публикации: 25.02.2023

Контактная информация:

КАБАНОВ Александр Васильевич — канд. техн. наук, доц.; avkabanov07@inbox.ru

Operational Analysis of Options for Construction Organization of City Transport Bypasses on the Basis of Target and Technological Graphs

A. V. Kabanov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kabanov A. V. Operational Analysis of Options for Construction Organization of City Transport Bypasses on the Basis of Target and Technological Graphs. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 69–76. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-69-76

Summary

Purpose: Scientific and practical proposals for the synchronization of complex construction flows (belt-way). Determination of ordinal and transitive ratios of complex flow paces, depending on the priorities of commissioning of belt-way sections and resources allocation on these fronts of work. The linking of specialized flows of highway complex construction is carried out according to linear and network schedules, taking into account critical path and the ratio of the paces of flows. Pace priorities are determined by target graph. Obtaining productive option for highway construction organization according to the ratio: “multilevel inter-object interconnection of flow paces — productive exploitational-target indicators of completed transport bypass” **Methods:** Building of multi-level target hierarchical model for transport bypass construction. Determination of construction flow pace set for all kinds of works and facilities and their reflection on the set of exploitational-target indicators at megapolis highway bypass construction. Operational analysis of options for combinations of construction flow paces. Determination of effective pace combination option to achieve construction general goal. **Results:** The necessity to take into account the interconnection between the paces of multilevel construction flows and exploitational-target indicators of intermediate and full readiness of a highway is indicated. The possibility to find productive options for organizing transport bypass construction by target priorities has been obtained. **Practical significance:** The proposed calculations can be recommended for obtaining effective organizational-technological solutions at projection and construction of city transport bypasses.

Keywords: City transport bypasses, construction organization project, set theory, linear operator, graph theory, target graph, technological graph, priority, construction flow type, work fronts.

References

1. *Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 27 noyabrya 2021 goda № 3363-r “O Transportnoy strategii Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda”* [Decree of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2021 № 3363-r “On the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035”]. 285 p. (In Russian)
2. *Natsional'nyy proekt “Bezopasnye kachestvennyye dorogi”* [National project “Safe quality roads”]. Available at: bkdrf.ru. (In Russian)
3. *Perechen' meropriyatiy po osushchestvleniyu dorozhnoy deyatelnosti v 2023–2027 godakh v otnoshenii avtomobil'nykh dorog obshchego pol'zovaniya federal'nogo znacheniya, nakhodyashchikhsya v doveritel'nom upravlenii Gosudarstvennoy kompanii “Rossiyskie avtomobil'nye dorogi”*. Uтвержден Распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 июня 2022 г.

№ 1601 [List of measures for the implementation of road activities in 2023–2027 in relation to public roads of federal significance, which are in trust management of the State Company “Russian Highways”. Approved by Decree of the Government of the Russian Federation of June 20, 2022 № 1601]. Available at: <http://government.ru/docs/45794/>. (In Russian)

4. *Federal'nyy proekt “Razvitie federal'noy magistral'noy seti”* [Federal project “Development of the federal backbone network”]. Available at: <http://government.ru/docs/45794/>. (In Russian)

5. Oreshkin B. M. *Organizatsiya proizvodstva zemlyanykh rabot pri stroitel'stve avtomobil'nykh dorog* [Organization of earthworks in the construction of highways]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1961, 208 p. (In Russian)

6. *Stroitel'stvo avtomobil'nykh dorog: uchebnik. Kollektiv avtorov; pod red. V. V. Ushakova, V. M. Ol'khovikova* [Road construction: textbook. Team of authors; ed. V. V. Ushakova, V. M. Olkhovikova]. Moscow, 2013, 576 p. (In Russian)

7. Kolos A. F., Kabanov A. V., Konon A. A. *Upravlenie stroitel'nymi proektami: ucheb. posobie* [Management of construction projects: tutorial]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2017, 67 p. (In Russian)

8. Burbaki N. *Osnovnye struktury analiza. Kniga 1. Teoriya mnozhestv* [Basic structures of analysis. Book 1. Set Theory]. Moscow: Kniga po trebovaniyu Publ., 2013, 460 p. (In Russian)

9. Sadovnichiy V. A. *Teoriya operatorov, 2e izd.* [Operator Theory, 2nd ed.]. Moscow: Mosk. un-t Publ., 1986, 368 p. (In Russian)

10. Moiseev N. N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis]. Moscow: Nauka Publ., 1981, 320 p. (In Russian)

11. Abramenko G. V. *Prakticheskie rekomendatsii po primeneniyu sistemnogo analiza k proektirovaniyu slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Practical recommendations on the application of system analysis to the design of complex technical systems]. Moscow: Orgservis Publ., 2015, 265 p. (In Russian)

12. Buslenko N. P. *Lektsii po teorii slozhnykh sistem* [Lectures on the theory of complex systems]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1973, 286 p. (In Russian)

13. Gorlushkina N. N. *Sistemnyy analiz i modelirovanie informatsionnykh protsessov i sistem* [System analysis and modeling of information processes and systems]. St. Petersburg: ITMO Publ., 2016, 121 p. (In Russian)

Received: January 23, 2023

Accepted: February 25, 2023

Author's information:

Aleksandr V. KABANOV — PhD in Engineering, Associate Professor; avkabanov07@inbox.ru

Экспериментальное исследование энергетической эффективности асинхронного тягового привода электровозов при изменяющейся нагрузке

А. А. Зарифьян¹, П. Г. Колпахчьян²

¹ООО «ТМХ Инжиниринг», Российская Федерация, 141009, Мытищи, ул. Колонцова, 4

²Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

Для цитирования: Зарифьян А. А., Колпахчьян П. Г. Экспериментальное исследование энергетической эффективности асинхронного тягового привода электровозов при изменяющейся нагрузке // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 77–92. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-77-92

Аннотация

Цель: Поскольку в эксплуатации электровозы работают в условиях изменяющейся нагрузки, важное значение имеет вопрос о том, каким образом показатели энергетической эффективности тягового привода зависят от реализуемой мощности. Поставлена задача получить в ходе экспериментального исследования основные показатели энергетической эффективности — коэффициент полезного действия, коэффициент использования мощности и коэффициент мощности — асинхронного тягового привода новых грузовых электровозов 2(3)ЭС5С семейства «Атаман» при работе с изменяющейся нагрузкой. **Методы:** Исследования проведены на полноразмерном стенде для испытаний тягового привода. Особое внимание уделено экспериментальному определению потерь в зависимости от реализуемой мощности. Стенд построен по схеме взаимной нагрузки, каждый из двух каналов включает тяговый преобразователь и колесно-моторный блок. Оси колесных пар двух колесно-моторных блоков соединены при помощи динамометрической муфты, которая позволяет регистрировать значения вращающего момента на колесных парах и частоту вращения. **Результаты:** Испытания проведены для шести уровней мощности, что позволило получить зависимости КПД основных элементов привода от изменяющейся нагрузки. Результаты представлены в табличной и графической форме. Показано также, каким образом КПД электровоза изменяется в зависимости от нагрузки (по данным бортового регистратора). **Практическая значимость:** Полученные зависимости КПД основных элементов привода (преобразователя и тягового электродвигателя с редуктором) от величины нагрузки представляют собой исходную информацию для работы алгоритма дискретно-адаптивного управления многодвигательным тяговым приводом, который применен на электровозах 2(3)ЭС5С. Реализация этого алгоритма позволила сократить удельный расход электрической энергии на тягу в пределах 20–30 % в зависимости от условий эксплуатации.

Ключевые слова: Электровоз, асинхронный тяговый привод, энергетическая эффективность при переменной нагрузке, экспериментальное и расчетное определение показателей энергетической эффективности.

Введение

Задача повышения энергетической эффективности электровозов является актуальной, поскольку расходы на закупку электрической энергии на тягу поездов составляют более половины общих расходов железнодорожных компаний на приобретение топливно-энергетических ресурсов [1–3]. Следовательно,

исследовательские и проектно-конструкторские работы, направленные на повышение энергетической эффективности тягового подвижного состава, являются востребованными как в настоящее время, так и в обозримом будущем.

В настоящей статье представлены результаты, полученные в ходе экспериментального определения основных показателей энергетической эффективности, таких как коэффициент полезного действия, коэффициент использования мощности и коэффициент мощности — асинхронного тягового привода электровозов 2(3)ЭС5С семейства «Атаман» при работе с изменяющейся нагрузкой.

Для преодоления наиболее сложных участков с горным профилем пути предусмотрена работа электровоза в ограниченных по времени режимах: в часовом режиме с мощностью на валу тягового двигателя 1100 кВт и в 30-минутном режиме — 1300 кВт (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Основные характеристики электровозов семейства «Атаман»

Электровоз		2ЭС5С	3ЭС5С
Осевая формула		$2 \times (2o-2o)$	$3 \times (2o-2o)$
Мощность на валах ТЭД, кВт	30-минутного режима	10 400	15 600
	часового режима	8800	13 200
	номинального (длительного) режима	8400	12 600
Сила тяги, кН / скорость, км/ч	часового режима	690 / 45	1 035 / 45
	номинального (длительного) режима	547 / 54	821 / 54
Конструкционная скорость, км/ч		120	
Коэффициент мощности, не менее		> 0,95	

Тяговый привод электровоза является многодвигательным и допускает поосное регулирование силы тяги, что предоставляет возможность повышения его энергетической эффективности при работе с переменной нагрузкой [4–7].

Реализация энергоэффективных алгоритмов управления тягой требует проведения на этапе проектирования исследований по оценке энергетических показателей тягового электропривода в различных режимах. В этом случае актуальным является наличие методов определения потерь в элементах тягового электропривода, в первую очередь в тяговых двигателях, допускающих использование на ранних этапах разработки локомотивов. Питание асинхронных тяговых двигателей осуществляется от полупроводниковых преобразователей. Форма напряжения и тока статора значительно отличается от синусоидальной и приводит к увеличению потерь. Поэтому применение традиционно используемых в теории электрических машин методов расчета потерь, хорошо зарекомендовавших себя при питании обмоток синусоидальным напряжением, в рассматриваемом случае не позволяет добиться адекватного определения величины потерь и требует

уточнения [8]. Важным вопросом является оценка достоверности получаемых результатов. Поэтому далее будет необходимо рассмотреть вопросы расчетного определения величины потерь в асинхронном тяговом двигателе при питании от частотного преобразователя и сравнить их с потерями, полученными в результате эксперимента.

Основные показатели энергетической эффективности

Для изучения энергетической эффективности электровоза будем использовать три основных показателя: 1) коэффициент полезного действия (КПД); 2) коэффициент использования мощности (КИМ) и 3) коэффициент мощности.

1. КПД электровоза η определяется как:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{tr}}{P_{tr} + P_{loss} + P_{aux}}, \quad (1)$$

где P_{in} — потребляемая (входная) мощность;

P_{out} — полезная (выходная) мощность, $P_{tr} = P_{out}$ — мощность на тягу;

P_{loss} — мощность потерь;

P_{aux} — мощность вспомогательных потребителей.

Мощность электровоза на тягу P_{tr} равна

$$P_{tr} = F_{tr} \cdot V, \quad (2)$$

где F_{tr} — касательная сила тяги, кН;

V — скорость, м/с.

Необходимо различать КПД локомотива при работе на номинальной мощности в стационарном режиме (приводится в технической документации) и эксплуатационный КПД [1]. Имеются многочисленные публикации по расчетному определению КПД тягового электропривода электровоза как произведения КПД его основных элементов: трансформатора, преобразователя, тяговых двигателей, зубчатой передачи, см. [9–15] и другие работы.

2. КИМ электровоза γ представляет собой отношение полезной мощности электровоза P_{tr} в данный момент к его номинальной мощности P :

$$\gamma = \frac{P_{tr}}{P}. \quad (3)$$

Отметим, что P в (3) равно числу работающих тяговых электродвигателей (ТЭД), умноженному на номинальную мощность одного ТЭД:

$$P = N_M \cdot P_M, \quad (4)$$

где P_M — номинальная мощность (то есть мощность длительного режима) одного ТЭД;

N_M — число ТЭД, работающих в данный момент.

3. Коэффициент мощности λ системы электроснабжения переменного тока определяется как отношение реальной мощности, потребляемой нагрузкой (электровозом), к полной мощности, протекающей в цепи. Коэффициент мощности является важнейшей энергетической характеристикой электровоза, при его уменьшении происходит увеличение потерь энергии в контактной сети и устройствах энергоснабжения, вызываемое сдвигом тока по фазе относительно напряжения и наличием высших гармоник тока. В идеале коэффициент мощности должен стремиться к единице.

Необходимо подчеркнуть, что зависимость КПД электровоза от его касательной мощности вида $\eta = f(P_{\text{тр}})$ лежит в основе алгоритма повышения энергетической эффективности локомотива с многодвигательным тяговым приводом [5].

При определении энергетических показателей электровозов с асинхронным тяговым электроприводом ключевым вопросом является расчет потерь в тяговых двигателях, так как при питании от инвертора из-за наличия высших гармоник они увеличиваются. Точность расчета потерь в этом случае во многом зависит от применяемого подхода к их определению и требует экспериментального подтверждения.

Испытательный стенд

Перейдем к описанию стенда для проведения испытаний тягового привода, в том числе для экспериментального получения значений потерь в зависимости от реализуемой мощности.

Схемы силовых электрических цепей грузового электровоза семейства «Атаман» с асинхронным тяговым приводом приведены в [16, 17], причем обеспечивается индивидуальное (поосное) управление тяговыми двигателями. Все преобразователи каждой секции электровоза питаются от вторичной обмотки тягового трансформатора. Основными элементами индивидуального тягового привода являются тяговый преобразователь (включает входной $4qs$ -преобразователь, звено постоянного тока и автономный инвертор напряжения), асинхронный тяговый двигатель ДТА-1100 и зубчатый редуктор.

Испытания проводились на полноразмерном испытательном стенде (рис. 1). Стенд построен по схеме взаимной нагрузки (рис. 2) и состоит из двух каналов, причем каждый канал включает тяговый преобразователь и колесно-моторный блок. Индуктивность и активное сопротивление дросселя L (имитатора тягового трансформатора)



Рис. 1. Полноразмерный стенд для испытаний тяговой системы электровоза (общий вид)

подобраны равными параметрам вторичной обмотки ТТ. Мощность на валу двигателя ДТА-1100 составляет 1050 кВт в длительном режиме и 1100 кВт — в часовом. Передаточное отношение тягового редуктора равно $121/18 = 6,72$.

Источником питания статорных обмоток каждого двигателя является преобразователь, поэтому стенд позволяет проводить испытания не только двигателей как таковых, но и преобразователей и привода в целом. Кроме того, схема взаимной нагрузки более предпочтительна с точки зрения снижения затрат энергии при проведении испытаний [18].

Оси колесных пар двух колесно-моторных блоков соединены при помощи динамометрической муфты (*датчик момента*), которая позволяет регистрировать значения вращающего момента на колесных парах и частоты вращения.

При испытаниях один канал является **активным** (испытываемым), показан на схеме рис. 2 справа, он включает U_2 , C и U_4 . На активном канале установлено программное обеспечение (прошивка) тяговой системы электровоза, что позволяет управлять величиной крутящего момента двигателя при помощи аналога контроллера машиниста.

Другой канал является **пассивным** (нагрузочным), на схеме слева, он включает U_1 , C и U_3 . На пассивном канале, который имитирует нагрузку, установлена промышленная прошивка, которая обеспечивает поддержание заданной частоты вращения двигателя (то есть скорости движения) при любой величине крутящего момента. При проведении испытаний испытываемый канал работает в двигательном режиме, нагрузочный — в режиме рекуперации. Подпитка осуществляется

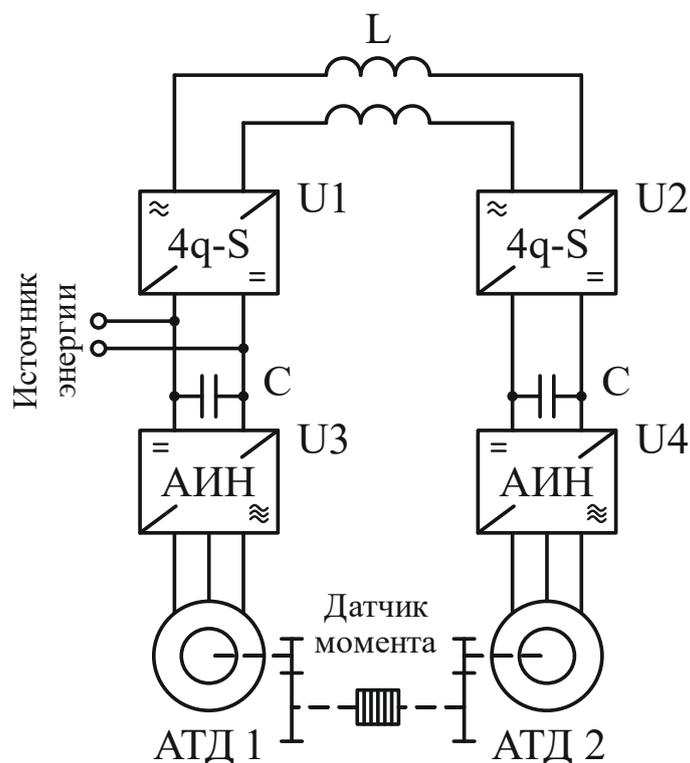


Рис. 2. Принципиальная схема стенда: L — имитатор тягового трансформатора; $U1, U2$ — $4q-s$ -преобразователь; C — звено постоянного напряжения; $U3, U4$ — автономный инвертор напряжения; АТД1, АТД2 — тяговый электродвигатель

током постоянного напряжения 2 кВ (*источник энергии*) в звено постоянного напряжения пассивного канала.

Стенд позволяет воспроизводить следующие режимы: 1) работа в режиме тяги или электрического торможения; 2) изменение направления вращения. Стенд дает возможность проводить испытания:

- при скорости вращения ТЭД от 0 до 1000 об/мин при постоянном моменте;
- при скорости вращения ТЭД от 1000 до 2680 об/мин при постоянной мощности.

Испытательный стенд оснащен измерительным комплексом, который предназначен для опроса всех датчиков нагрузочного комплекса, тягового электропривода и оборудования стенда; отображения полученной информации в цифровом и графическом виде; записи сигналов на жесткий диск с возможностью последующей обработки и анализа записанной информации.

Испытания асинхронного тягового привода в длительном режиме

Перейдем к изложению результатов, полученных при работе тягового привода в длительном режиме, при частоте вращения колесной пары $n_{\text{КП}} = 242,9$ об/мин.

Электрические измерения проводились на активном канале, входом являются клеммы 4qs-преобразователя U_2 , выходом являются три фазы автономного инвертора напряжения U_4 .

Мощность и КПД преобразователя

Мгновенная мощность на входе в преобразователь P_{in}^{conv} и на выходе P_{out}^{conv} (на рис. 3 обозначены как P_{in} и P_{out}) определяются следующим образом:

$$P_{in}^{conv} = I_{in} \cdot U_{in}, \quad (5)$$

$$P_{out}^{conv} = I_a \cdot U_a + I_b \cdot U_b + I_c \cdot U_c, \quad (6)$$

где I_{in}, U_{in} — мгновенные значения тока и напряжения на входе 4qs-преобразователя U_2 ;

$I_a, I_b, I_c, U_a, U_b, U_c$ — мгновенные значения фазных токов и напряжений на выходе автономного инвертора напряжения U_4 .

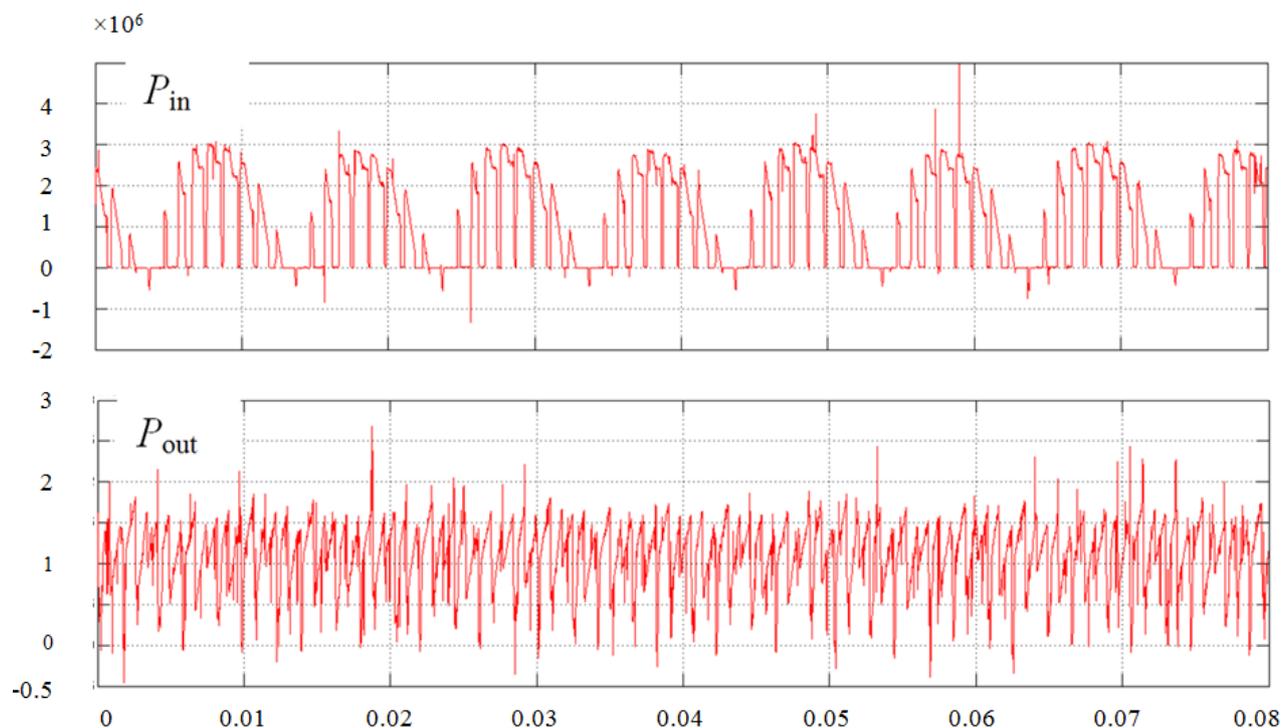


Рис. 3. Мгновенная мощность на входе (P_{in}) и на выходе (P_{out}) преобразователя:
по горизонтали — время, с; по вертикали — мощность, Вт

Энергию на входе преобразователя E_{in} и на его выходе E_{out} за время $t_1 — t_0$ вычисляем путем интегрирования:

$$E_{in} = \int_{t_0}^{t_1} (I_{in} \cdot U_{in}) dt, \quad (7)$$

$$E_{out} = \int_{t_0}^{t_1} (I_a \cdot U_a + I_b \cdot U_b + I_c \cdot U_c) dt. \quad (8)$$

Среднюю мощность на входе P_{in}^* и на выходе преобразователя P_{out}^* за время $t_1 — t_0$ находим соответственно как:

$$P_{in}^* = \frac{1}{t_1 - t_0} E_{in}, \quad (9)$$

$$P_{out}^* = \frac{1}{t_1 - t_0} E_{out}. \quad (10)$$

В длительном режиме получаем следующие значения: на входе преобразователя $P_{in}^* = 1117$ кВт, на выходе преобразователя $P_{out}^* = 1093$ кВт. Отсюда КПД преобразователя $\eta_{conv} = P_{out}^* / P_{in}^* = 1093 / 1117 = 0,9785$.

Вращающий момент на колесной паре и КПД тягового привода Величина вращающего момента на динамометрической муфте (то есть на колесной паре) в длительном режиме составляет $T_{КП} = 40,46$ кН·м. В спектре момента отсутствуют гармоники с частотами ниже 30 Гц, которые могли бы попасть в резонанс с собственными частотами механической части.

На динамометрической муфте частота вращения составила $n_{КП} = 242,9$ об/мин, момент $T_{КП} = 40,46$ кН·м, отсюда механическая мощность на колесной паре в длительном режиме равна:

$$P_{КПмех} = \pi \cdot n_{КП} \cdot T_{КП} / 30 = \pi \cdot 242,9 \cdot 40,46 / 30 = 1029,2 \text{ кВт}; \quad (11)$$

КПД колесно-моторного блока составляет:

$$\eta_{drive} = P_{КПмех} / P_{out}^* = 1029,2 / 1093 = 0,9416; \quad (12)$$

а КПД всего активного канала (то есть тягового привода в составе преобразователя и колесно-моторного блока):

$$\eta = P_{КПмех} / P_{in}^* = 1029,2 / 1117 = 0,9214. \quad (13)$$

Полагая потери в редукторе равными 2 %, получаем из (12) КПД тягового двигателя в длительном режиме:

$$\eta_{\text{ТЭД}} = \eta_{\text{drive}} / 0,98 = 0,9416 / 0,98 = 0,9608. \quad (14)$$

Отметим, что мощность двигателя ДТА-1100 в длительном режиме, приведенная в технической документации, равна 1050 кВт и измерена на валу двигателя. С учетом 2 % потерь в редукторе, получаем мощность на колесной паре, равную 1029 кВт.

Испытания тягового привода при переменной нагрузке

Вопрос о том, каким образом КПД тягового привода зависит от величины реализуемой мощности, имеет большое практическое значение, и по этой причине постоянно привлекает внимание исследователей.

Поэтому были проведены специальные испытания по определению значений КПД асинхронного тягового привода при изменяющейся нагрузке, что соответствует реальным условиям работы электровоза. Было проделано следующее. Частота вращения колесной пары $n_{\text{КП}}$ при помощи нагрузочного канала поддерживалась постоянной, соответствующей скорости движения электровоза в длительном режиме. В то же время вращающий момент $T_{\text{КП}}$ при помощи испытуемого канала ступенчато увеличивался, и в результате были получены семь уровней мощности, причем седьмой уровень соответствует длительному режиму.

По строкам табл. 2 расположены результаты, полученные при различных уровнях мощности. В первом столбце каждой строки приведены значения мощности $P_{\text{in}}^{\text{conv}}$ на входе в преобразователь, далее для каждого уровня мощности, то есть по каждой строке, даны:

2-й столбец — соответствующее значение коэффициента использования мощности γ ;

3-й столбец — потери в преобразователе ΔP_{conv} ;

4-й столбец — значение мощности на выходе преобразователя, равное мощности на входе в двигатель $P_{\text{out}}^{\text{conv}} = P_{\text{in}}^{\text{drive}}$;

5-й столбец — потери в двигателе и тяговом зубчатом редукторе ΔP_{drive} ;

6-й столбец — мощность на динамометрической муфте $P_{\text{out}}^{\text{drive}} = P_{\text{КПмех}}$;

Элемент $(i, 7)$ — КПД преобразователя для i -го уровня мощности ($i = 1, \dots, 6$), получен делением элемента $(i, 4)$ на элемент $(i, 1)$, то есть $\eta_{\text{conv}} = P_{\text{out}}^{\text{conv}} / P_{\text{in}}^{\text{conv}}$.

Элемент $(i, 8)$ — КПД колесно-моторного блока (двигателя вместе с редуктором), получен делением элемента $(i, 6)$ на элемент $(i, 4)$, то есть $\eta_{\text{drive}} = P_{\text{out}}^{\text{drive}} / P_{\text{in}}^{\text{drive}}$.

Элемент $(i, 9)$ — суммарный КПД преобразователя и колесно-моторного блока, получен делением элемента $(i, 6)$ на элемент $(i, 2)$, то есть в итоге $\eta = P_{\text{out}}^{\text{drive}} / P_{\text{in}}^{\text{conv}} = \eta_{\text{conv}} \times \eta_{\text{drive}}$.

ТАБЛИЦА 2. Результаты испытаний тягового привода при переменной нагрузке

	P_{in}^{conv} , кВт	γ	ΔP_{conv} , кВт	$P_{out}^{conv} = P_{in}^{drive}$, кВт	ΔP_{drive} , кВт	P_{out}^{drive} , кВт	η_{conv}	η_{drive}	η
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	63	0,06	11	52	29	23	0,825	0,442	0,365
2	271	0,24	13	258	32	226	0,952	0,876	0,834
3	488	0,44	16	472	40	432	0,967	0,915	0,885
4	707	0,63	18	689	47	642	0,974	0,932	0,908
5	900	0,81	21	879	55	824	0,977	0,937	0,915
6	1026	0,92	23	1003	60	943	0,978	0,940	0,919
7	1117	1,00	24	1093	64	1029	0,98	0,942	0,921

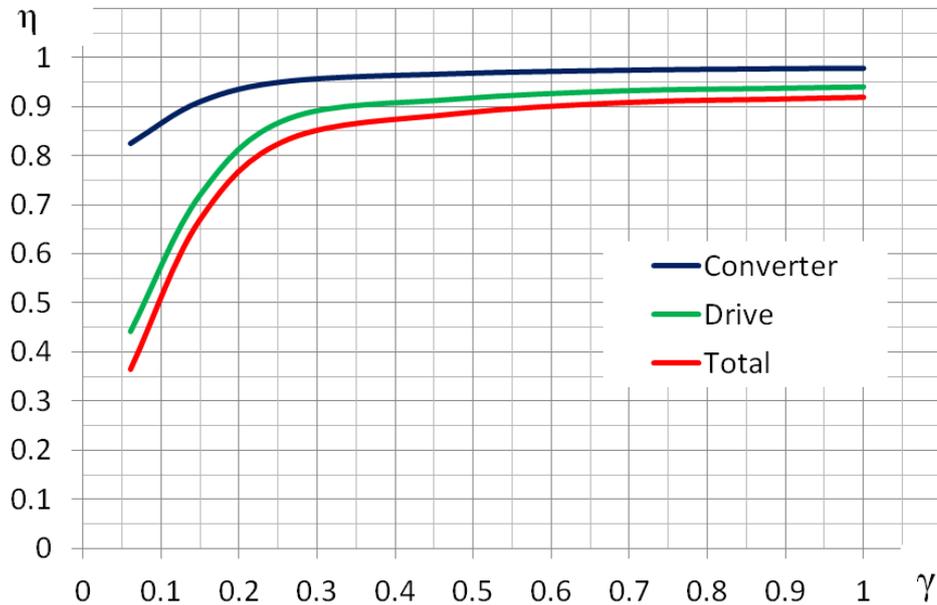


Рис. 4. Изменение КПД тягового привода при переменной нагрузке:

- синяя линия — КПД преобразователя (Converter);
- зеленая линия — КПД колесно-моторного блока (Drive);
- красная линия — КПД тягового привода (Total)

В соответствии с табл. 2 на рис. 4 показано поведение КПД преобразователя η_{conv} , КПД колесно-моторного блока η_{drive} и суммарного КПД $\eta = \eta_{conv} \times \eta_{drive}$ в зависимости от коэффициента использования мощности γ .

Видим, что характер изменения суммарного КПД η определяется главным образом поведением коэффициента η_{drive} (зеленая линия), то есть характером изменения КПД тягового электродвигателя в зависимости от нагрузки. В итоге получено, что при работе с неполной нагрузкой, то есть при $0,06 < \gamma < 0,5$, значение η существенно меньше, чем при работе с $\gamma \geq 0,5$.

Изменение КПД электровоза при работе с переменной нагрузкой

На рис. 5 показано изменение КПД электровоза с асинхронным тяговым приводом при работе с переменной нагрузкой. Диаграмма построена путем статистической обработки записей бортового регистратора, полученных за время большого числа поездок [4–6, 19].

Здесь учитывается совместная работа трансформатора, преобразователей, тяговых двигателей, механической части и другого оборудования. Таким образом, здесь принимаются во внимание как потери, так и затраты электровоза на собственные нужды (компрессоры, вентиляция и т. п.), то есть это результат многократных экспериментов, условия которых определялись реальными режимами работы локомотива в эксплуатации.

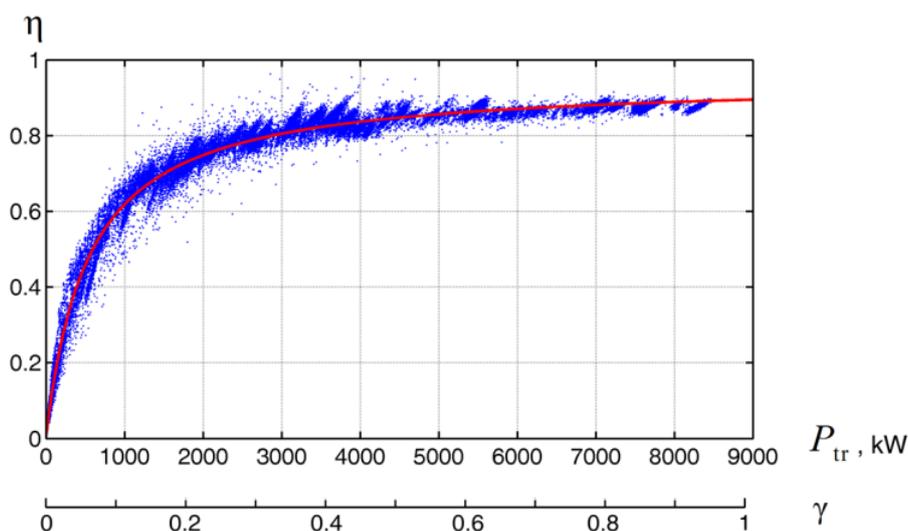


Рис. 5. Изменение КПД электровоза в зависимости от полезной мощности P_{tr} , кВт, и коэффициента использования мощности γ (по данным бортового регистратора)

Коэффициент мощности λ асинхронного тягового привода в ходе опытных поездок имел значения не менее 0,99, что свидетельствует о минимальном уровне потерь энергии.

Заключение

Приведены описание и схема полноразмерного стенда, представлены результаты испытаний асинхронного тягового привода в длительном режиме. Дано экспериментальное определение основных показателей энергетической эффективности привода, таких как коэффициент полезного действия и коэффициент мощности, при различной нагрузке.

Изучен практически важный вопрос о том, каким образом КПД тягового привода зависит от реализуемой мощности. Испытания проведены для шести уровней мощности, что позволило получить зависимости КПД основных элементов привода — преобразователя и двигателя с редуктором — от изменяющейся нагрузки. Установлено также, каким образом КПД электровоза изменяется в зависимости от нагрузки (по данным бортового регистратора). Коэффициент мощности асинхронного тягового привода находится на уровне 0,99.

Реализация алгоритма дискретно-адаптивного управления многодвигательным тяговым приводом, исходной информацией для которого послужили представленные в настоящей работе зависимости, позволила сократить удельный расход электрической энергии на тягу в пределах 20–30 % [17, 19, 20].

Библиографический список

1. Гапанович В. А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, Б. А. Аржанников и др.; под ред. В. А. Гапановича. — М.: МИСиС, 2012. — 620 с.
2. Brecher A. Best Practices and Strategies for Improving Rail Energy Efficiency: Technical reports / A. Brecher, J. Sposato, B. Kennedy // Office of Research and Development. Washington, DC 20590. — Report number: DOT/FRA/ORD-14/02. — 28 jan. 2014.
3. Версия годового отчета ОАО «РЖД» за 2019 год по итогам утверждения Правительством Российской Федерации (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30 сентября 2020 г. № 2509-п). — URL: <https://ar2019.rzd.ru/ru/appendices>.
4. Зарифьян А. А. Алгоритм повышения энергетической эффективности электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока / А. А. Зарифьян // Вестник РГУПС. — 2016. — № 1. — С. 50–61.
5. Патент № 2617857 Российская Федерация, МПК В60L 15/20, В61С 15/00, В60К 31/00, В61С 17/12. Способ управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой / А. А. Андрющенко, А. А. Зарифьян, Ю. А. Орлов и др. — 2017. — URL: <https://patents.google.com/patent/RU2617857C2/ru>.
6. Andrewshchenko A. Reduction of electric locomotive's energy consumption by scalable tractive power control / A. Andrewshchenko, P. Kolpahchyan, Jr. A. Zarifyan // Transport Problems. Scientific journal. — 2018. — Vol. 13. — Iss. 2. — Pp. 103–110.
7. Zarifyan Jr. A. Increasing the Energy Efficiency of Rail Vehicles Equipped with a Multi-Motor Electrical Traction Drive, 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED) / Jr. A. Zarifyan, N. Grebennikov, T. Talakhadze et al. — 2019, pp. 1–5. — DOI: 10.1109/IWED.2019.8664283.
8. Колпахчян П. Г. Потери в асинхронном тяговом двигателе при питании от преобразователя частоты и числа фаз / П. Г. Колпахчян, В. И. Захаров // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. — 2005. — № 48. — С. 78–88.

9. Бабич В. М. Повышение энергетической эффективности электровозов / В. М. Бабич. — Омск: Омская гос. акад. путей сообщения, 1995. — 112 с.
10. Плаксин А. В. Пути снижения расхода электрической энергии при эксплуатации пассажирских электровозов на равнинных участках железных дорог / А. В. Плаксин, С. В. Швецов // Известия Транссиба. — Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2017. — № 1(29). — С. 35–47.
11. Плаксин А. В. Пути повышения энергетической эффективности пассажирских электровозов при эксплуатации на равнинных участках железных дорог / А. В. Плаксин, С. В. Швецов // Известия Транссиба. — Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2017. — № 3(31). — С. 43–54.
12. Гетьман Г. К. Еще раз об определении экономии электроэнергии на тягу за счет частичного отключения тяговых двигателей электроподвижного состава / Г. К. Гетьман, В. Е. Васильев // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. — Днепропетровск, 2013. — Вип. 5(47). — С. 47–55.
13. Саблин О. И. Снижение избыточной мощности тягового средства в процессе движения / О. И. Саблин, В. В. Артемчук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2012. — № 6/8(60). — С. 34–37.
14. Сорокин С. В. Расчет потерь в тяговых двигателях постоянного тока в широком диапазоне регулирования / С. В. Сорокин // Электромеханика. — 1990. — № 7. — С. 46–49.
15. Шаговик А. Е. Двухуровневая система управления асинхронным тяговым приводом локомотива / А. Е. Шаговик // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2005. — № 1. — С. 60–65.
16. Знакомьтесь: электровоз 2ЭС5С // Локомотив. — 2018. — № 8. — С. 35–37.
17. Электровозы 2ЭС5С и 3ЭС5С: асинхронная тяга под флагом России // Техника железных дорог. — 2020. — № 1(49). — С. 10–13.
18. Попов Д. И. Научные основы создания энергоэффективных методов и средств испытаний электрических машин / Д. И. Попов. — Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2019. — 175 с.
19. Зарифьян А. А. Сокращение расхода электроэнергии грузовыми магистральными электровозами 2(3)ЭС5С при работе в энергоэффективном режиме по итогам эксплуатационных испытаний / А. А. Зарифьян, М. А. Шрайбер // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 4. — С. 7–23. — DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-7-23.
20. URL: <https://tmholding.ru/products/gruzovye/elektrovozy-peremennogo-toka-seriya-2es5s-3es5s/>.

Дата поступления: 01.02.2023

Решение о публикации: 28.02.2023

Контактная информация:

ЗАРИФЬЯН Александр Александрович — канд. техн. наук, эксперт; zarifyan.alexander@gmail.com
КОЛПАХЧЬЯН Павел Григорьевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой; kolpahchyan@mail.ru

Experimental Research of Energetic Efficiency of Electric Locomotive Asynchronous Traction Drive at Changing Load

A. A. Zarifyan¹, P. G. Kolpahchyan²

¹“TMH Engineering” Ltd, 4, Kolontzova str., Mitizhshi, 141009, Russian Federation

²Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

For citation: Zarifyan A. A., Kolpahchyan P. G. Experimental Research of Energetic Efficiency of Electric Locomotive Asynchronous Traction Drive at Changing Load. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 77–92. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-77-92

Summary

Purpose: As electric locomotives work in changing load conditions, the question on how traction drive energetic efficiency indicators depend on being realized capacity has important meaning. The task is set to get in the course of experimental research — energetic efficiency main indicators — efficiency coefficient, capacity usage coefficient and capacity coefficient — of asynchronous traction drive of new freight electric locomotives 2(3)ES5S of “Ataman” family at work with changing load. **Methods:** Studies are given on full-size bench for traction drive testing. Special attention is paid on experimental definition of losses depending on being realized capacity. The bench’s built according to mutual load scheme, each of two channels includes traction converter and wheel-drive block. Wheelset axles of two wheel-drive blocks are connected with the help of torque clutch which allows to register torque values on wheelsets and rotation frequency. **Results:** Tests are hold for capacity six levels that has made it possible to obtain dependencies of efficiency coefficients of drive main elements versus changing load. The results are shown in tabular and graphical forms. It’s also shown how efficiency coefficient does change depending on load (according to board logger). **Practical significance:** The obtained dependencies of efficiency coefficients of drive main elements (converter and traction electric drive with reducer) from load value represent initial information for the work of the algorithm of discrete-adaptive control of multidrive traction gear which’s applied on electric locomotive 2(3)ES5S. This algorithm realization has allowed to cut specific expenditure of electric energy on traction in 20–30% limits depending on exploitation conditions.

Keywords: Electric locomotive, asynchronous traction gear, energetic efficiency at changing load, energetic efficiency indicator experimental and calculated definition.

References

1. Gapanovich V. A., Avilov V. D., Arzhannikov B. A. *Energoberezhenie na zheleznodorozhnom transporte* [Energy saving in railway transport]. Moscow: MISiS Publ., 2012, 620 p. (In Russian)
2. Brecher A., Sposato J., Kennedy B. Best Practices and Strategies for Improving Rail Energy Efficiency: Technical reports. Office of Research and Development. Washington, DC 20590. Report number: DOT/FRA/ORD-14/02. 28 jan. 2014. (In Russian)
3. *Versiya godovogo otcheta OAO “RZhD” za 2019 god po itogam utverzhdeniya Pravitel’stvom Rossiyskoy Federatsii (Rasporyazhenie Pravitel’sтва Rossiyskoy Fede-ratsii ot 30 sentyabrya 2020 g. № 2509-r)* [Version of the annual report of Russian Railways for 2019 based on the results of approval

by the Government of the Russian Federation (Decree of the Government of the Russian Federation dated September 30, 2020 No. 2509-r)]. Available at: <https://ar2019.rzd.ru/ru/appendices>. (In Russian)

4. Zarif'yan A. A. Algoritm povysheniya energeticheskoy effektivnosti elektro-vozov s asinkhronnym tyagovym privodom pri pitanii ot seti postoyannogo toka [Algorithm for improving the energy efficiency of electric locomotives with asynchronous traction drive when powered by a DC network]. *Vestnik RGUPS* [Vestnik RGUPS]. 2016, Iss. 1, pp. 50–61. (In Russian)

5. Andryushchenko A. A., Zarif'yan A. A., Orlov Yu. A. et al. *Sposob upravleniya energeticheskoy effektivnost'yu lokomotiva pri rabote s nepolnoy nagruzkoy* [The method of managing the energy efficiency of a locomotive when operating with partial load]. Patent RF, no. 2617857, 2017. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2617857C2/ru>. (In Russian)

6. Andrewshchenko A., Kolpakhchyan P., Zarifyan Jr. A. Reduction of electric locomotive's energy consumption by scal-able tractive power control. *Transport Problems. Scientific journal*. 2018, vol. 13, Iss. 2, pp. 103–110.

7. Zarifyan Jr. A., Grebennikov N., Talakhadze T. et al. Increasing the Energy Efficiency of Rail Vehicles Equipped with a Multi-Motor Electrical Traction Drive, 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED). 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/IWED.2019.8664283.

8. Kolpakhch'yan P. G., Zakharov, V. I. Poteri v asinkhronnom tyagovom dvigatele pri pitanii ot preobrazovatelya chastoty i chisla faz [Losses in an asynchronous traction motor when powered by a frequency and phase number converter]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovostroyeniya* [Bulletin of the All-Russian Research and Design institute of electric locomotive building]. 2005, Iss. 48, pp. 78–88. (In Russian)

9. Babich V. M. *Povyshenie energeticheskoy effektivnosti elektrovozov* [Improving the energy efficiency of electric locomotives]. Omsk: Omskaya gos. akad. putey soobshcheniya Publ., 1995, 112 p. (In Russian)

10. Plaksin A. V., Shvetsov S. V. Puti snizheniya raskhoda elektricheskoy energii pri ekspluatatsii passazhirskikh elektrovozov na ravninnykh uchastkakh zheleznykh dorog [Ways to reduce the consumption of electrical energy during the operation of passenger electric locomotives on the flat sections of railways]. *Izvestiya Transsiba* [Izvestiya Transsib]. Omsk: Omskiy gos. un-t putey soobshcheniya Publ., 2017, Iss. 1(29), pp. 35–47. (In Russian)

11. Plaksin A. V., Shvetsov S. V. Puti povysheniya energeticheskoy effektivnosti passazhir-skikh elektrovozov pri ekspluatatsii na ravninnykh uchastkakh zheleznykh dorog [Ways to improve the energy efficiency of passenger electric locomotives during operation on flat areas of railways]. *Izvestiya Transsiba* [Izvestiya Transsib]. Omsk: Omskiy gos. un-t putey soobshcheniya Publ., 2017, Iss. 3(31), pp. 43–54. (In Russian)

12. Get'man G. K., Vasil'ev V. E. Eshche raz ob opredelenii ekonomii elektroenergii na tyagu za schet chastichnogo otklyucheniya tyagovykh dvigateley elektropodvizhnogo sostava [Once again about determining the savings in electricity for traction due to the partial shutdown of traction motors of electric rolling stock]. *Nauka ta progres transportu. Visn. Dnipropetr. nats. un-tu zalozn. transp. im.*

akad. V. Lazaryana [Science and progress in transport. Bulletin of Dnipropetr. nat. un-tu zalizn. transp. im. acad. V. Lazaryan]. Dnepropetrovsk, 2013, vol. 5(47), pp. 47–55. (In Russian)

13. Sablin O. I., Artemchuk V. V. Snizhenie izbytochnoy moshchnosti tyagovogo sredstva v protsesse dvizheniya [Reducing the excess power of the traction means in the process of movement]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern European Journal of Advanced Technologies]. 2012, Iss. 6/8(60), pp. 34–37. (In Russian)

14. Sorokin S. V. Raschet poter' v tyagovykh dvigatelyakh postoyannogo toka v shirokom diapazone regulirovaniya [Calculation of losses in DC traction motors in a wide control range]. *Elektromekhanika* [Electromechanics]. 1990, Iss. 7, pp. 46–49. (In Russian)

15. Shagovik A. E. Dvukhurovnevaya sistema upravleniya asinkhronnym tyagovym privodom lokomotiva [Two-level control system for an asynchronous traction drive of a locomotive]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University]. 2005, Iss. 1, pp. 60–65. (In Russian)

16. Znakom'tes': elektrovoz 2ES5S [Meet: electric locomotive 2ES5S]. *Lokomotiv* [Locomotive]. 2018, Iss. 8, pp. 35–37. (In Russian)

17. Elektrovozy 2ES5S i 3ES5S: asinkhronnaya tyaga pod flagom Rossii [Electric locomotives 2ES5S and 3ES5S: asynchronous traction under the flag of Russia]. *Tekhnika zheleznykh dorog* [Railway Engineering]. 2020, Iss. 1(49), pp. 10–13. (In Russian)

18. Popov D. I. *Nauchnye osnovy sozdaniya energoeffektivnykh metodov i sredstv ispytaniy elektricheskikh mashin* [Scientific foundations for creating energy-efficient methods and means of testing electrical machines]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2019, 175 p. (In Russian)

19. Zarif'yan A. A., Shrayber M. A. Sokrashchenie raskhoda elektroenergii gruzovymi magistral'nymi elektrovozami 2(3)ES5S pri rabote v energoeffektivnom rezhime po itogam ekspluatatsionnykh ispytaniy [Reduction of electricity consumption by freight main electric locomotives 2 (3) ES5S when operating in an energy efficient mode based on the results of operational tests]. *Byulleten' rezul'ta-tov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2022, Iss. 4, pp. 7–23. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-7-23. (In Russian)

20. Available at: <https://tmholding.ru/products/gruzovye/elektrovozy-peremennogo-toka-seriya-2es5s-3es5s/>. (In Russian)

Received: February 01, 2023

Accepted: February 28, 2023

Author's information:

Alexander A. ZARIFYAN — PhD in Engineering, Expert; zarifyan.alexander@gmail.com

Pavel G. KOLPAHCHYAN — Dr. Sci. in Engineering, Electric Machines and Apparatus Department Head; kolpahchyan@mail.ru

Влияние верхнего граничного условия на гидротермическое поле земляного полотна железных дорог в районах вечной мерзлоты

Синь Вэньшао, А. Ф. Колос, А. В. Петряев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: *Вэньшао Синь, Колос А. Ф., Петряев А. В.* Влияние верхнего граничного температурного условия на гидротермическое поле земляного полотна железных дорог в районах вечной мерзлоты // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 93–104. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-93-104

Аннотация

Цель: На основе модели, учитывающей гидротермическую связь влажности и температуры грунта, провести численное моделирование гидротермического поля земляного полотна (ЗП) железной дороги в районе распространения вечной мерзлоты. Изучить степень влияния глобального потепления и годовой амплитуды температуры на гидротермическое поле земляного полотна. **Метод:** Выполнен численный расчет земляного полотна железных дорог в программе COMSOL Multiphysics с помощью программного модуля системы дифференциальных уравнений в частных производных (PDE) методом конечных элементов. Уточнены различные значения параметров температурной функции верхней границы земляного полотна, и изучено влияние этих параметров на гидротермическое поле земляного полотна. **Результаты:** На основе температурной функции измеренных данных выявлено влияние эффекта глобального потепления и годовой амплитуды температуры на гидротермическое поле земляного полотна. Получен закон изменения распределения температуры, льдистости и незамерзшей воды в земляном полотне железных дорог в районах вечной мерзлоты после стабилизации гидротермического поля. Выявлены периоды наступления максимумов и минимумов температуры, льдистости и незамерзшей воды. **Практическая значимость:** Применение данной численной модели позволяет эффективно прогнозировать тенденцию изменения гидротермического поля земляного полотна в районах вечной мерзлоты под влиянием глобального потепления.

Ключевые слова: Железная дорога, гидротермическое поле, вечная мерзлота, численное моделирование, глобальное потепление.

Введение

С развитием экономики деятельность человека в районах вечной мерзлоты становится все более активной. В районе распространения вечной мерзлоты Цинхай-Тибетского нагорья за последние 30 лет было построено множество крупных объектов, таких как автомобильные и железные дороги, линии электропередач и нефтепроводы. Деформативность этих крупных инженерных сооружений в значительной степени зависит от термической устойчивости вечной мерзлоты под ними. На изменение термоустойчивости вечной мерзлоты влияют два основных фактора. Во-первых, тепловое возмущение, создаваемое инженерными сооружениями на

поверхности. Во-вторых, влияние глобального изменения климата на температуру воздуха и солнечную радиацию в районе распространения вечномерзлых грунтов [1–4]. Поэтому влияние изменения климата на гидротермическое поле вечной мерзлоты нельзя игнорировать, если исследуемый слой вечной мерзлоты находится на относительно небольшой глубине, особенно для слоев вечной мерзлоты с высокой температурой грунта и малой их мощностью. Изменение температурного поля грунта непосредственно отражает процесс исчезновения вечной мерзлоты. При проведении численного моделирования [5, 6] начальное температурное поле и верхние граничные температурные условия (ВГТУ — т. е. граничные условия поверхностного теплообмена) слоя вечной мерзлоты напрямую определяют окончательные результаты расчетов.

Решение дифференциальных уравнений методом гидротермической связи для вечной мерзлоты

Задача гидротермической связи в двумерной модели требует решения системы дифференциальных уравнений в частных производных.

Уравнение теплопередачи, предложенное в [7], имеет вид:

$$\rho C(\theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(\theta) \nabla^2 T + L \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t}, \quad (1)$$

где ρ , ρ_i — плотность грунта и льда соответственно, кг/м³;

T — температура грунтов, °С;

t — время, с;

$C(\theta)$ — объемная теплоемкость, Дж/(кг · °С);

$\lambda(\theta)$ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С);

θ — объемная влажность, %;

θ_i — объемная льдистость, %;

L — скрытая теплота, выделяющаяся при фазовом переходе воды ($335 \cdot 10^3$ Дж/кг);

∇ — дифференциальный оператор, $[\partial/\partial x, \partial/\partial y]$ в двумерном случае;

x , y — значения координат в горизонтальном и глубинном направлениях, м.

Объемная влажность θ грунтов определяется по формуле:

$$\theta = \theta_u + \frac{\rho_i}{\rho_w} \theta_i, \quad (2)$$

где θ_u — содержание незамерзшей воды в мерзлом грунте, %;

ρ_w — плотность воды (кг/м³).

Уравнение миграции влаги, согласно [8, 9], имеет вид:

$$\frac{\partial \theta_u}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left[D(\theta_u) \frac{\partial \theta_u}{\partial y} + k_g(\theta_u) \right], \quad (3)$$

где $D(\theta_u)$ — коэффициент гидравлической диффузии мерзлоты ($\text{м}^2/\text{с}$);
 $k_g(\theta_u)$ — коэффициент проницаемости ненасыщенного грунта в направлении гравитационного ускорения ($\text{м}/\text{с}$).

Коэффициент диффузии влаги мерзлоты определяется по формуле:

$$D(\theta_u) = \frac{k(\theta_u)}{c(\theta_u)} \cdot I, \quad (4)$$

где $k(\theta_u)$ — проницаемость ненасыщенного грунта, которая представляет скорость потока при единичном гидравлическом градиенте, $\text{м}/\text{с}$;

$c(\theta_u)$ — удельная водоемкость, м^{-1} ;

I — коэффициент сопротивления, безразмерный, $I = 10^{-10\theta_i}$.

Для учета динамического равновесия фазового перехода мерзлого грунта необходимо ввести новое уравнение, чтобы установить связь между θ_i , θ_u , T .

Вода в вечной мерзлоте существует в двух формах: пористый лед и незамерзшая вода. Поэтому в литературе предложено понятие твердожидкостного соотношения B_i [10]. Отношение объемной влажности льда к объемной влажности незамерзшей воды B_i является однозначной функцией температуры и определяется выражением:

$$B_i(T) = \frac{\theta_i}{\theta_u} = \begin{cases} \frac{\rho_w}{\rho_i} \left(\frac{T}{T_{bf}} \right)^b - 1,1 & T < T_{bf}, \\ 0 & T \geq T_{bf} \end{cases}, \quad (5)$$

где b — коэффициент, связанный с типом грунтов.

Данная численная модель реализована с помощью конечно-элементной программы COMSOL Multiphysics. Модель апробирована, и результаты хорошо согласуются с фактическими данными измерений [10, 11].

Расчетная схема и исходные данные

Расчетная схема выбрана для участка с высокой температурой и льдистостью в районе Бэйлухе Цинхай-Тибетской железной дороги. Участок расположен в зоне вечной мерзлоты [12] со среднегодовой температурой грунта в пределах $-1,8 \sim 0,5$ °С

и мощностью деятельного слоя 1,6 ~ 3,4 м [13]. Высота сечения данного участка земляного полотна — 3,5 м, ширина верхней поверхности — 11,5 м, уклон — 1:1,5, глубина основания — 30 м, длина — 80 м. По данным исследования, в расчетном диапазоне часть земляного полотна ниже плоскости А1-Ж1 представлена гравием (0 ~ -2 м), пылеватой глиной (-2 ~ -8 м) и выветрившимся аргиллитом (-8 ~ -30 м). Модель расчета представлена на рис. 1.

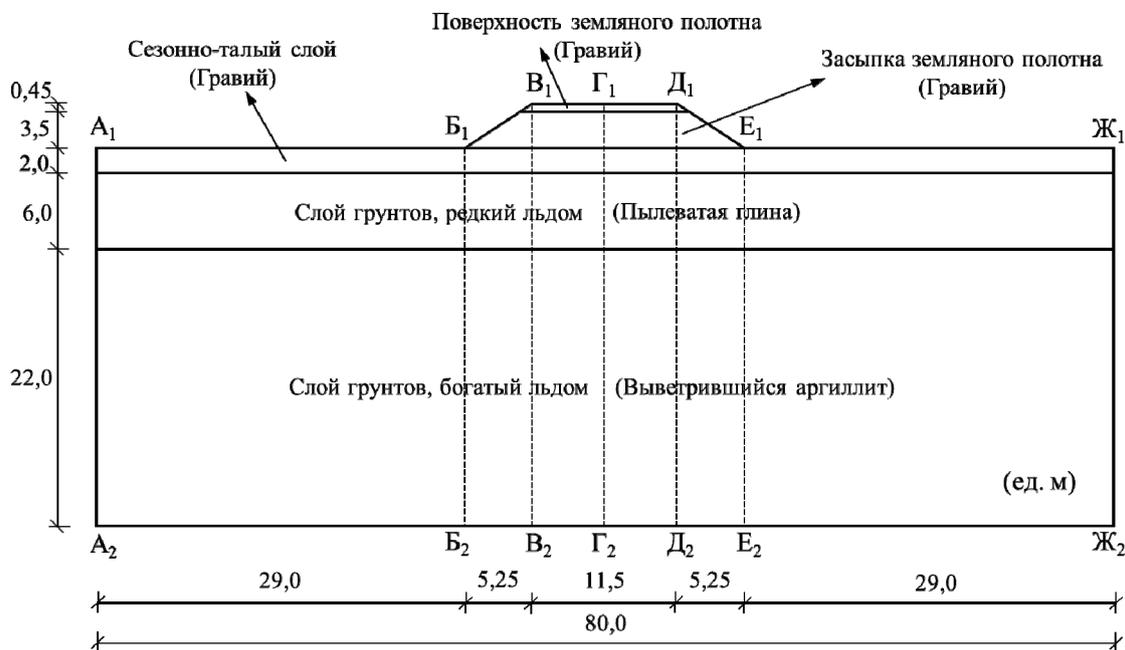


Рис. 1. Расчетная модель

Основные физические параметры материалов, необходимые для расчета температурного и влажностного полей земляного полотна, приведены в табл. 1 [14, 15].

ТАБЛИЦА 1. Основные физические параметры материалов ЗП

Материалы ЗП	ρ	$w, \%$	λ		C		L	k	
			λ_f	λ_u	C_f	C_u		k_u	k_f
Гравий (поверхность ЗП)	1950	6	1,4	1,15	706	861	10 461	$1,0 \cdot 10^{-19}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$
Гравий (засыпка ЗП)	1900	6	1,4	1,15	706	861	10 736	$1,0 \cdot 10^{-19}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$
Гравий (СТС)	1800	15	2,414	1,837	851	1099	37 687	$1,3 \cdot 10^{-19}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$
Пылеватая глина	1600	30	2,12	1,42	1222	1608	52 527	$5,0 \cdot 10^{-21}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$
Выветрившийся аргиллит	1800	15	1,82	1,6	981	1272	20 944	$1,6 \cdot 10^{-21}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$

Примечание: нижние индексы f и u обозначают замороженное и оттаявшее состояния соответственно.

Граничные условия

Граничное температурное условие:

Теплообмен на поверхности верхнего граничного условия включает конвекцию, излучение и т. д. Совместное воздействие всех условий теплообмена приведет к изменению температуры верхней границы. Поэтому верхнее граничное условие принимается за первый тип граничного условия, представляющего собой известную функцию установленной температуры верхней границы. Уравнение:

$$T = T_0 + G(t) + A \sin(\omega t + \varphi), \quad (6)$$

где T_0 — средняя температура поверхности грунта, °С;

$G(t)$ — функция изменения температуры поверхности грунта во времени;

A — половина годовой амплитуды температуры на поверхности грунта, °С, согласно измеренным данным в районе проекта, $A = 12$ °С;

ω — угловая частота, определяемая периодом изменения температуры, обычно принимаемым за период в один год;

φ — начальная фаза, определяющая начальный момент. Некоторые особые фазы показаны в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Особые фазы температурной функции

Дата	Знак A	Значение φ
01.01	–	$\pi/2$
01.04	–	π
01.07	+	$\pi/2$
01.10	+	π

При рассмотрении изменения будущего климата функцию $G(t)$ необходимо давать на основе прогнозирования температуры.

Как правило, функция $G(t)$ рассматривается как линейное выражение при определенной скорости потепления: $G(t) = C \cdot t$, причем C является константой. Согласно соответствующему отчету МГЭИК [16] и результатам исследований Цинь Дахэ [17], рассматривающих влияние глобального потепления, в регионе Цинхай-Тибетского нагорья в ближайшие 50 лет ожидается потепление на 2,6 °С. Тогда максимальное значение C составляет 0,052 °С/год.

Согласно соответствующим данным измерений температуры [18], в табл. 3 приведены три расчетных верхних граничных условия. Можно исследовать влияние эффектов глобального потепления и годовых амплитуд температуры на гидротермическое поле земляного полотна.

ТАБЛИЦА 3. Различные верхние граничные температурные условия

Тип ВГТУ	Положение	T_0	C	A
T_1	Центр ЗП (B_1D_1)	2,7	0	12,00
	Откос (B_1B_1, E_1D_1)	1,6		9,70
	Природная поверхность ($A_1B_1, E_1Ж_1$)	-1,5		8,00
T_2	B_1D_1	2,7	0,052	12,00
	B_1B_1, E_1D_1	1,6		9,70
	$A_1B_1, E_1Ж_1$	-1,5		8,00
T_3	B_1D_1	2,7	0,052	14,40
	B_1B_1, E_1D_1	1,6		11,64
	$A_1B_1, E_1Ж_1$	-1,5		9,60

За нижнее граничное условие принимается второй тип граничного условия, т. е. плотность теплового потока на границе. В этой модели геотермический градиент принимается равным $0,03 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{м}^{-1}$, преобразован в тепловой поток в качестве нижнего граничного условия.

Результаты расчета температурного поля

По полученным результатам установлено, что температурное поле земляного полотна имеет тенденцию быть стабильным на пятом периоде расчета, а результаты расчета на участке более 3 м ниже естественного грунта практически не меняются. На рис. 2 представлены облачная фракция изменения температуры и зависимость температуры и глубины в диапазоне 6,5 м ниже центра земляного полотна за весь пятый год.

Из рисунка видно, что из-за глобального потепления температурное поле земляного полотна находится в полностью оттаявшем состоянии с июля по октябрь, а в остальное время года частично в замороженном состоянии. Температура ЗП самая низкая в январе и самая высокая в июле.

Таким образом, получено влияние различных верхних граничных условий на температурное поле земляного полотна. Сравнивая температурное поле под действием верхних граничных температурных условий T_1 и T_2 , можно видеть, что климатические условия с учетом глобального потепления приводят к небольшому, но неочевидному повышению температуры земляного полотна. Сравнивая ВГТУ T_2 и T_3 , видно, что при неизменности среднегодовой температуры увеличение амплитуды годовой температуры существенно повлияет на изменение температурного поля ЗП.

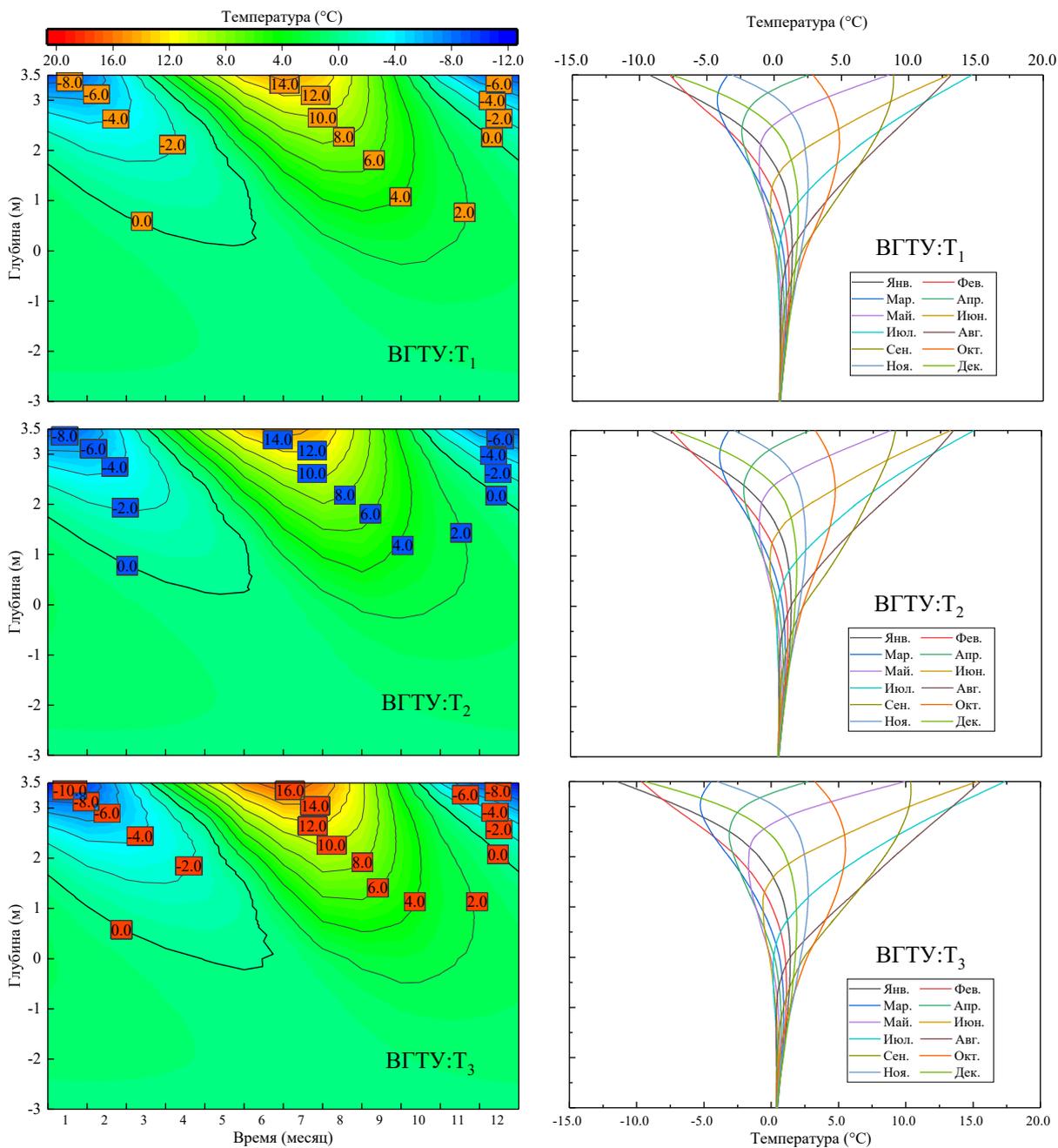


Рис. 2. Результаты расчета температурного поля

ТАБЛИЦА 4. Экстремум температуры

ВГТУ	Экстремум	Месяц	Температура (°C)
T_1	Мин.	Январь	-9,26
	Макс.	Июль	14,70
T_2	Мин.	Январь	-9,04
	Макс.	Июль	14,96
T_3	Мин.	Январь	-11,46
	Макс.	Июль	17,36

Результаты расчета поля влажности

Расчетные результаты поля влажности состоят из двух компонентов: льдистости и незамерзшей воды. На рис. 3 представлены результаты расчета поля влажности, слева — результат льдистости, а справа — содержания незамерзшей воды.

По результатам расчета льдистости и незамерзшей воды можно определить время и место появления их максимальных значений, как показано в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. Максимальные значения льдистости и содержания незамерзшей воды

Тип показателя	ВГТУ	Время/месяц	Положение (высота)/м	Максимум/%
Льдистость	T_1	2	3,03	13,84
	T_2	2	2,80	10,71
	T_3	2	3,03	18,70
Содержание незамерзшей водой	T_1	5	2,80	16,75
	T_2	5	2,55	16,41
	T_3	5	3,03	22,57

Из результатов расчета поля влажности и сравнения данных в табл. 5 получены следующие закономерности. Максимальная льдистость приходится на февраль, по сравнению с самой низкой температурой января образование льда в земляном полотне имеет определенный гистерезисный эффект. Максимальное содержание незамерзшей воды приходится на май. Эффект глобального потепления значительно снижает льдистость грунта земляного полотна зимой, но оказывает незначительное влияние на содержание незамерзшей воды. Увеличение годовой амплитуды температур значительно увеличивает глубину промерзания грунта земляного полотна зимой, а также увеличивает влажность грунта земляного полотна летом. Причина в том, что промерзание земляного полотна в зимний период вызовет восходящую миграцию влаги в его части, расположенной ниже естественной поверхности земли.

Заключение

Глобальное потепление является неоспоримым фактом. Из результатов расчетов видно, что эффект глобального потепления ослабит промерзающее действие грунта земляного полотна зимой и приведет к преждевременному оттаиванию. Увеличение годовой амплитуды температуры воздуха влияет на значения температуры грунтов земляного полотна, их льдистости и содержания незамерзшей воды. При увеличении годовой амплитуды температуры воздуха должны быть выбраны соответствующие инженерные мероприятия для защиты вечной мерзлоты или замедления ее оттаивания.

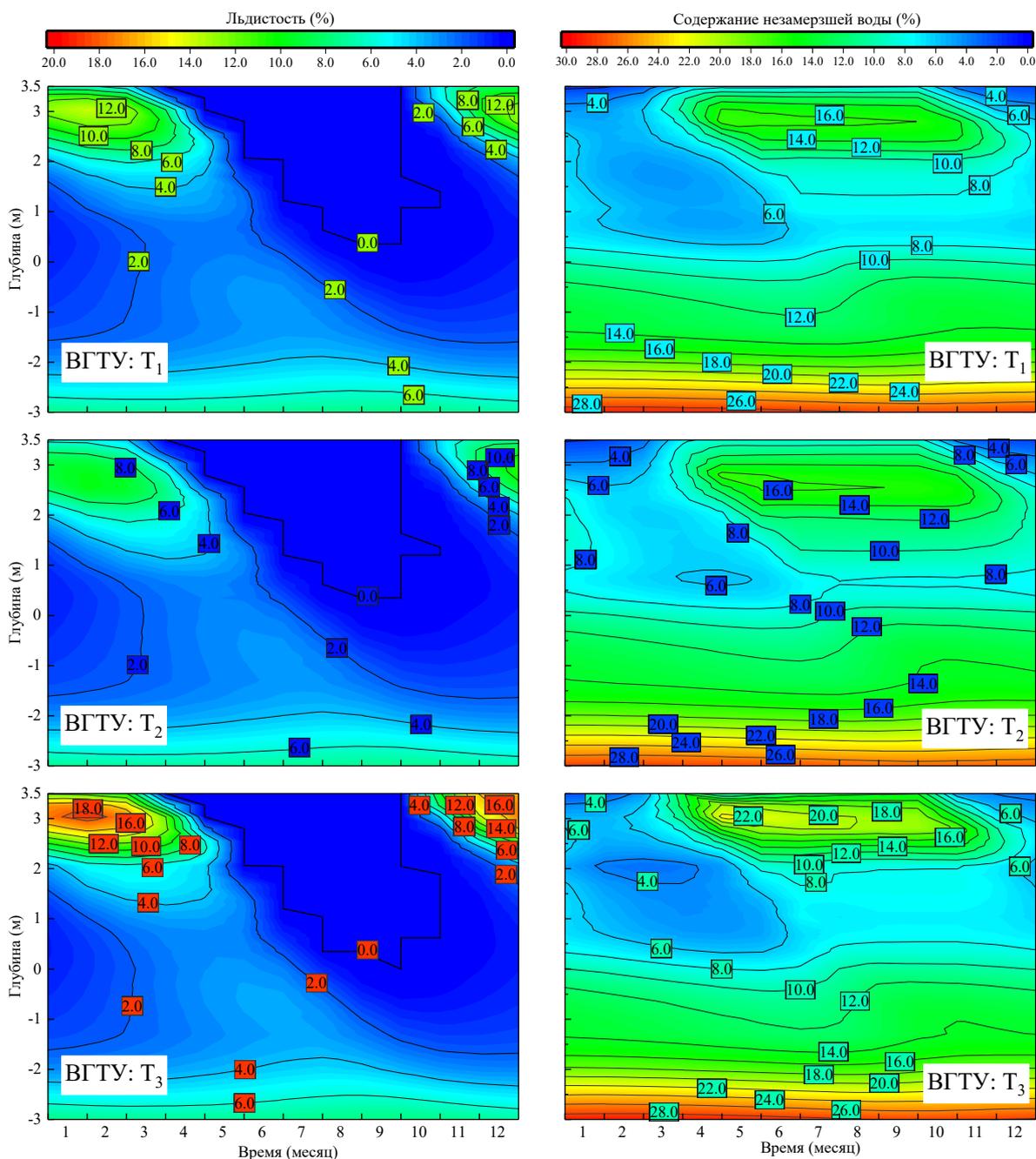


Рис. 3. Результаты расчета поля влажности

Библиографический список

1. Yang J. Vulnerability of frozen ground to climate change in China / Y. Yang, S. Yang, M. Li et al. // Journal of Glaciology and Geocryology. — 2013. — Vol. 35(6). — Pp. 1436–1445.
2. Wang C. Area change of the frozen ground in China in the next 50 years / C. Wang, S. Jin, H. Shi // Journal of Glaciology and Geocryology. — 2014. — Vol. 36(1). — Pp. 1–8.
3. Zhang Z. Predicting changes of active layer thickness on the Qinghai-Tibet Plateau as climate warming / Z. Zhang, Q. Wu // Journal of Glaciology and Geocryology. — 2012. — Vol. 34(3). — Pp. 505–511.

4. Luo D. Degradation of permafrost and cold-environments on the interior and eastern Qinghai Plateau / D. Luo, H. Jin, L. Lin et al. // *Journal of Glaciology and Geocryology*. — 2012. — Vol. 34(3). — Pp. 538–546.
5. Li S. The future thermal regime of numerical simulating permafrost on Qinghai-Xizang (Ti-bet) Plateau, China, under climate warming / S. Li, G. Cheng, D. Guo // *Science in China (Series D)*. — 1996. — Vol. 39(4). — Pp. 434–441.
6. Nan Z. Prediction of permafrost distribution on the Qinghai-Tibet Plateau in the next 50 and 100 years / Z. Nan, S. Li, G. Cheng // *Science in China (Series D)*. — 2005. — Vol. 48(6). — Pp. 797–804.
7. Tao W. Heat transfer / W. Tao. — Xi'an, Northwestern Polytechnical University Press, 2006. — 592 p.
8. Lu N. Unsaturated soil mechanics / N. Lu, W. J. Likos. — Beijing: Higher Education Press, 2012. — 403 p.
9. Taylor G. S. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing / G. S. Taylor, J. N. Luthin // *Canadian geotechnical journal*. — 1978. — Vol. 15(4). — Pp. 548–555.
10. Bai Q. Equations and numerical simulation for coupled water and heat transfer in frozen soil / Q. Bai, X. Li, Y. Tian et al. // *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. — 2015. — Vol. 37(z2). — Pp. 131–136.
11. Xin W. Frost Jacking characteristics and Bearing Capacity of Tower Foundation in Seasonally Frozen Soil. Master thesis / W. Xin. — Beijing, 2020. — 99 p.
12. Yin G. Effects of local factors and climate on permafrost conditions and distribution in Beiluhe basin, Qinghai-Tibet Plateau, China / G. Yin, F. Niu, Z. Lin et al. // *Science of the Total Environment*. — 2017. — Vol. 581. — Pp. 472–485.
13. Wu Q. Changes in active-layer thickness and near-surface permafrost between 2002 and 2012 in alpine ecosystems, Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, China / Q. Wu, Y. Hou, H. Yun et al. // *Global and Planetary Change*. — 2015. — Vol. 124. — Pp. 149–155.
14. Zheng B. Investigation for the deformation of embankment underlain by warm and ice-rich permafrost / B. Zheng, J. Zhang, Y. Qin // *Cold Regions Science and Technology*. — 2010. — Vol. 60(2). — Pp. 161–168.
15. Yuan C. Formation mechanism of longitudinal cracks in expressway embankments with inclined thermosyphons in warm and ice-rich permafrost regions / C. Yuan, Q. Yu, Y. You et al. // *Applied Thermal Engineering*. — 2018. — Vol. 133(25). — Pp. 21–32.
16. Cooper R. N. Climate Change / R. N. Cooper // *Foreign Affairs*. — 2002. — Vol. 81. — Iss. 1. — P. 208.
17. Qin D. Climate change science and sustainable development / D. Qin // *Progress in Geography*. — 2014. — Vol. 33(07). — Pp. 874–883.
18. Sun Z. Experimental and Numerical Analyses on Traditional Embankment of Qinghai Tibet Railway / Z. Sun, W. Ma, Z. Wen et al. // *Journal of the China Railway Society*. — 2010. — Vol. 32(03). — Pp. 71–76.

Дата поступления: 23.12.2022

Решение о публикации: 20.02.2023

Контактная информация:

СИНЬ Вэньшао — аспирант; wsxin9607@163.com

КОЛОС Алексей Федорович — канд. техн. наук, доц.; kolos2004@inbox.ru

ПЕТРЯЕВ Андрей Владимирович — канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; pgups60@mail.ru

Influence of Upper Boundary Condition on Railway Subgrade Hydrothermal Field in Permafrost Areas

Xin Wenshao, A. F. Kolos, A. V. Petriaev

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Wenshao Xin, Kolos A. F., Petriaev A. V. Influence of Upper Boundary Condition on Railway Subgrade Hydrothermal Field in Permafrost Areas. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 93–104. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-93-104

Summary

Purpose: Based on numerical model that takes into account the hydrothermal interrelation of soil humidity and temperature, to carry out numerical modeling of hydrothermal field of railway subgrade in the area of permafrost spread. To study the influence degree of global warming and temperature annual amplitude on hydrothermal field of subgrade. To determine the need for reasonable and economical engineering measures to ensure the stability of subgrade. **Method:** Calculation of hydrothermal bonding of railroad subgrade has been performed in COMSOL Multiphysics software with the use of partial differential equation (PDE) module with the methods of finite elements. Different values of the parameters of subgrade upper boundary temperature function are specified and the effect of these parameters on subgrade hydrothermal field is studied. **Results:** Based on measured data temperature function, the influence of global warming effect and temperature annual amplitude on subgrade hydrothermal field was determined. Change law and characteristics of temperature distribution, ice content and unfrozen water in railway subgrade in permafrost areas after hydrothermal field stabilization has been obtained. The periods of maxima and minima onset for temperature as well as for ice content and unfrozen water are given. **Practical significance:** The use of given numerical model allows to predict effectively the tendency of subgrade hydrothermal field change in permafrost areas under global warming influence. Based on the numerical calculation results, relevant technical recommendations are shown for elimination or reduction of engineering accidents caused by temperature changes in permafrost regions.

Keywords: Railway, hydrothermal field, permafrost, numerical modeling, global warming.

References

1. Yang J., Yang S., Li M. et al. Vulnerability of frozen ground to climate change in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2013, vol. 35(6), pp. 1436–1445.
2. Wang C., Jin S., Shi H. Area change of the frozen ground in China in the next 50 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2014, vol. 36(1), pp. 1–8.
3. Zhang Z., Wu Q. Predicting changes of active layer thickness on the Qinghai-Tibet Plateau as climate warming. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2012, vol. 34(3), pp. 505–511.
4. Luo D., Jin H., Lin L. et al. Degradation of permafrost and cold-environments on the interior and eastern Qinghai Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2012, vol. 34(3), pp. 538–546.
5. Li S., Cheng G., Guo D. The future thermal regime of numerical simulating permafrost on Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, China, under climate warming. *Science in China (Series D)*. 1996, vol. 39(4), pp. 434–441.

6. Nan Z., Li S., Cheng G. Prediction of permafrost distribution on the Qinghai-Tibet Plateau in the next 50 and 100 years. *Science in China (Series D)*. 2005, vol. 48(6), pp. 797–804.
7. Tao W. *Heat transfer*. Xi'an, Northwestern Polytechnical University Press, 2006, 592 p.
8. Lu N., Likos W. J. *Unsaturated soil mechanics*. Beijing: Higher Education Press, 2012, 403 p.
9. Taylor G. S., Luthin J.N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing. *Canadian geotechnical journal*. 1978, vol. 15(4), pp. 548–555.
10. Bai Q., Li X., Tian Y. et al. Equations and numerical simulation for coupled water and heat transfer in frozen soil. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2015, vol. 37(z2), pp.131–136.
11. Xin W. Frost Jacking characteristics and Bearing Capacity of Tower Foundation in Seasonally Frozen Soil. Master thesis. Beijing, 2020, 99 p.
12. Yin G., Niu F., Lin Z. et al. Effects of local factors and climate on permafrost conditions and distribution in Beiluhe basin, Qinghai-Tibet Plateau, China. *Science of the Total Environment*. 2017, vol. 581, pp. 472–485.
13. Wu Q., Hou Y., Yun. H. et al. Changes in active-layer thickness and near-surface permafrost between 2002 and 2012 in alpine ecosystems, Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, China. *Global and Planetary Change*. 2015, vol. 124, pp. 149–155.
14. Zheng B., Zhang J., Qin Y. Investigation for the deformation of embankment underlain by warm and ice-rich permafrost. *Cold Regions Science and Technology*. 2010, vol. 60(2), pp. 161–168.
15. Yuan C., Yu Q., You Y. et al. Formation mechanism of longitudinal cracks in expressway embankments with inclined thermosyphons in warm and ice-rich permafrost regions. *Applied Thermal Engineering*. 2018, vol. 133(25), pp. 21–32.
16. Cooper R. N. *Climate Change*. Foreign Affairs. 2002, vol. 81, Iss. 1, p. 208.
17. Qin D. Climate change science and sustainable development. *Progress in Geography*. 2014, vol. 33(07), pp. 874–883.
18. Sun Z., Ma W., Wen Z. et al. Experimental and Numerical Analyses on Traditional Embankment of Qinghai Tibet Railway. *Journal of the China Railway Society*. 2010, vol. 32(03), pp. 71–76.

Received: December 23, 2022

Accepted: February 20, 2023

Author's information:

Wenshao XIN — Postgraduate Student; wsxin9607@163.com

Aleksey F. KOLOS — PhD in Engineering, Associate Professor; kolos2004@inbox.ru

Andrey V. PETRYAEV — PhD in Engineering, Senior Researcher; pgups60@mail.ru

Исследование возникновения и развития трещин при упрочнении деталей подвижного состава индукционно-металлургическим способом

И. К. Самаркина¹, А. А. Соболев¹, Н. А. Битюцкий¹, И. В. Павельев²,
С. А. Стопницкий²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²ООО «РемТрансМаш», Российская Федерация, 199155, Санкт-Петербург, Реки Смоленки набережная, дом 35, корпус 1а, помещение 49-н, офис 2

Для цитирования: Самаркина И. К., Соболев А. А., Битюцкий Н. А., Павельев И. В., Стопницкий С. А. Исследование возникновения и развития трещин при упрочнении деталей подвижного состава индукционно-металлургическим способом // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 105–113. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-105-113

Аннотация

Цель: Проведение исследования по получению данных о появлении и распространении трещин в наплавленном индукционно-металлургическим способом слое, влияние трещин на безопасность эксплуатации детали и ее ресурс. **Методы:** Используя металлографические исследования, проведен анализ образцов автосцепного устройства с наплавленным ИМС слоем. **Результаты:** По результатам исследования подтверждено нераспространение трещин из наплавленного слоя в основной металл детали. **Практическая значимость:** Проведенное исследование оценки наличия и распространения трещин дало возможность доказать безопасную дальнейшую эксплуатацию детали без потери ее работоспособности или ухудшения конструкции или технических характеристик.

Ключевые слова: Индукционно-металлургический способ, детали подвижного состава, упрочнение, наплавленный слой, износостойкое покрытие, автосцепное устройство, ресурс, срок службы.

Введение

В подвижном составе узлы трения от общей массы конструкции составляют порядка 10 %, однако в эксплуатации число отказов по их вине достигает до 80 % [1].

Из-за износа деталей происходят потеря работоспособности узлов подвижного состава и сокращение их ресурса и срока службы.

С целью обеспечения надежности и долговечности узлов вагонов, безопасности движения поездов необходимо найти причины их выхода из строя и найти решения по устранению или недопущению дефектов, особенно в узлах трения — колесные пары [2, 3], гасители колебаний, поглощающие аппараты, корпуса автосцепок и другие [4, 5].

Одним из методов увеличения эксплуатационного ресурса тяжело нагруженных деталей подвижного состава, работающих в режиме сухого трения, является наплавка индукционно-металлургическим способом (ИМС) [6, 7].

ООО Корпорация «Сплав-ЛТД» разработала и внедрила технологию упрочнения индукционно-металлургическим способом (ИМС) деталей локомотивов, пассажирских и грузовых вагонов путем нанесения защитного износостойкого покрытия с заданными служебными характеристиками, превышающими характеристики сталей 20ГФЛ, 20ФТЛ.

При повышении надежности и долговечности работы основных узлов вагона, упрочненных индукционно-металлургическим способом, возможно снижение эксплуатационных расходов в пассажирском, грузовом и локомотивном хозяйствах. В качестве примера рассмотрим упрочнение автосцепных устройств, которое позволит сэкономить на каждой тысяче автосцепок 5 т наплавочных материалов, 200 000 чел.-ч трудовых затрат, 2 тыс. станко-часов, 500 тыс. кВт-ч электроэнергии и 500 кг металлорежущего инструмента.

1. Характеристики наплавочных материалов и особенности наплавки на различные стали

В качестве износостойкой наплавки используют следующие материалы: сплавы на основе никеля и кобальта, карбидосодержащие сплавы на основе железа (белые чугуны), стали мартенситного класса, стали аустенитного класса.

Сплавы на основе никеля и кобальта имеют весьма высокие показатели совокупности механических свойств наплавленного слоя. Однако высокая стоимость этих материалов накладывает серьезные ограничения их применения.

Карбидосодержащие сплавы, имеющие в своей структуре ледебуритную эвтектику, хорошо себя проявляют в условиях абразивного изнашивания. В наплавленных слоях образуется сетка трещин, не представляющая опасности для работоспособности детали. Для противодействия ударным нагрузкам можно рекомендовать наплавку мягкого подслоя, демпфирующего ударные нагрузки.

Стали мартенситного класса имеют высокую износостойкость при трении сопряженных металлических деталей.

Стали аустенитного класса, упрочняемые наклепом, имеют высокую износостойкость в процессе изнашивания под действием ударных нагрузок. Характерным примером является сталь Гадфильда 110Г13.

Все износостойкие наплавочные материалы имеют высокую твердость, превышающую твердость 50 HRC. Поэтому обработка наплавленного слоя целесообразна абразивным инструментом.

При наплавке следует учитывать особенности стали, из которой изготовлена деталь. Склонность основного металла к образованию трещин обусловлена его способностью к закалке в процессе термического цикла наплавки. Эта способность определяется значением эквивалентного содержания углерода, определяемого по формуле:

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cr}{15}.$$

Значение $C_{\text{экв}}$ менее 0,25 определяет хорошую свариваемость, в этом случае нет необходимости в предварительном подогреве.

Значение $C_{\text{экв}}$ — 0,25–0,35 характеризует удовлетворительную свариваемость, в этом случае при необходимости можно рекомендовать предварительный подогрев 100–200 °С.

Значение $C_{\text{экв}}$ — 0,35–0,45 характеризует ограниченную свариваемость, в этом случае при необходимости можно рекомендовать предварительный подогрев 200–300 °С.

Значение $C_{\text{экв}}$ более 0,45 характеризует плохую свариваемость, в этом случае при необходимости можно рекомендовать предварительный подогрев 300–500 °С.

2. Металлографические исследования наплавленного слоя

С 2020 года от владельцев пассажирских вагонов поступили в адрес производителя претензии к наличию трещин наплавленного слоя автосцепок. Необходимо понять, насколько данные трещины опасны в эксплуатации.

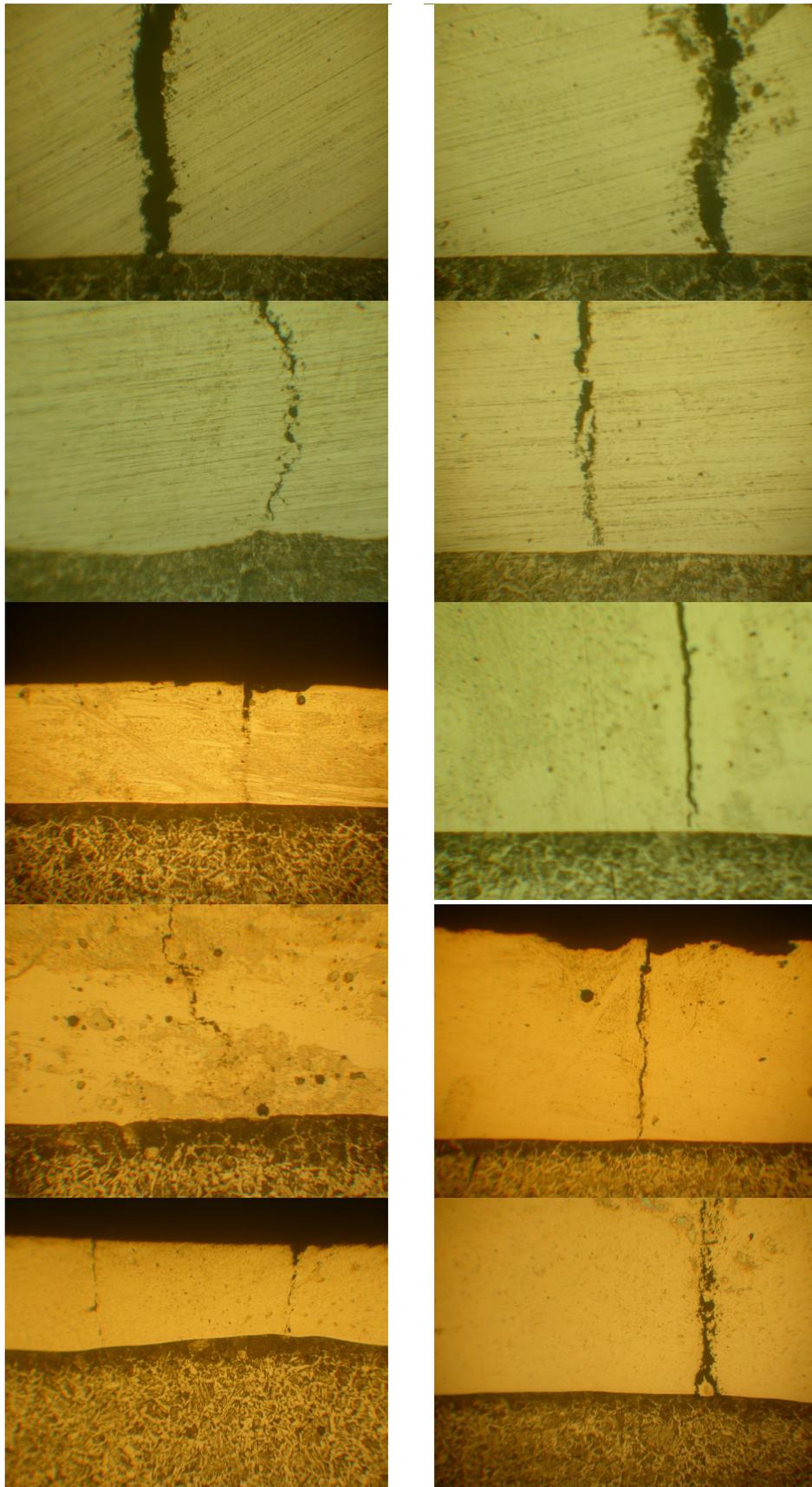
В соответствии с ГОСТ Р 57177—2016 п. 9.2 в наплавленном ИМС слое «для деталей, изготовленных из низкоуглеродистых и низколегированных литых сталей, допускается наличие сетки горячих трещин, не превышающей в сумме 20 % площади наплавленной поверхности» [8].

Причина образования трещин связана с высокой хрупкостью наплавленного соя (белый чугун). В процессе кристаллизации происходит усадка металла, что и приводит к образованию трещин в хрупких металлах.

По результатам проведенных многочисленных металлографических исследований образцов автосцепок было выявлено, что трещины в наплавленном слое не распространяются в тело корпуса автосцепки в связи с различной структурой металла.

Толщина вырезанных образцов малого зуба корпуса автосцепки составляла порядка 4–6 см, далее проводилась вырезка из образцов микрошлифов, толщина которых составляет порядка 1–2 см. Микрошлиф представляет собой четырехгранный призматический объект с заполированной рабочей поверхностью, впоследствии протравленный 4%-м раствором азотной кислоты в этиловом спирте. В состав образца входят основной металл и наплавленный слой. Схема вырезки образцов определяется по направлению трещин в наплавленном слое.

На рисунке представлена микроструктура наплавленного слоя и основного металла 10 образцов, общее количество исследованных образцов — более 50 шт.



Микроструктура наплавленного слоя и основного металла образцов

Трещины в наплавленном слое образцов залегают на различную глубину толщины наплавленного слоя и не распространяются в основной металл корпуса автосцепки, блокируются на границе раздела, что подтверждено фотографиями, приведенными на рисунке, ввиду того что вязкость разрушения основного металла значительно выше вязкости разрушения наплавленного слоя.

Вязкость стали, из которой изготавливаются автосцепки (20 ГЛ), гораздо выше вязкости наплавленного слоя, представляющего собой белый чугуи (хрупкий материал). Это является общепринятым научным фактом, обусловленным используемым материалом, — ударная вязкость марганцовистой стали, из которой изготавливается отливка корпуса СА-3, составляет 15 Дж/см² [9], значительно превышает вязкость наплавленного слоя из углеродосодержащих порошков износостойкого сплава (шихты) ПГС27, УСЧ-31, УСЧ-3 5 [10].

В соответствии с п. 4.1 [11] детали после наплавки должны соответствовать конструкторской документации. Следовательно, после наплавки основной металл корпуса автосцепки должен соответствовать требованиям [9]. Корпус автосцепки относится к деталям первой группы. Детали первой группы подвергаются закалке в воде и высокому отпуску. Твердость деталей первой группы должна быть в пределах от 192 до 262 НВ, что значительно ниже твердости наплавленного ИМС слоя (минимальная твердость 45 HRC, что соответствует 430 НВ) [12, 13]. Временное сопротивление материала корпуса автосцепки должно быть не менее 600 МПа, относительное удлинение не менее — 12 %, относительное сужение — не менее 25 %, ударная вязкость при температуре –600 °С на образце с U-образным надрезом — не менее 25 Дж/см², на образце с V-образным надрезом — не менее 15 Дж/см². Согласно [9] для корпусов автосцепок определяется нагрузка текучести, то есть материал корпуса имеет площадку текучести. Такой материал относится к пластичным или, как их еще называют, вязким материалам [14]. Материал хорошо поглощает механическую энергию и за счет этого блокирует развитие трещин. Возникшей в твердом наплавленном слое трещине энергетически невыгодно развиваться в вязкий основной металл корпуса автосцепки. Поэтому нет угрозы перехода трещины из твердого наплавленного слоя в вязкий металл корпуса автосцепки.

Заключение

Для повышения качества наплавленного слоя и исключения возможности образования трещин следует использовать наплавочные материалы, которые в совокупности с флюсом обеспечат химический состав наплавленного слоя, идентичный стали 110Г13Л. При этом следует добиваться высокой скорости охлаждения наплавленного слоя во избежание выделения карбидной фазы из аустенита. Высокоуглеродистый аустенит этой стали эффективно упрочняется наклепом в процессе эксплуатации, сохраняя при этом высокую вязкость и пластичность.

Библиографический список

1. Воробьев А. А. Разработка рекомендаций по восстановлению деталей подвижного состава железнодорожного транспорта / А. А. Воробьев, И. А. Иванов, А. А. Соболев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2010. — № 1. — С. 146–149.
2. Иванов И. А. К вопросу о влиянии структуры поверхности слоя на эксплуатационные свойства железнодорожного колеса / И. А. Иванов, С. И. Губенко, А. А. Воробьев // Транспорт Урала. — 2010. — № 2(25). — С. 56–60.
3. Воробьев А. А. Разработка рекомендаций по режимам обработки колесных пар повышенной твердости / А. А. Воробьев, И. А. Иванов, В. С. Кушнер и др. // Транспорт Урала. — 2009. — № 2(21). — С. 48–51.
4. Воробьев А. А. Испытания колесных стале́й на износ и контактную усталость / А. А. Воробьев, Д. Е. Керенцев, И. В. Федоров // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2017. — Т. 14. — № 4. — С. 628–636.
5. Воробьев А. А. Исправление литейных дефектов деталей тележки 18-100 грузового вагона на АО «Востокмашзавод» / А. А. Воробьев, А. А. Соболев, А. В. Павлов // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. — 2016. — № 3(35). — С. 73–77.
6. Меркулова П. А. Современные методы повышения работоспособности автосцепок железнодорожных вагонов / П. А. Меркулова, А. А. Воробьев, В. Г. Кондратенко // Повышение работоспособности деталей и узлов подвижного состава железнодорожного и автомобильного транспорта: сборник трудов Национальной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. — 2022. — С. 111–118.
7. Веселков К. В. Анализ методов восстановления деталей автосцепки / К. В. Веселков, А. А. Воробьев // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД: сборник трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — 2017. — С. 86–88.
8. ГОСТ Р 57177—2016. Национальный стандарт российской федерации. Индукционно-металлургический способ наплавки. Технологический процесс.
9. ГОСТ 22703—2012. Детали литые сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия.
10. ГОСТ 21448—75. Порошки из сплавов для наплавки. Технические условия.
11. ТУ 318700-072-17368431—2014. Технические условия (для ремонтных деталей) «Износостойкая наплавка ИМС (индукционно-металлургическим способом) деталей локомотивов, моторвагонного подвижного состава, пассажирских вагонов локомотивной тяги колеи 1520 мм».
12. ГОСТ Р 57898—2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Индукционно-металлургический способ наплавки. Наплавочные материалы.
13. ТУ 318700-071-17368431—2014. Технические условия (для нового вагоностроения) «Износостойкое покрытие ИМС (индукционно-металлургическим способом) деталей локомо-

тивов, моторвагонного подвижного состава, пассажирских вагонов локомотивной тяги колеи 1520 мм».

14. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1979. — 702 с.

Дата поступления: 05.02.2023

Решение о публикации: 27.02.2023

Контактная информация:

САМАРКИНА Ирина Константиновна — канд. техн. наук, доц.; irina_samarkina@inbox.ru

СОБОЛЕВ Александр Альбертович — канд. техн. наук, доц.; a89213194387@yandex.ru

БИТЮЦКИЙ Никита Александрович — канд. техн. наук, доц.; bna@engcenter.ru

ПАВЕЛЬЕВ Игорь Викторович — igor_tpts@mail.ru

СТОПНИЦКИЙ Станислав Альфредович — prig98@yandex.ru

Investigation of Crack Appearance and Development at Strengthening Rolling Stock Parts by Inductive-Metallurgical Method

I. K. Samarkina¹, A. A. Sobolev¹, N. A. Bityutsky¹, I. V. Paveliev², S. A. Stopnitsky²

¹ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

² LLC RemTransMash, 35, building 1, letter a, room 49-n, office 2, Smolenki River Embankment, Saint Petersburg, 199155, Russian Federation

For citation: Samarkina I. K., Sobolev A. A., Bityutsky N. A., Paveliev I. V., Stopnitsky S. A. Investigation of Crack Appearance and Development at Strengthening Rolling Stock Parts by Inductive-Metallurgical Method. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 105–113. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-105-113

Summary

Purpose: To conduct study to obtain data on the appearance and propagation of cracks in the layer that's welded by induction-metallurgical method, cracks' impact on exploitation safety of a part and its service age.

Methods: Using metallographic studies, the analysis of samples of automatic coupler device with layer, welded by inductive-metallurgical way, was carried out. **Results:** According to the study results, it was confirmed that cracks do not propagate from welded layer into main metal of a part. **Practical significance:** The conducted study of crack presence and propagation estimation made it possible to prove further safe exploitation of a part without its performance loss or its structure or technical characteristics deterioration.

Keywords: Induction-metallurgical method, rolling stock parts, strengthening, welded layer, wear-resistant coating, automatic coupler, resource, service age.

References

1. Vorob'ev A. A., Ivanov I. A., Sobolev A. A. Razrabotka rekomendatsiy po vosstanovleniyu detaley podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta [Development of recommendations for the restoration of parts of the rolling stock of railway transport]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'negu Vostoka* [Scientific problems of transport of Siberia and the Far East]. 2010, Iss. 1, pp. 146–149. (In Russian)

2. Ivanov I. A., Gubenko S. I., Vorob'ev A. A. K voprosu o vliyaniy struktury poverkhnosti sloya na ekspluatatsionnye svoystva zheleznodorozhnogo koleasa [On the influence of the layer surface structure on the operational properties of a railway wheel]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2010, Iss. 2(25), pp. 56–60. (In Russian)

3. Vorob'ev A. A., Ivanov I. A., Kushner V. S. et al. Razrabotka rekomendatsiy po rezhimam obrabotki kolesnykh par povyshennoy tverdosti [Development of recommendations on treatment modes for wheel sets of increased hardness]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2009, Iss. 2(21), pp. 48–51. (In Russian)

4. Vorob'ev A. A., Kerentsev D. E., Fedorov I. V. Ispytaniya kolesnykh staley na iznos i kontaktnuyu ustalost' [Testing of wheel steels for wear and contact fatigue]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2017, vol. 14, Iss. 4, pp. 628–636. (In Russian)

5. Vorob'ev A. A., Sobolev A. A., Pavlov A. V. Ispravlenie liteynykh defektov detaley telezhki 18-100 gruzovogo vagona na AO "Vostokmashzavod" [Correction of casting defects in parts of the bogie 18-100 of a freight car at Vostokmashzavod JSC]. *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopoliy: Tekhnika zheleznykh dorog* [Bulletin of the Institute of Problems of Natural Monopolies: Iron Technology roads]. 2016, Iss. 3(35), pp. 73–77. (In Russian)

6. Merkulova P. A., Vorob'ev A. A., Kondratenko V. G. *Sovremennye metody povysheniya rabotosposobnosti avtostsepok zheleznodorozhnykh vagonov. Povyshenie rabotosposobnosti detaley i uzlov podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo i avtomobil'nogo transporta: sbornik trudov Natsional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Modern methods of improving the efficiency of automatic couplers of railway cars. Improving the efficiency of parts and components of the rolling stock of railway and road transport: a collection of works of the National Scientific-technical conference of students, undergraduates, graduate students and young scientists]. 2022, pp. 111–118. (In Russian)

7. Veselkov K. V., Vorob'ev A. A. *Analiz metodov vosstanovleniya detaley avtostsepki. Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD: sbornik trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Analysis of methods for restoring automatic coupler parts. Progressive technologies used in the repair of rolling stock of Russian Railways: a collection of proceedings of the conference of students, graduate students and young scientists]. 2017, pp. 86–88. (In Russian)

8. *GOST R 57177—2016. Natsional'nyy standart rossiyskoy federatsii. Induktsionno-metallurgicheskiy sposob naplavki. Tekhnologicheskii protsess* [GOST R 57177—2016. National

standard of the Russian Federation. Induction-metallurgical method of surfacing. Technological process]. (In Russian)

9. *GOST 22703—2012. Detali litye stsepykh i avtostsepykh ustroystv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [GOST 22703—2012. Cast parts for coupling and automatic couplers of railway rolling stock. General specifications]. (In Russian)

10. *GOST 21448—75. Poroshki iz splavov dlya naplavki. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 21448—75. Powders from alloys for surfacing. Specifications]. (In Russian)

11. *TU 318700-072-17368431—2014. Tekhnicheskie usloviya (dlya remontnykh detaley) “Iznosostoykaya naplavka IMS (induktsionno-metallurgicheskim sposobom) detaley lokomotivov, motorvagonnogo podvizhnogo sostava, passazhirskikh vagonov lokomotivnoy tyagi kolei 1520 mm”* [TU 318700-072-17368431-2014. Specifications (for repair parts) “Wear-resistant surfacing of IMC (induction-metallurgical method) of parts of locomotives, multiple unit rolling stock, passenger cars of locomotive traction with a gauge of 1520 mm”]. (In Russian)

12. *GOST R 57898—2017. Natsional’nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Induktsionno-metallurgicheskiy sposob naplavki. Naplavochnye materialy* [GOST R 57898—2017. National standard of the Russian Federation. Induction-metallurgical method of surfacing. Surfacing materials]. (In Russian)

13. *TU 318700-071-17368431—2014. Tekhnicheskie usloviya (dlya novogo vagonostroeniya) “Iznosostoykoe pokrytie IMS (induktsionno-metallurgicheskim sposobom) detaley lokomotivov, motorvagonnogo podvizhnogo sostava, passazhirskikh vagonov lokomotivnoy tyagi kolei 1520 mm”* [TU 318700-071-17368431-2014. Specifications (for new car building) “Wear-resistant coating of IMC (by induction-metallurgical method) for parts of locomotives, multiple unit rolling stock, passenger cars of locomotive traction with a gauge of 1520 mm”]. (In Russian)

14. Birger I. A., Shorr B. F., Iosilevich G. B. *Raschet na prochnost’ detaley mashin: Spravochnik, 3-e izd., pererab. i dop.* [Calculation of the strength of machine parts: a Handbook, 3rd ed., revised. and additional]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979, 702 p. (In Russian)

Received: February 5, 2023

Accepted: February 27, 2023

Author’s information:

Irina K. SAMARKINA — PhD in Engineering, Associate Professor; irina_samarkina@inbox.ru

Aleksander A. SOBOLEV — PhD in Engineering, Associate Professor; a89213194387@yandex.ru

Nikita A. BITYUTSKY — PhD in Engineering, Associate Professor; bna@engcenter.ru

Igor V. PAVELIEV — igor_tpts@mail.ru

Stanislav A. STOPNITSKY — prig98@yandex.ru

УДК 656.02

Алгоритмизация производственных процессов в сфере продаж услуг грузовых железнодорожных перевозок

Н. А. Журавлева, О. И. Сакович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Журавлева Н. А., Сакович О. И. Алгоритмизация производственных процессов в сфере продаж услуг грузовых железнодорожных перевозок // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 114–124. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-114-124

Аннотация

Цель: Разработка алгоритма технологии взаимодействия основных участников железнодорожной грузовой перевозки, обеспечивающего сокращение времени простоев грузов и безопасность их транспортировки. **Методы:** Использован метод алгоритмизации — разработка блок-схемы процесса, отражающего логику прослеживаемости требований к рабочим функциям на основе проектирования функционально-логической архитектуры процесса оформления документов грузовой перевозки. **Результаты:** Интеллектуализация действий работников транспортных компаний связана со множеством технологий перевозки, в том числе и цифровых. Именно она становится ключевым элементом, обеспечивающим соответствие требований скорости и безопасности перевозок трудовым компетенциям и интенсивности труда работников транспортных организаций. Основными результатами исследования являются: формализация действий работников ОАО «РЖД» и грузоотправителей и их соответствие процессным результатам; построение блок-схемы процесса «Визирование накладных» с фиксацией основных задач процесса с соответствующей их привязкой к трудовым функциям исполнителей. Проведена оценка результативности алгоритмизации процесса «Визирование накладных» в соответствии с целевым функционалом алгоритма. **Практическая значимость:** Подтверждена проведенной оценкой эффекта монетизации экономии времени при оформлении накладных, снижения прямых затрат на действия по информационному обеспечению грузовой перевозки и повышения клиентоориентированности компании.

Ключевые слова: Документирование грузовых перевозок, блок-схема, оптимизация и визуализация обработки информации, интеллектуализация трудовых действий.

Введение

Постковидная экономика, изменившая действующие эффективные схемы цепей поставок, а также беспрецедентные санкции, введенные с целью сдерживания российской экономики, формируют фундаментальные изменения в процессах и технологиях перевозок, прежде всего железнодорожным транспортом. Это новый вызов и новая глава в развитии российских транспортных компаний, открывающая возможность быстрого слияния физического, цифрового и интеллектуального

миров и соединения технологий способами, которые создают как перспективы, так и опасности. Скорость, широта и глубина этих изменений заставляют переосмыслить стратегии бизнеса и способы создания ценностей, зависящих от конкурентоспособности товарных рынков, обеспечиваемых перевозками.

Следует отметить, что эффективность любой транспортной коммуникации зависит не только от внешней логистики цепей поставок, но и в огромной степени от внутренних коммуникационных сетей транспортных компаний. Величина транспортной составляющей в грузах, перевозимых железнодорожным транспортом, определяется прежде всего затратами на инфраструктуру и подвижной состав, но при этом не следует недооценивать расходы компании на управление перевозками, в частности документирование и администрирование грузовых перевозок. Именно последние процессы в условиях дистанционной работы, постоянной текучести и ротации персонала увеличивают временную нагрузку на перевозку, а следовательно, и стоимостную нагрузку на грузоотправителя.

В ОАО «РЖД», где более 90 тыс. сотрудников перешли на дистанционную работу в период пандемии и при сохранении их части в работе гибридных команд (с частичной удаленной работой), особенно остро стоит вопрос подготовки и обучения сотрудников, которые устроились на работу недавно и еще не успели в полной мере вникнуть в технологический процесс, а также адаптации работников к новым требованиям роста скорости и достоверности обрабатываемой информации [1].

Разумеется, в компании все бизнес-процессы обеспечены должностными инструкциями и регламентами выполнения работ, регламентами взаимодействия, а также дополнениями к ним. Но при этом доступность восприятия данной информации не может в полной мере обеспечить новые коммуникационные требования к процессу перевозки. И эта сложность только нарастает, поскольку новое поколение сотрудников, или как их обычно обозначают «поколение миллениалов: Y и Z», мышление которых определяют цифровые технологии, иначе воспринимают информацию. Они защищают себя от «информационной усталости», не воспринимая большие объемы текстовой информации.

Неадаптированный к ним формат подачи информации — это достаточно опасная история, поскольку неверное толкование инструкции, пропуск одной из требуемых итераций трудовых действий, несвоевременная реакция на действия и пр. могут существенно повлиять не только на время и скорость осуществления технологической операции, но и на безопасность перевозки.

Подобная проблема характерна для всего современного бизнеса, особенно в сфере производства и перевозок. Ей посвящено множество исследований и разработок. В частности, авторы глобальной исследовательской программы Ventana Research отмечают: «Данные — это товар в бизнесе. Чтобы стать полезной информацией, данные должны быть помещены в определенный бизнес-контекст. Без информации современные предприятия не могут функционировать. Без

правильной информации, доступной нужным людям в нужное время, организация не может ни принимать правильные решения, ни совершать правильные действия, ни эффективно конкурировать, ни процветать. Информация должна быть создана и предоставлена сотрудникам, клиентам, поставщикам, партнерам и потребителям в той форме, в какой они хотят ее получить в тот момент, когда она им необходима. Такая оптимизация информации необходима для успеха бизнеса» [2].

Оптимизации производственных процессов может быть реализована различными методами, в том числе и методом алгоритмизации, наиболее удобным для решения нашей задачи. Выделяя действия, реализующие процесс, располагая их согласно логике обработке данных и формализуя порядок их исполнения, мы добиваемся оптимальных управленческих решений.

Формируя алгоритм или определенный набор пошаговых действий выполнения операции или всего бизнес-процесса, мы ориентируем исполнителя на решение задачи в нужных нам форматах действий, документарного сопровождения и конкретной цели. Графическое представление алгоритма как способа доведения информации — визуально активного для восприятия — позволяет зрительно «оцифровать» выполняемые действия. Это очень важно в ситуациях, когда точность, скорость принятия решения и безопасность являются ключевыми параметрами всего процесса, в нашем случае — процесса грузовой перевозки.

Целью данного исследования является разработка и экономическое обоснование оптимизации способа подачи и обработки информации о трудовых функциях сотрудников отдела продажи грузовых железнодорожных перевозок с помощью алгоритмизации осуществляемых ими производственных процессов.

Объектом исследования является полигон Октябрьской железной дороги. Предмет исследования — алгоритмизация производственных процессов в отделе продажи услуг грузовых перевозок.

Методы и материалы

Данными исследования являются корпоративные документы ОАО «Российские железные дороги»: «Регламент многоступенчатого контроля по обеспечению безопасности движения поездов при приеме груза и порожних вагонов к перевозке, в пути следования и при выдаче груза», утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 28 ноября 2017 г. № 2451р; «Технология взаимодействия агентов СФТО отдела обработки документов по перевозке грузов АФТО-2 и сотрудников службы Управления движением в части оформления перевозочных и иных документов при перевозке грузов и порожних вагонов» (далее — Технология).

Использованы требования, предъявляемые к разработке алгоритмов, — ГОСТ 19.701—90 (ИСО 5807—85) «Единая система программной документации.

Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения» [3].

Подход к данному исследованию в части основных параметров согласования действий по документированию грузовых перевозок выполнен в той же последовательности, как апробировано Г. Г. Ахмедзяновым и пр. при учете параметров объектов железнодорожной инфраструктуры для повышения эффективности эксплуатации переездных комплексов [4].

В отношении восприятия документов мы опирались на исследование Скрыпникова и пр. по распознаванию текстов с использованием нейронных сетей [5] и понимание структуры ассоциативно-гетерархической памяти [6].

В качестве основного метода исследования принят метод алгоритмизации — блок-схема с использованием графических блоков, позволяющая нам предписать выполнение необходимых операций, и связей между ними. Каждую конкретную операцию (или действие сотрудника) мы представили в отдельном блоке. Поскольку набор информации, определяющей действия, различен, то размер блоков и их конфигурация различны. Последовательность действий всей блок-схемы выполнена в строгом соответствии с соответствующим Регламентом и должностными инструкциями.

Используемый метод реализует принцип дискретности, т. е. каждый процесс осуществления действий описан в виде последовательности выполнения простых действий (шагов, этапов) в норме установленного времени. Каждое действие однозначно, т. е. детерминировано, исключает произвольное толкование и не оставляет места для двусмысленности, носит, по сути, механический характер. В данном случае мы опирались на логику прослеживаемости требований к рабочим функциям как основы проектирования функционально-логической архитектуры процесса оформления документов грузовой перевозки [7].

Метод направлен на результативность, т. е. алгоритм приводит к решению задачи: снижению времени обработки документов, повышению достоверности принимаемых решений. Алгоритм конечен, т. е. каждое отдельное действие, как и весь алгоритм должны быть исполнены.

Применяемый метод может быть использован для других процессов документального сопровождения процесса перевозки, т. е. имеет массовый характер.

Результаты

Внедрение цифровых технологий в деятельность ОАО «РЖД» является приоритетной стратегической задачей развития компании. Именно цифровые технологии — технология распределенного реестра, блокчейн, нейронные сети — могут обеспечить ключевые долгосрочные приоритеты развития компании, прежде всего роста клиентоориентированности услуг по перевозке грузов.

При анализе технологии взаимодействия агентов СФТО — отдела обработки документов по перевозке грузов и сотрудников службы управления движением в части оформления перевозочных и иных документов при перевозке грузов и порожних вагонов было выявлено, что процесс описан сложным техническим языком, сочетание процессов в одной технологической операции запараллелен, порядок действий дублируется. При наложении ряда других процессов (обеспечивающих непрерывность движения) скорость обработки информации снижается, время подготовки груза к отправке увеличивается.

В результате алгоритмизации технологии были выполнены следующие действия.

1. Разработан процесс «Визирование накладных». Определены следующие участники процесса и процессные результаты (рис. 1).

Грузоотправитель	Приемосдатчик	Агент СФТО
Сокращение времени финансового цикла (время обращения оборотного капитала)	Нормативное время обработки документов	Рост количества клиентов

Рис. 1. Участники процесса «Визирование накладных»

2. Выделены действия работников и клиентов, обеспечивающих процесс «Визирование накладных» (таблица).

Действия по процессу «Визирование накладных»

Действия	Исполнитель
1. При наличии между ОАО «РЖД» и грузоотправителем Соглашения об оказании услуг, связанных с организацией электронного документооборота, перевозочный документ в электронном виде в автоматическом режиме передается в АС ЭТРАН. Действие осуществляется после подписания ЭП грузоотправителя	Грузоотправитель
2. При предъявлении грузоотправителем перевозочных документов на бумажном носителе агент СФТО вводит указанные в них сведения в АС ЭТРАН, которая в автоматическом режиме проводит проверку на соответствие указанных в перевозочных документах параметров согласованной заявке, а также наличия ограничения или запрета к осуществлению данной перевозки	Агент СФТО
3. Грузоотправитель по окончании погрузки уведомляет уполномоченного работника станции о том, что установленные в договоре на эксплуатацию железнодорожного пути необщего пользования или в договоре на подачу и уборку вагонов действия по завершению погрузки выполнены/не выполнены и вагон готов к уборке или должен быть возвращен на выставочный путь	Грузоотправитель
4. «Уполномоченный работник станции отправления производит прием груза к перевозке на основании вагонных листов. Бумажные сопроводительные документы (при их наличии) прикладываются грузоотправителем к вагонному листу»	Приемосдатчик и грузоотправитель
5. Проверка регламентированного размещения и крепления груза отражается производившим проверку работником станции на оборотной стороне в нижней части вагонного листа. Работник указывает свою должность и фамилию и расписывается после слов «Груз погружен и закреплен правильно»	Приемосдатчик
6. Агент СФТО получает от приемосдатчика (уполномоченного работника станции) подписанный вагонный лист и приложенные сопроводительные документы в бумажном виде для дальнейшего оформления	Приемосдатчик

Действия	Исполнитель
7. В случае выявления коммерческих неисправностей: при натурной приемке вагона или искажения сведений о произведенной погрузке в вагонном листе уполномоченный работник станции оформляет акт на задержку грузовой операции по форме ГУ-23ВЦ	Приемосдатчик
8. После устранения причин предыдущего неприема груза к перевозке грузоотправитель повторно предъявляет вагон для приема груза к перевозке	Грузоотправитель
9. Уполномоченный работник станции производит повторный прием груза к перевозке, фиксируя устранения выявленных несоответствий, отражая эти действия закрытием акта общей формы на задержку окончания грузовой операции. Им же передается копия вагонного листа и сопроводительных документов, приложенных к нему, агенту СФТО для дальнейшего оформления порядком, указанным в пункте № 1 настоящей Технологии	Приемосдатчик
10. Уполномоченный работник станции передает копию накладной и приложенных к нему сопроводительных документов агенту СФТО для дальнейшего оформления порядком, указанным в пункте № 1 настоящей Технологии	Приемосдатчик
11. При оформлении накладной агент СФТО проводит проверку сведений, указанных грузоотправителем, в соответствии с требованиями 4 ступени контроля «Регламента многоступенчатого контроля по обеспечению безопасности движения поездов при приеме груза и порожних вагонов к перевозке, в пути следования и при выдаче груза», утвержденного Распоряжением ОАО «РЖД» от 28 ноября 2017 г. № 2451р	Агент СФТО

Структурирование информации подтверждает отсутствие логического порядка выполнения действий. К ряду действий, выполняемых на шаге 1, 2, и 3, возвращаются в середине или в конце процесса. Также участники действий определены нечетко и, как правило, указаны как «уполномоченный работник станции». Вновь принятым сотрудникам сложно сориентироваться и понять, к какому конкретно «уполномоченному работнику станции» обращаться.

3. Построена блок-схема процесса «Визирование накладных».

Логика формирования блок-схемы: фиксация и формализация основных задач, требуемых для выполнения процесса с соответствующей их привязкой к трудовым функциям исполнителей.

Разработанная блок-схема процесса визуально и технологически упрощает технологию. Каждое отдельное действие логически расположено и распределено по степени ответственности каждого сотрудника. Отображение линейной последовательности действий, составляющих процесс, помогает выявить узкие места или ненужные шаги в процессе. Наличие визуального представления упрощает объяснение как текущего состояния, так и новых изменений. Блок-схема позволяет в дальнейшем быстро оптимизировать процесс, принимать решения по улучшению или изменению его.

4. Оценена результативность алгоритмизации процесса «Визирование накладных» в соответствии с целевым функционалом алгоритмизации (рис. 2).

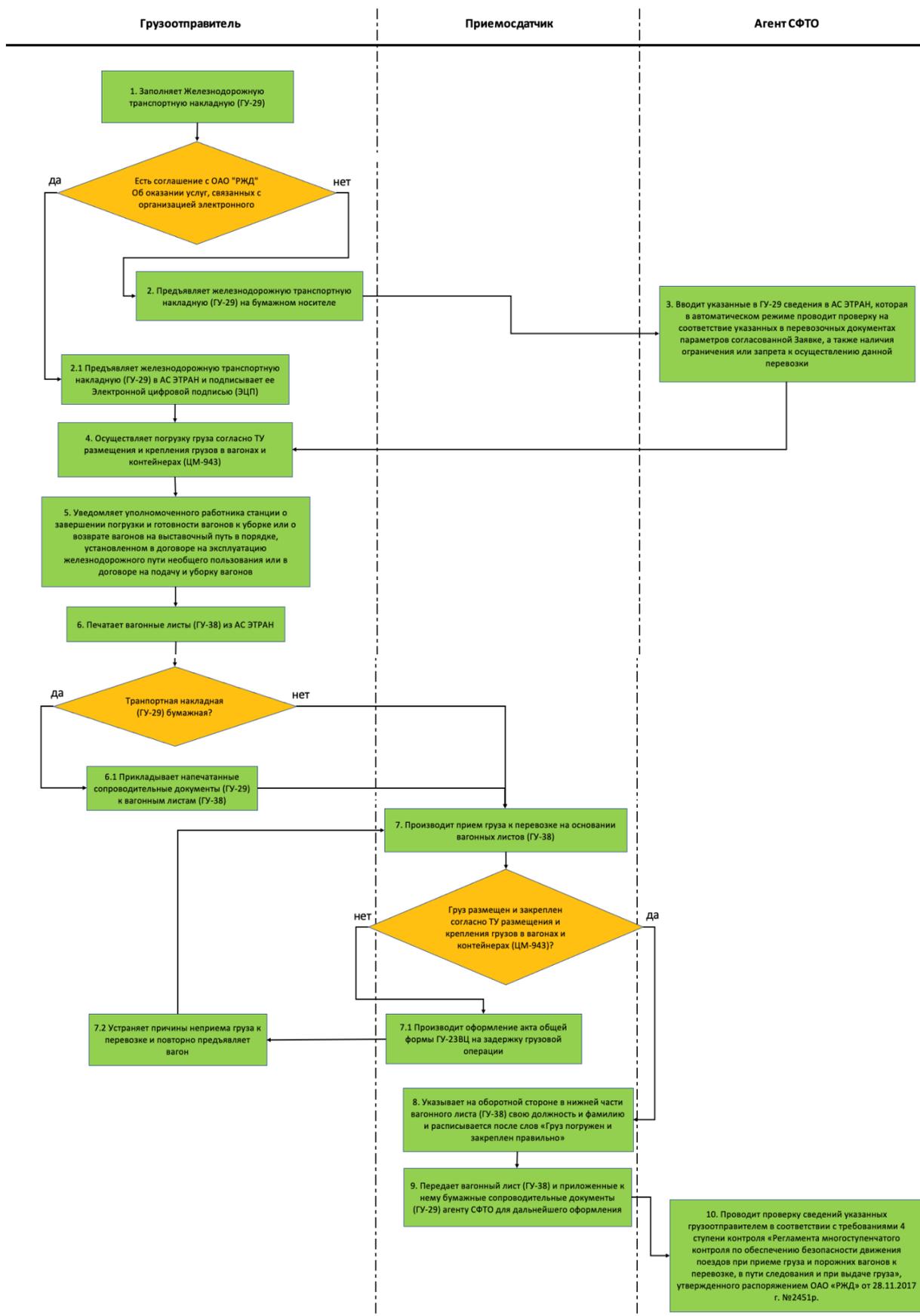


Рис. 2. Блок-схема процесса «Визирование накладных»

Грузоотправитель сокращает время на исправление коммерческих неисправностей, что оптимизирует срок доставки груза (сокращение операционного цикла грузовладельца). Для определения величины монетизированного эффекта экономии времени при оформлении накладных применяется следующая формула:

$$MЭ'_{ВРгр} = ЭВ'_{груз} \cdot ЗК'_{груз} \cdot Ст_{ок} \cdot ССт'_г \cdot \prod_{i=n+1}^t (1 + И'_{ипц}), \quad (1)$$

где $ЭВ'_{груз}$ — высвобождение времени нахождения груза в пути, часов;

$ЗК'_{груз}$ — прогнозная интенсивность роста временных затрат, связанных с выполнением работ по устранению нарушений (время работы крана, оплата труда грузчиков, стропальщиков, машинистов крана/отправка);

$Ст_{ок}$ — средняя стоимость привлечения 1 рубля оборотного капитала в час;

$ССт'_г$ — средняя стоимость перевозимого груза в ценах базового года;

$\prod_{i=n+1}^t$ — функция произведения величин $(1 + И'_{ипц})$;

$И'_{ипц}$ — прогнозный индекс потребительских цен в году t , в процентах.

Снижение прямых затрат, содержащихся в п. 9 таблицы: время работы крана, оплата труда грузчиков, стропальщиков, машинистов крана, иных, понесенных ОАО «РЖД» расходов, предъявляемых грузоотправителю (например, затраты на вновь устанавливаемые средства крепления; затраты на маневровую работу).

Приемосдатчик выполняет все требуемые операции по четкому алгоритму, избегая ошибок, повторений, тем самым обеспечивает безопасность, заложенную в технологии процесса. При первичном трудоустройстве существенно сокращается время на обучение. Распределение ролей позволяет четко оценить нагрузку каждого сотрудника, повысить производительность его труда, что может быть связано с системой его материальной и моральной мотивации.

Агент СФТО может гарантировать отправку в срок, что существенно повысит мотивацию клиента отправки груза именно железнодорожным транспортом. Действия агента обеспечивают требования политики клиентоориентированности холдинга «РЖД» в области грузовых перевозок — «снижение потерь от ненадлежащего качества оказываемых услуг за счет унификации требований к качеству и потребительским характеристикам, а также разработки и применения инструментов контроля качества и уровня удовлетворенности и лояльности клиентов» [8]. Монетизация политики клиентоориентированности реализуется в создании дополнительной прибыли компании за счет глубокого понимания и удовлетворения потребностей клиентов в качестве, доступности и сроках предоставления услуг во всех видах деятельности.

Заключение

Представленный процесс алгоритмизации технологий и действий сотрудников ОАО «РЖД» может показаться достаточно простым, тем не менее это и было целью формализации процесса в соответствии с утвержденной технологией обработки документов по перевозке грузов. За этим следует возможность цифровой интеллектуализации процесса, а именно обработка естественного языка технологии искусственным интеллектом. Дальнейшие разработки связаны с проектированием и разработкой программного фреймворка, предметно-ориентированного для реализации всей технологии перевозки грузов железнодорожным транспортом на основе информационно-технологических решений в виртуальной среде [9].

Библиографический список

1. Mwema N. W. The influence of performance appraisal on employee productivity in organizations: a case study of selected who offices in East Africa / N. W. Mwema, H. G. Gachunga. — 2014. — URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/THE-INFLUENCE-OF-PERFORMANCE-APPRAISAL-ON-EMPLOYEE-Mwema-Gachunga/24e7b0fab040bebf7c3505ed8a4debbe956abb50#citing-papers>.
2. Smith M. Information Optimization is a Key Benefit of Big Data Investments / M. Smith. — 2013. — URL: <https://marksmith.ventanaresearch.com/marksmith-blog/2013/03/08/information-optimization-is-a-key-benefit-of-big-data-investments>.
3. ГОСТ 19.701—90 (ИСО 5807—85). Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения.
4. Ахмедзянов Г. Г. Совершенствование учета параметров объектов железнодорожной инфраструктуры для повышения эффективности эксплуатации железнодорожного переездного комплекса / Г. Г. Ахмедзянов, В. В. Дремин, А. В. Литвинов // Современные наукоемкие технологии. — 2022. — № 1. — С. 9–13. — DOI: 10.17513/snt.39002.
5. Скрыпников А. В. Распознавание рукописного текста с использованием нейронных сетей / А. В. Скрыпников, В. В. Денисенко, Е. Г. Хитров и др. // Современные наукоемкие технологии. — 2021. — № 6-1. — С. 91–95. — DOI: 10.17513/snt.38703.
6. Душкин Р. В. Структура ассоциативно-гетерархической памяти / Р. В. Душкин, В. А. Лелекова, В. Ю. Степаньков и др. // Russian Technological Journal. — 2022. — 10(5). — С. 7–15. — DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-5-7-15.
7. Позин Б. А. Прослеживаемость требований как основа проектирования функционально-логической архитектуры программной системы / Б. А. Позин, Г. Н. Циперман // Труды Института системного программирования РАН. — 2022. — № 34(1). — С. 23–34. — DOI: [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34\(1\)-2](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34(1)-2).
8. Распоряжение ОАО «РЖД» от 26 июля 2016 г. № 1489р «Об утверждении Политики клиентоориентированности холдинга «РЖД» в области грузовых перевозок».

9. Ильин Д. Ю. Программный фреймворк для экспериментальной оценки характеристик информационно-технологических решений в виртуальной среде / Д. Ю. Ильин // *Russian Technological Journal*. — 2022. — № 10(5). — С. 16–27. — DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-16-27>.

Дата поступления: 23.11.2022

Решение о публикации: 26.01.2023

Контактная информация:

ЖУРАВЛЕВА Наталья Александровна — д-р экон. наук, проф.; zhuravleva_na@mail.ru

САКОВИЧ Ольга Игоревна — аспирант; sakovicholga@yandex.ru

Algorithmizing Production Processes in Freight Rail Service Sales

N. A. Zhuravleva, O. I. Sakovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Zhuravleva N. A., Sakovich O. I. Algorithmizing Production Processes in Freight Rail Service Sales. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 114–124. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-114-124

Summary

Purpose: To develop algorithm for the technology of interaction between main participants of railway freight transportation, ensuring downtime reduction and safety of cargo transportation. **Methods:** Algorithmizing method was used — development of flowchart for the process, reflecting the logic of traceability of requirements to working functions, basing on projecting functional-logical architecture for the process of freight transportation paperwork. **Results:** Intellectualization of transport company employees' actions is associated with a variety of transportation technologies, including digital ones. Namely this is becoming a key element which ensures meeting requirements of speed and safety of transportations to working competences and intensity of transport organizations' employees. Main research results are: formalization of JSC "Russian Railways" employees' and consignors' actions and their compliance with processing results; flowchart building for process "Way Bill Approval" with fixating the process main tasks with their corresponding linkage to fulfiller's labor functions. Effectiveness evaluation of algorithmizing the process "Way Bill Approval" in accordance with the algorithm target functional was performed. **Practical significance:** Time savings at the formation of waybills, reduction of direct costs on the actions of freight transportation informational provision and increasing customer focus of the company were proved by conducted monetization assessment.

Keywords: Freight documentation, flowchart, optimization and visualization of informational processing, labor action intellectualization.

References

1. Mwema N. W., Gachunga H. G. The influence of performance appraisal on employee productivity in organizations: a case study of selected who offices in East Africa. 2014. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/THE-INFLUENCE-OF-PERFORMANCE-APPRAISAL-ON-EMPLOYEE-Mwema-Gachunga/24e7b0fab040bebf7c3505ed8a4debbe956abb50#citing-papers>.

2. Smith M. Information Optimization is a Key Benefit of Big Data Investments. 2013. Available at: <https://marksmith.ventanaresearch.com/marksmith-blog/2013/03/08/information-optimization-is-a-key-benefit-of-big-data-investments>.

3. GOST 19.701—90 (ISO 5807—85). *Edinaya sistema programmnoy dokumentatsii. Skhemy algoritmov, programm, dannykh i sistem. Uslovnye oboznacheniya i pravila vypolneniya* [GOST 19.701—90 (ISO 5807—85). Unified system of program documentation. Schemes of algorithms, programs, data and systems. Conventions and rules of execution]. (In Russian)

4. Akhmedzyanov G. G., Dremine V. V., Litvinov A. V. Covershenstvovanie ucheta parametrov ob"ektov zheleznodorozhnoy infrastruktury dlya povysheniya effektivnosti ekspluatatsii zheleznodorozhnogo pereezdnoy kompleksa [Improve the management of parameters of railway infrastructure to improve the effectiveness of the level crossing complex]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technologies]. 2022, Iss. 1, pp. 9–13. DOI: 10.17513/snt.39002. (In Russian)

5. Skrypnikov A. V., Denisenko V. V., Khitrov E. G. et al. Raspoznavanie rukopisnogo teksta s ispol'zovaniem neyronnykh setey [Determination of writing text using neuron networks]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technologies]. 2021, Iss. 6-1, pp. 91–95. DOI: 10.17513/snt.38703. (In Russian)

6. Dushkin R. V., Lelekova V. A., Stepankov V. Y. et al. *Struktura assotsiativno-geterarkhicheskoy pamyati* [Structure of associative heterarchical memory]. Russian Technological Journal. 2022, Iss. 10(5), pp. 7–15. DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-7-15>. (In Russian)

7. Pozin B. A., Tsiperman G. N. Proslezhivaemost' trebovaniy kak osnova proektirovaniya funktsional'no-logicheskoy arkhitektury programmnoy sistemy [Requirements traceability as the basis for designing a functional and logical architecture of a software system]. *Trudy Instituta sistemnogo programirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences]. 2022, Iss. 34(1), pp. 23–34. DOI: [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34\(1\)-2](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34(1)-2). (In Russian)

8. *Rasporyazhenie OAO "RZhD" ot 26 iyulya 2016 g. № 1489r "Ob utverzhdenii Politiki klientoorientirovannosti kholdinga "RZhD" v oblasti gruzovykh perezvovok"* [Decree of Russian Railways JSC dated July 26, 2016 № 1489r "On Approval of the Russian Railways Holding's Customer Orientation Policy in the Field of Freight Transportation"]. (In Russian)

9. Ilin D. *Programmnyy freymvork dlya eksperimental'noy otsenki kharakteristik informatsionno-tekhnologicheskikh resheniy v virtual'noy srede* [Framework for experimental evaluation of software solutions in a virtual environment]. Russian Technological Journal. 2022, Iss. 10(5), pp. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-16-27>. (In Russian)

Received: November 23, 2022

Accepted: January 26, 2023

Author's information:

Natalia A. ZHURAVLEVA — Dr. Sci. in Economics, Professor; zhuravleva_na@mail.ru

Olga I. SAKOVICH — Postgraduate Student; sakovicholga@yandex.ru

Специальные инструменты выявления и противодействия недобросовестным практикам с цифровыми финансовыми активами

А. Г. Коринной

Санкт-Петербургский университет Министерства внутренних дел Российской Федерации, Российская Федерация, 198206, Санкт-Петербург, ул. Летчика Пилютова, 1

Для цитирования: Коринной А. Г. Специальные инструменты выявления и противодействия недобросовестным практикам с цифровыми финансовыми активами // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 125–132. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-125-132

Аннотация

Цель: В статье рассматриваются концептуально новые подходы противодействия использованию криптовалют и электронных средств платежа в недобросовестных практиках. В результате установлено, что все они нацелены на выявление подозрительных транзакций и деанонимизацию личностей, причастных к незаконной деятельности. Обосновывается вывод о том, что информационно-аналитические системы являются перспективными специальными инструментами для эффективного контроля криптовалютного рынка и блокчейн-сетей. Теоретическую основу исследования составили научные публикации экспертов, специализирующихся на вопросах вовлечения, технологии блокчейна, распределенных реестров и криптовалют при расследовании преступлений, а также применяемые иностранные программные инструменты в области обеспечения безопасности блокчейн-сетей. **Методы:** В исследовании автор опирается на методы дедукции, системного анализа, обобщения и синтеза. **Результаты:** Определение возможностей зарубежных и отечественных специальных инструментов в сфере деятельности провайдеров виртуальных кошельков и операторов обмена (типа «криптовалютных бирж» и пр.). **Практическая значимость:** Представлен механизм функционирования специальных инструментов по деанонимизации транзакций с целью противодействия использованию криптовалют и электронных средств платежа в недобросовестных практиках.

Ключевые слова: Цифровые финансовые активы, криптовалюта, электронных средств платежа, недобросовестные практики, блокчейн-сети, деанонимизация, специальные инструменты, информационно-аналитические системы, машинное обучение.

Введение

В настоящий момент виртуальное пространство стало полем деятельности организованных преступных групп. Об этом можно судить по обобщенным результатам исследований криминалистических практик, где электронное средство платежа стало одним из основных средств финансовых расчетов в сфере незаконного оборота наркотических средств [1], психотропных и психоактивных веществ, оружия, финансирования террористической и экстремистской деятельности [2, 3]. Сюда же можно добавить предоставление российскими юридическими лицами услуг по обмену криптовалют на рубли и иностранную валюту, а также на

предметы роскоши, работы (услуги). В целом все подобное положение дел позволяет сделать вывод о масштабе и актуальности угрозы незаконного использования в целом цифровых финансовых активов (далее — ЦФА) в осуществлении сомнительных операций в соответствии с законодательством о противодействии легализации (отмыванию) доходов, полученных преступным путем, и финансированию терроризма [4]. Как правило, при транзакциях преступники используют криптовалюту [2]. Согласно отчету FATF, наиболее популярными являются Bitcoin, Ethereum, Monero. Правда, последний имеет сомнительную репутацию из-за своего анонимного статуса и повышенной конфиденциальности протокола.

Методы исследования

Для достижения цели исследования автор, используя метод дедукции, переходит от общего вопроса противодействия криминализации экономической сферы ЦФА к предметному набору специальных инструментов, доступных органам исполнительной власти, осуществляющим функции по обеспечению экономической безопасности. Метод анализа и обобщения был применен для описания свойств специальных инструментов по выявлению подозрительных транзакций и деанонимизации личностей, причастных к незаконной деятельности. Материалами для анализа послужили существующие инструменты аналитических компаний, специализирующихся в области использования технологии распределенных реестров и на вопросах безопасности протоколов блокчейн-сетей и криптовалют. Также с помощью метода синтеза была построена схема функционирования специальных инструментов деанонимизации применительно к процессу функционирования систем и программ обеспечения деанонимизации.

Результаты исследования

В данной статье внимание акцентируется на деанонимизации как инструменте предотвращения преступных практик с криптовалютой. Для противодействия анонимизации криптовалют и электронных средств платежа необходим широкий спектр мер воздействия на причины, их порождающие, с целью устранения или нейтрализации их последствий. Прежде всего необходимо идентифицировать личности участников и реальных бенефициаров, причастных к незаконной деятельности. На это неоднократно указывалось в официальных обзорах и криминалистической литературе [5, 3].

Для достижения целей исследования следует определить две группы инструментов по деанонимизации. Первая — универсальные инструменты — предназначена для снижения криминального потенциала криптовалюты путем видоизменений правил рынка и программного кода валют. То есть применительно

к экономической сфере эти инструменты воздействуют на экономику валюты в целом. По своей сути универсальные инструменты предназначены для проблем гораздо более глобального уровня, чем те, о которых идет речь в данной статье [6].

Назначение второй группы инструментов более конкретно: это обеспечение принудительной деанонимизации. Таким образом, мы имеем специальный инструментарий, напрямую воздействующий на теневой сектор криптовалютной экономики с помощью комплекса систем. Специальные инструменты, в отличие от универсальных, четко ориентированы на борьбу с недобросовестными практиками на аналитическом и оперативном подуровнях. Сюда входят инструменты, связанные с деятельностью Росфинмониторинга, финансово-кредитных организаций и правоохранительных органов. Оптимизация в этой сфере в конечном результате должна повысить результативность борьбы с определенными видами недобросовестных практик, а также обеспечить своевременное реагирование соответствующих структур о неединичных преступлениях такого рода [7].

Собственно, сами специальные инструменты обладают не слишком широкими возможностями влияния на процесс анонимизации и чаще всего представлены информационно-аналитическими системами и сетевыми разработками. Это относится как к российским, так и к иностранным производителям (в качестве примера можно привести «Прозрачный блокчейн», Crystal, Chainalysis, Elliptic) [8].

Сочетание разных методов и инструментов и уровня их воздействия на блокчейн-системы определяется не видимыми, «лежащими на поверхности» закономерностями, а гораздо более глубинными. Кроме того, они могут быть использованы в целях расследования предикатных преступлений и предоставления общей аналитической информации о состоянии криптовалютной сферы в России.

Разработанная в России по заказу Росфинмониторинга система «Прозрачный блокчейн» предназначена для мониторинга и анализа движения цифровых активов, в основном с использованием наиболее распространенных в России криптовалют (типа «биткоин» и пр.). Эксплуатация системы органами экономического и правоохранительного обеспечения должна решить следующие значимые задачи:

- осуществлять анализ, а также прослеживать движение цифровых активов;
- осуществлять сбор и хранение сведений определенных адресов сети блокчейна (виртуальных кошельков), владеющих виртуальными активами, а также, возможно, вовлеченных в противоправную деятельность;
- осуществлять наблюдение за деятельностью участников криптовалютного рынка и блокчейн-сетей;
- осуществлять налогообложение операций в сети блокчейна;
- оформлять профили участников транзакций и оценивать их роль в экономической деятельности.

Однако также следует обратить внимание и на западный опыт в части имеющихся на рынке информационных систем [9, 10]:

– коммерческий программный продукт от сервиса Crystal дает возможность внутренним службам операторов обмена криптовалют проследить пути перемещения подозрительных транзакций до конечного получателя или точки вывода криптовалюты. Такой тип инструментов можно отнести к аналитическому типу: он не дает оценок законности транзакций, однако допускает сбор и обработку подробной информации сотрудниками правоохранительных органов или внутреннему пользователю;

– Chainalysis, ИТ платформа занимающаяся криптовалютными расследованиями. Программный продукт для блокчейн-сетей под названием Know Your Transaction (KYT) предоставляет обратную связь по транзакциям в реальном времени и отправляет соответствующую информацию операторам обмена на «движок обработки транзакций». Таким образом, руководители площадок видят «рискованных» пользователей и получают возможность отслеживать их подозрительные действия [3]. Инструмент может показать свою эффективность в отслеживании людей, которые участвуют в незаконной деятельности, связанной с криптовалютами. Как пример использования — наличие в списках западных санкций граждан РФ. Инструмент активно применяют иностранные правоохранительные органы США (ФБР и Управление по борьбе с наркотиками) и ЕС (Европол);

– Elliptic представляет собой комплексный скрининг возможных рисков в обеспечении соответствия требованиям деанонимизации и объединяет поток транзакций клиентов и их криптоактивов в сетях блокчейн, иллюстрируя всю криптосферу. Он также укажет на угрозу, независимо от актива или анализируемого блокчейна. Как прогностический инструмент он может использоваться в качестве системы предоставления прогностических показателей и построения прогностических моделей, позволяющих в дальнейшем снизить риски использования криптовалют и электронных средств платежа в схемах легализации.

Таким образом, анализируя основные принципы функционирования систем, программ обеспечения деанонимизации и получения общей информации о состоянии криптовалютной сферы, можно прийти к выводу, что почти все они построены на инструментах науки о данных и машинном обучении. Эти инструменты во многом пересекаются, но все же они разные и у каждого свои задачи.

Схема 1
Принцип функционирования
специальных инструментов
деанонимизации



Рассмотрим основные свойства специальных инструментов применительно к процессу функционирования систем, программ обеспечения деанонимизации:

1. Большие данные (Big Data) — непрерывная работа с большим объемом данных, полученных непосредственно от блокчейн-сетей (операторов обмена). Это в основном выборки типовых транзакций, работе с которыми нужно обучить систему. Чем больше транзакций загружено в систему, тем лучше и точнее она будет работать.

2. Даталогия, или наука о данных (Data Science). Позволяет извлекать полезные сведения из общего потока транзакций в исследуемой сети блокчейн с целью нахождения правильного подхода для дальнейшего анализа, сортировки, выборки и поиска данных, в нее поступающих.

3. Признаки представлены в системе в виде аналитических данных о недобросовестных практиках, связанных с возможными злоупотреблениями в сфере информационных технологий и позволяющих уходить от мониторинга и идентификации источника для целей извлечения выгоды или совершения преступления по отмыванию незаконно полученных доходов [11, 12].

4. Алгоритм используется для алгоритмизации функционирования выбранного подхода как внутри подсистемы, так и между подсистемами. Подбор уникального алгоритма деанонимизации определяет задачи, которые ставятся перед системой, программой.

5. Машинное обучение (Machine learning) позволяет искусственному интеллекту делать выводы о конкретных операциях с криптовалютой и электронными средствами платежа на основании выходных данных из подсистем с учетом прописанных признаков недобросовестных операций, схем по отмыванию доходов, видов преступлений и т. д. То есть система (программа) должна найти закономерность в сложных многопараметрических задачах, выдавая таким образом более точные результаты обработки исходных данных выборки. Как результат — более точное прогнозирование.

Соответственно, выявление подозрительных транзакций и деанонимизация являются перспективными специальными инструментами предотвращения преступных практик с целью мониторинга и контроля криптовалют и электронных средств платежа, учитывающими специфику исследуемой сферы и опирающимися на принципы анализа типовых транзакций с помощью обработки больших массивов данных с использованием метода машинного обучения, подобранного с учетом особенностей поставленных задач.

Библиографический список

1. Сизов Д. А. К вопросу организации противодействия незаконному обороту синтетических аналогов каннабиноидов (по материалам УМВД России по Костромской области) / Д. А. Сизов // Труды Академии управления МВД России. — 2015. — № 3(35). — С. 125–128.

2. Батоев В. Б. Использование криптовалюты в преступной деятельности: проблемы противодействия / В. Б. Батоев, В. В. Семенчук // Труды Академии управления МВД России. — 2017. — № 2(42). — С. 9–15.

3. Земцова С. И. Криптовалюта в незаконном обороте наркотических средств: вопросы деанонимизации и ответственности / С. И. Земцова // Криминалистика: вчера, сегодня, завтра. — 2020. — № 1(13). — С. 54–63. — DOI: 10.24411/2587-9820-2020-10007.

4. Об утверждении Стратегии государственной антинаркотической политики Российской Федерации на период до 2030 года: Указ Президента РФ от 23 ноября 2020 г. № 733 // Информационный портал «Гарант.ру». — URL: Garant.ru (дата обращения: 15.10.2022).

5. Новоселов Н. Г. Использование системы «Прозрачный блокчейн» в борьбе с незаконным оборотом наркотиков / Н. Г. Новоселов // Актуальные проблемы борьбы с преступностью: вопросы теории и практики : материалы XXV Международной научно-практической конференции: Красноярск, 07–08 апреля 2022 года. — Красноярск: Сибирский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, 2022. — С. 267–269. — DOI: 10.51980/978-5-7889-0334-7_2022_5_2_267.

6. Грачев А. В. Организационно-экономические инструменты противодействия криминализации общества (на примере органов внутренних дел): дисс. ... канд. экон. наук / А. В. Грачев. — СПб., 2007. — 206 с.

7. Соловьев В. И. О возможности осуществления контроля за оборотом цифровых финансовых активов / В. И. Соловьев, В. К. Конторович, В. Г. Феклин // Проблемы экономики и юридической практики. — 2022. — Т. 18. — № 5. — С. 242–247. — DOI: 10.33693/2541-8025-2022-18-5-242-247.

8. Крыгин С. В. Инструментарий деанонимизации криптовалют / С. В. Крыгин, С. И. Кувычков, С. Н. Сухов // Государство и право в изменяющемся мире: конвергенция частных и публичных интересов: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Нижний Новгород, 26 марта 2020 года. — Нижний Новгород: Автор, 2021. — С. 227–232.

9. History Has Its Eyes on Crypto. Let's Prove It's on the Right Side. — URL: www.blog.chainalysis.com/reports/sanctions-screening-tools/ (дата обращения: 15.09.2022).

10. URL: <http://cbr.ru> (дата обращения: 12.11.2022).

11. Коринной А. Г. Об отдельных элементах механизма регулирования оборота криптовалюты / А. Г. Коринной // Вестник экономической безопасности. — 2022. — № 1. — С. 271–276. — DOI: 10.24412/2414-3995-2022-1-271-276.

12. Концепция противодействия недобросовестным действиям на финансовом рынке // Официальный сайт ЦБ РФ. — URL: <http://cbr.ru> (дата обращения: 09.10.2022).

Дата поступления: 16.12.2022

Решение о публикации: 21.02.2023

Контактная информация:

КОРИННОЙ Александр Геннадьевич — адъюнкт; koorish@mail.ru

Special Instruments to Reveal and Resist Unfair Practices with Cryptocurrencies and Digital Financial Assets

A. G. Korinnoy

Saint Petersburg University of Russian Federation Internal Affairs Ministry, 1, Letchika Pilyutova str., Saint Petersburg, 198206, Russian Federation

For citation: Korinnoy A. G. Special Instruments to Reveal and Resist Unfair Practices with Cryptocurrencies and Digital Financial Assets. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 125–132. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-125-132

Summary

Purpose: The article discusses conceptually new approaches to resist using cryptocurrencies and electronic payment means in unfair practices. As a result, it was found that all of them are aimed at revealing suspicious transactions and deanonymized individuals involved in illegal activities. The conclusion is substantiated that information and analytical systems constitute promising special tools for effective control of cryptocurrency market and blockchain networks. The research theoretical basis comprises scientific publications of the experts specialized in the issues of involvement, blockchain technology, distributed registries and cryptocurrencies at the investigation of crimes as well as foreign software tools, applied in the field of blockchain networks security. **Methods:** In the research, the author relies on deduction, generalization, synthesis and system analysis methods. **Results:** Determination of the capabilities of foreign and domestic software special tools in the field of virtual wallet providers and exchange operators (such as “crypto-currency brokers’ board”, etc.). **Practical significance:** The mechanism of functioning of special software tools for deanonymization of transactions in order to resist the use of cryptocurrencies and payment electronic means in unfair practices is presented.

Keywords: Digital financial assets, cryptocurrency, electronic payment means, unfair practices, blockchain networks, deanonymization, special tools, informational and analytical systems, machine learning.

References

1. Sizov D. A. K voprosu organizatsii protivodeystviya nezakonnomu oborotu sinteticheskikh analogov kannabinoidov (po materialam UMVD Rossii po Kostromskoy oblasti) [On the issue of the organization of counteraction to the illicit trafficking of synthetic analogues of cannabinoids (based on the materials of the Ministry of Internal Affairs of Russia in the Kostroma region)]. *Trudy Akademii upravleniya MVD Rossii* [Proceedings of the Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia]. 2015, Iss. 3(35), pp. 125–128. (In Russian)
2. Batoev V. B., Semenchuk V. V. Ispol'zovanie kriptovalyuty v prestupnoy deyatelnosti: problemy protivodeystviya [The use of cryptocurrencies in criminal activity: problems of counteraction]. *Trudy Akademii upravleniya MVD Rossii* [Proceedings of the Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia]. 2017, Iss. 2(42), pp. 9–15. (In Russian)
3. Zemtsova S. I. Kriptovalyuta v nezakonnom oborote narkoticheskikh sredstv: voprosy deanonimizatsii i otvetstvennosti [Cryptocurrency in illicit drug trafficking: issues of deanonymization and responsibility]. *Kriminalistika: vchera, segodnya, zavtra* [Criminalistics: yesterday, today, tomorrow]. 2020, Iss. 1(13), pp. 54–63. DOI: 10.24411/2587-9820-2020-10007. (In Russian)
4. Ob utverzhenii Strategii gosudarstvennoy antinarkoticheskoy politiki Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda: Ukaz Prezidenta RF ot 23 noyabrya 2020 g. № 733 [On approval of the Strategy

of the state anti-drug policy of the Russian Federation for the period up to 2030: Decree of the President of the Russian Federation of November 23, 2020 № 733]. *Informatsionnyy portal "Garant.ru"* [Information portal "Garant.ru"]. Available at: Garant.ru (accessed: October 15, 2022). (In Russian)

5. Novoselov N. G. *Ispol'zovanie sistemy "Prozrachnyy blokcheyn" v bor'be s nezakonnym oborotom narkotikov. Aktual'nye problemy bor'by s prestupnost'yu: voprosy teorii i praktiki : materialy XXV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Krasnoyarsk, 07–08 aprelya 2022 goda* [The use of the "Transparent blockchain" system in the fight against drug trafficking. Actual problems of combating crime: questions of theory and practice: Materials of the XXV scientific and practical International Conference. In 2 parts, Krasnoyarsk, 07–08 April 2022]. Krasnoyarsk: Sibirskiy yuridicheskoy institut Ministerstva vnutrennikh del Rossiyskoy Federatsii Publ., 2022, pp. 267–269. DOI: 10.51980/978-5-7889-0334-7_2022_5_2_267. (In Russian)

6. Grachev A. V. *Organizatsionno-ekonomicheskie instrumenty protivodeystviya kriminalizatsii obshchestva (na primere organov vnutrennikh del): diss. ... kand. ekon. nauk* [Organizational and economic tools to counter the criminalization of society (on the example of internal affairs bodies): diss. ... cand. economy Sciences]. St. Petersburg, 2007, 206 p. (In Russian)

7. Solovyov V. I., Kontorovich V. K., Feklin V. G. O vozmozhnosti osushchestvleniya kontrolya za oborotom tsifrovyykh finansovykh aktivov [On the possibility of controlling the turnover of digital financial assets]. *Problemy ekonomiki i yuridicheskoy praktiki* [Problems of Economics and legal practice]. 2022, vol. 18, Iss. 5, pp. 242–247. DOI: 10.33693/2541-8025-2022-18-5-242-247. (In Russian)

8. Krygin S. V., Sukhov S. N. *Instrumentariy deanonimizatsii kriptovalyut. Gosudarstvo i pravo v izmenyayushchemsya mire: konvergentsiya chastnykh i publichnykh interesov: materialy Vserossiyskoy nauchno prakticheskoy konferentsii, Nizhniy Novgorod, 26 marta 2020 goda* [Tools for deanonymization of cryptocurrencies. State and law in a changing world: convergence of private and public interests: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Nizhny Novgorod, March 26, 2020]. Nizhny Novgorod: Avtor Publ., 2021, pp. 227–232. (In Russian)

9. History has set its eye on cryptography. Let's prove that it's on the right side. Available at: www.blog.chainalysis.com/reports/sanctions-screening-tools (accessed: September 15, 2022).

10. Available at: <http://cbr.ru> (accessed: November 12, 2022).

11. Korinnoy A. G. Ob otdel'nykh elementakh mekhanizma regulirovaniya oborota kriptovalyuty [On the individual elements of the mechanism for regulating the turnover of cryptocurrencies]. *Vestnik ekonomicheskoy bezopasnosti* [Bulletin of Economic Security]. 2022, Iss. 1, pp. 271–276. DOI: 10.24412/2414-3995-2022-1-271-276. (In Russian)

12. Kontseptsiya protivodeystviya nedobrosovestnym deystviyam na finansovom rynke [The concept of counteraction to unfair actions in the financial market]. Ofitsial'nyy sayt TsB RF [Official website of the Central Bank of the Russian Federation]. — URL: <http://cbr.ru> (accessed: October 09, 2022). (In Russian)

Received: December 16, 2022

Accepted: February 21, 2023

Author's information:

Alexandr G. KORINNOY — Postgraduate Student; koorish@mail.ru

Перспективы транспортировки грузов в границах стран пространства 1520

Л. М. Чеченова

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Чеченова Л. М. Перспективы транспортировки грузов в границах стран пространства 1520 // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 133–146. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-133-146

Аннотация

Цель: Оценить значимость транспортировки грузов для экономики стран пространства 1520. Данное исследование подтверждает необходимость расширения возможностей железнодорожной инфраструктуры несмотря на последствия санкционных ограничений, неопределенность международной политической обстановки и дисбаланс трансевразийских контейнерных перевозок с целью достижения экономического роста национальных экономик стран пространства 1520. **Методы:** Используются методы аналитики и диагностики данных (наблюдение, анализ, синтез) нормативно-правовых положений, регулирующих отношения в рамках грузоперевозок по сети железных дорог, а также отчетов ведущих железнодорожных компаний стран пространства 1520 – ОАО «РЖД», АО «НК «Қазақстан темір жолы», Белорусской ЖД и пр., российских и зарубежных экспедиторских компаний, операторов-перевозчиков, данных ФТС РФ и зарубежных таможенных органов, статистических и аналитических информационных баз. **Результаты:** Дана характеристика основным железнодорожным системам ведущих стран пространства 1520 с уточнением количества международных и внутренних контейнерных и контейнерно-контрейлерных маршрутов. Установлены факторы, влияющие на развитие перевозок грузов на территории России по колее 1520, оценены перспективы транспортировки грузов с учетом текущего состояния транспортно-логистического рынка России. **Практическая значимость:** Полученные результаты имеют прикладной характер, поскольку предлагают и обосновывают ряд мер, обеспечивающих эффективное развитие перевозок грузов с учетом существующих инфраструктурных ограничений.

Ключевые слова: Пространство 1520, железнодорожный транспорт, транспортировка грузов.

Введение

Объединение государств в рамках пространства 1520 (Азербайджан, Армения, Беларусь, Грузия, Казахстан, Кыргызстан, Латвия, Молдова, Монголия, Россия, Таджикистан, Туркменистан, Узбекистан и пр.) создает условия для синхронизации мероприятий, направленных на развитие международных транспортных коридоров, и повышения доли доходов от железнодорожной отрасли в ВВП национальных хозяйств [1]. Следует отметить, что указанные государства суммарно занимают более 16 % мировой территории, а протяженность железнодорожных путей, соответствующих стандартам колеи 1520 мм, составляет порядка 18 % длины мировой сети железных дорог (около 240 тыс. км).

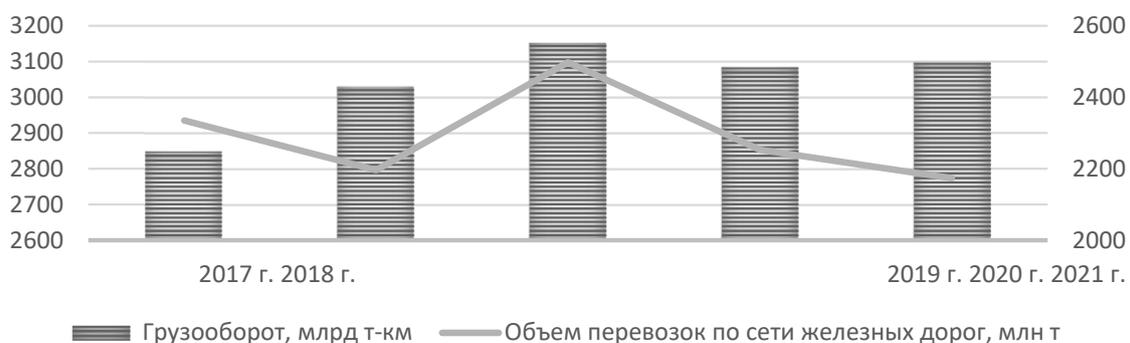


Рис. 1. Динамика показателей перевозок грузов по сети железных дорог на пространстве 1520

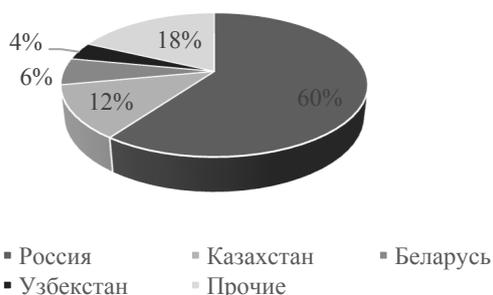


Рис. 2. Страны — лидеры по объему грузоперевозок на пространстве 1520 в 2021 г.



Рис. 3. Страны — лидеры по грузообороту на пространстве 1520 в 2021 г.

Последние годы наблюдается незначительная отрицательная динамика основных показателей перевозок грузов по сети железных дорог, что, несомненно, связано с локдауном вследствие пандемического кризиса, ограничительными мерами и санкциями в отношении России со стороны мирового сообщества. Тем не менее для стран пространства 1520 снижение объемов грузовых перевозок было не столь критично (рис. 1) в сравнении с сокращением показателей по объемам перевозок пассажиров (35 %) к уровню 2019 г.

Российские железные дороги занимают ведущие позиции по перевозкам на пространстве 1520, что подтверждают данные по объему грузоперевозок — около 60 % и грузообороту — 85 % к началу 2022 г. (рис. 2, 3).

Для большинства стран железнодорожная отрасль является системообразующей экономической компонентой, поскольку обеспечивает перевозку продукции от мест добычи к пунктам ее переработки и реализации, а также расширяет возможности транзитного потенциала национальных транспортных систем.

Материалы и методы исследования

Целью данного исследования является оценка значимости транспортировки грузов для экономики стран пространства 1520. За основу взяты нормативно-правовые положения, регулирующие отношения в рамках грузоперевозок по сети ЖД:

– Бернской конвенции о международных перевозках грузов (включена в состав Конвенции о международных железнодорожных перевозках: Convention relative aux Transport international ferroviaires) [2];

– Соглашения о международном грузовом сообщении, которое закрепляет форму унифицированной накладной, подтверждающей заключение договоров для международных грузоперевозок по сети железных дорог [3].

Отсутствие нормативно-правового закрепления определения мультимодальных перевозок дает нам основание учитывать объем перевозок грузов контейнерами в качестве основного рыночного индикатора.

Материалами исследования послужили отчеты ведущих железнодорожных компаний стран пространства 1520 — ОАО «РЖД», АО «НК «Қазақстан темір жолы», Белорусской ж. д. и пр., российских и иностранных экспедиторских компаний, операторов-перевозчиков, данные Федеральной таможенной службы России и зарубежных таможенных органов, статистические и аналитические информационные базы данных.

В аспекте теории систем национальная транспортная система относится к категории сложных систем со всеми характерными особенностями, что предопределяет применение методов системного анализа. В частности, сравнительный анализ функционирования национальных систем грузовых перевозок и грузопотоков позволил сформировать справку по основным показателям, характеризующим состояние основных железнодорожных систем стран пространства 1520 на 2021 г. в сегменте перевозок грузов (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Характеристика основных железнодорожных систем ведущих стран пространства 1520

Основные характеристики	Россия	Казахстан	Беларусь
Доля ж. д. в структуре общего грузооборота РФ, %	46	41	36,8
Протяженность ж.-д. инфраструктуры общего пользования, тыс. км	85,5	16,1	5,5
Грузонапряженность ж.-д. инфраструктуры, млн т-км на 1 км	304	13,9	8,8
Тарифный грузооборот, млрд т-км	25 992,0	223,8	48,4
Количество грузовых вагонов, тыс. вагонов	1179,5	132	44,8
Размер парка тягового подвижного состава, тыс. ед.	19,7	1,8	0,761
Объемы перевозки грузов, млн т	1405	283,9	145,5.
Стоимость перевозки грузов, руб/т	800,5	569,5	569
Доля в грузообороте стран пространства 1520, %	84	8	1,5
Доля доходов ж.-д. транспорта в ВВП, %	1,3		2
Размер средней заработной платы сотрудников ж.-д. транспорта, тыс. руб.	58,5	35,5	—
Отношение средней заработной платы сотрудников ж.-д. транспорта к средней по стране, %	122	112,5	—

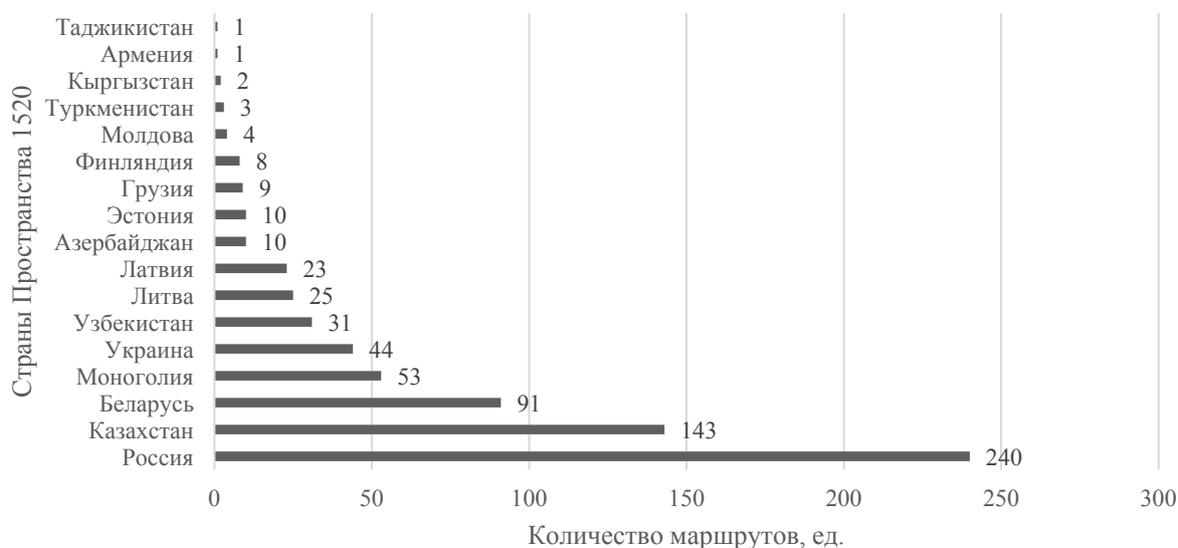


Рис. 4. Количество международных и внутренних контейнерных и контейнерно-контейнерных маршрутов стран пространства 1520

На начало 2022 г. по сети железных дорог пространства 1520 функционирует порядка 300 международных и внутренних контейнерных и контейнерно-контейнерных маршрутов (рис. 4).

За период с 2018 по 2021 г. отмечена положительная динамика железнодорожных контейнерных перевозок в границах стран пространства 1520 с преимущественным ростом в 178 % по маршруту «Китай — Европа — Китай». Это объясняется дисбалансом в сегменте морских грузоперевозок вследствие пандемического кризиса, дефицита контейнеров в Китае и увеличения стоимости фрахта в 2–4 раза. Первое полугодие 2022 г. фиксирует снижение показателей по объемам грузоперевозок контейнерами в целом на 9 %, что является последствием санкционных ограничений и неопределенной международной политической обстановкой.

Результаты исследования

1. Установлены факторы, влияющие на развитие перевозок грузов в территориальных границах России по колее 1520

Итоги 2016–2021 гг. показали стабильный рост грузоперевозок контейнерами по сети железных дорог — более 80 % за весь период. За весенним локдауном 2020 г., вызванным пандемическим кризисом [4], последовало постепенное восстановление контейнероборота, реновация логистических цепей поставок, повышение фрахтовых ставок с ростом контейнерных грузоперевозок во внутреннем сообщении в 112 %, экспортных — 114 %, импортных 116 %, транзитных — 140 %. Особая роль в данной ситуации отводится транспортному потенциалу

Дальневосточного региона и Арктики, что подтверждается обозначением стратегических целей для железнодорожного грузового транзита МТК «Север — Юг» и «Восток — Запад» и запуском модифицированного логистического сервиса «РЖД Логистика» и FESCO.

ОАО «РЖД» активно наращивает объемы контейнерного грузооборота, возмещая недополученную долю доходов, возникших в 2020 г. в результате применения льготных тарифов в отношении транзита по территории РФ в период пандемического кризиса [5]. Учитывая вызовы 2022 г. в части эскалации санкций, отметим изменение тарифных решений со 2-го полугодия 2022 г. [6] и рекордную индексацию железнодорожных тарифов на перевозку грузов на 11 % к уровню 1 января — 31 мая 2022 г. [7]. В настоящее время суммарно рост тарифной нагрузки в сравнении с 2021 г. — более 118 %. В дополнение к сказанному, на летний период 2022 г. были исключены льготы на экспорт каменного угля, что привело к росту дополнительной тарифной нагрузки на грузоотправителей на ± 150 % в зависимости от дальности расстояния и сокращению объемов погрузки.

2. Предложены меры, обеспечивающие эффективное развитие перевозок грузов по сети железных дорог с учетом существующих инфраструктурных ограничений

Дополнительным фактором, сдерживающим системное развитие и полноценную реализацию потенциала мультимодальных перевозок, является ограниченность пропускной способности железнодорожной инфраструктуры и логистических мощностей. При этом транспортно-логистический рынок государств пространства 1520 характеризуется ограниченным и узконаправленным характером применения цифровых сервисов и интеллектуальных технологий, а также наличием таможенных и правовых ограничений, несмотря на межгосударственные союзы и соглашения. В текущих условиях многие страны пользуются обходными маршрутами Средней Азии, что снижает интерес инвесторов к развитию национальной транспортной инфраструктуры.

Справочно — в России к началу 2022 г. объем грузоперевозок с учетом всех видов транспорта составил более 9 млрд тонн, при этом наибольший удельный вес (98 %) по перевозкам приходится на автомобильный, железнодорожный и трубопроводный виды транспорта. С учетом дальности в структуре грузооборота доля автомобильной транспортировки составляет около 6 % (до 500 км), железнодорожного и трубопроводного 48 % и 44 % соответственно по перевозкам на расстояния от 500 км. При этом недостаточное развитие внутреннего водного транспорта РФ, на который приходится более 1 % объема грузоперевозок, сдерживает эффективность смешанных контейнерных грузоперевозок. Причиной тому послужило отсутствие необходимой инфраструктуры и специализированного контейнерного

флота — перевозка осуществляется исключительно сухогрузными судами со средним количеством в эксплуатации от 35 до 45 лет (срок полезного использования согласно технической документации — до 10 лет). В итоге транспортировка грузов контейнерами представлена в основном перегрузкой продукции в портах на железнодорожный транспорт, вывозом продукции с мест добычи/переработки на основные магистрали Севморпути с удельным весом менее 1 % по внутренним водным путям РФ.

Таким образом, в отношении водного и железнодорожного видов транспорта по-прежнему актуальной остается проблема ограниченности и неравномерности развития инфраструктуры, в частности отсутствие подъездных путей к промышленным объектам, недостатка подвижного состава [8]. К примеру, объекты морской инфраструктуры Арктического бассейна и Дальневосточного региона по мощности существенно превосходят возможности автомобильного и железнодорожного видов транспорта. В частности, ключевые магистральные сети РФ — БАМ и Транссиб требуют модернизации с ростом пропускной способности, поскольку наличие узких мест приводит к торможению грузовых потоков в направлении ДФО и Арктики и обратно. Кроме того, высока потребность в создании и модернизации подъездной инфраструктуры к добывающим и промышленным предприятиям, поскольку ежегодно наращиваются объемы портовых мощностей параллельно с ростом грузонапряженности сухопутных подходов к ним. На рис. 5 предложены решения, направленные на развитие мультимодальной перевозки грузов по территории РФ, позволяющие объединять в рамках одной перевозки несколько видов транспортных средств с обеспечением более гибкого выбора между стоимостью и скоростью доставки грузов в контексте территориальных возможностей России.

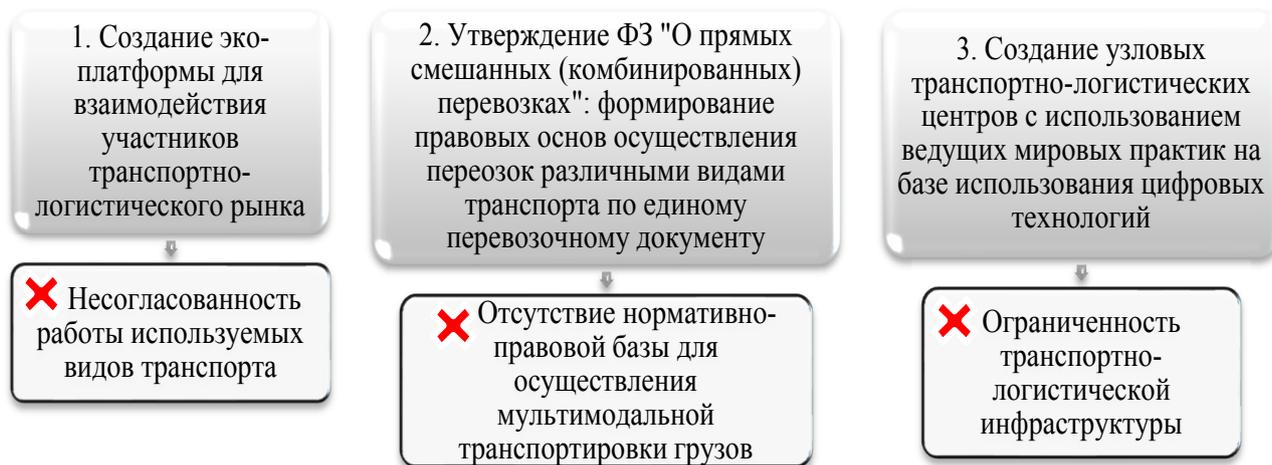


Рис. 5. Решения, направленные на развитие транспортировки грузов

Предложенные решения направлены не только на рост объемов перевозимых грузов, но и расширение цифровых возможностей транспортной отрасли в части создания логистической платформы для совместного интегрированного процесса транспортировки, создания экосистем цифровых транспортных коридоров на пространстве 1520 [9]. Отметим, что логистическая экоплатформа относится к тем инструментам, которые позволят в полной мере использовать потенциал логистики как технологии управления цепями поставок и сетевым взаимодействием. В границах экопространства предлагается объединение единичных разрозненных сегментов информационных систем перевозок воедино, исходя из принципа национального суверенитета данных, сделав процесс перевозки максимально прозрачным, эффективным и понятным для пользователей самого разного уровня: от грузовладельцев и грузоперевозчиков до контрольно-надзорных органов. Это позволит оптимизировать процесс транспортировки и декларирования грузов, минимизировать барьеры и повысить конкурентоспособность для добросовестных участников перевозочного процесса, в том числе за счет определения наиболее оптимальных маршрутов и условий перевозки, использования юридически значимых электронных документов, оптимизации функций государственных контролирующих органов и формирования единой информационной среды, в том числе на наднациональном уровне, что обеспечит существенное сокращение административных и временных затрат перевозчиков, рост оборачиваемости грузов.

3. Дана оценка перспективам транспортировки грузов с учетом текущего состояния транспортно-логистического рынка России

Одним из факторов оптимизации грузовых потоков является создание опорной сети транспортно-логистических центров (далее — ТЛЦ), работающих в режиме сухих портов, с решением комплекса задач — сократить порог расходов на логистику, создать условия для эффективного развития рынка транспортно-логистических услуг, обеспечить рост предпринимательской активности с последующей индексацией позиций России в рейтинге эффективности логистики.

Необходимость развития объектов транспортной инфраструктуры подтверждается результатами прогнозных данных генеральной схемы развития сети ТЛЦ [10] по оценке потенциала грузопереработки опорной сети ТЛЦ (рис. 6) и включением ведомственного проекта «Формирование сети транспортно-логистических центров» в госпрограмму «Развитие транспортной системы» в 2021 г.

Исследование опыта зарубежных государств показало, что формирование ТЛЦ является значимым фактором, существенно влияющим на развитие национального транспортного комплекса. Так, к началу 2021 г. доходы транспортной отрасли Нидерландов на 40 % обеспечены результатами деятельности ТЛЦ, прочих стран Европы — более 30 %. Перспективным форматом работы ТЛЦ является

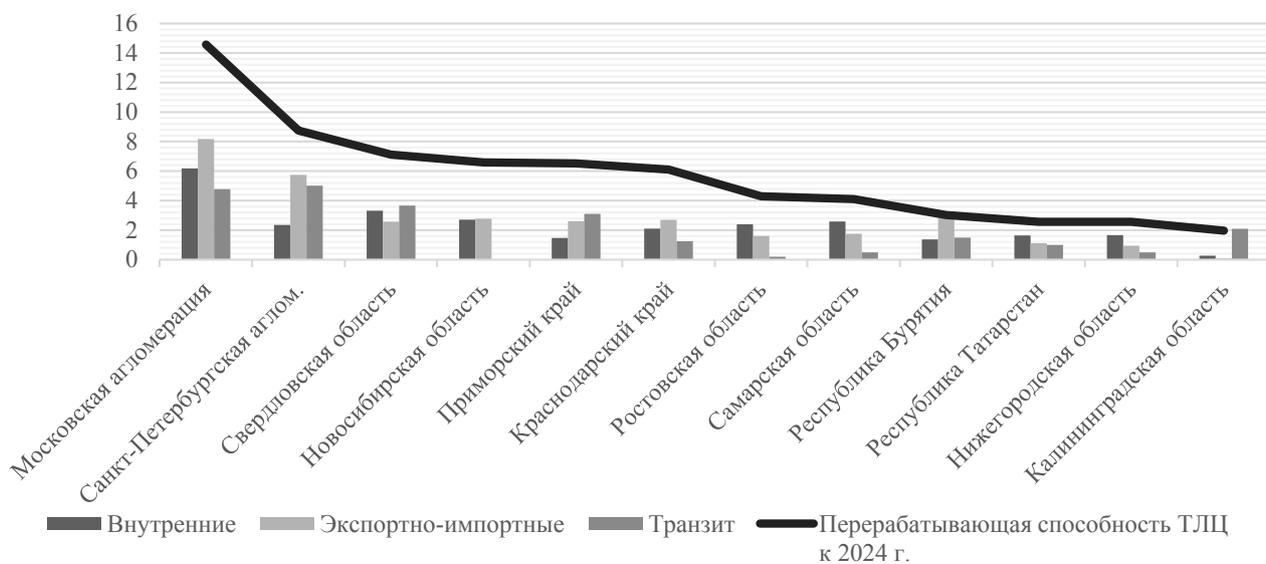


Рис. 6. Оценка потенциала грузопереработки опорной сети ТЛЦ, млн т/год



Рис. 7. Порядок организации контрейлерной перевозки

грузовая деревня, расположенная между несколькими городами в границах стран пространства 1520, с интеграцией интермодальной инфраструктуры: аэропорта, железнодорожных путей, порта, бизнес-парков и социальных объектов (например, Plaza, Мадрид, Испания), что способствует экономии на транспортных издержках, росту мобильности перевозок за счет улучшенной координации и сортировки грузов и как социальный фактор обеспечивает занятость населения путем создания дополнительных рабочих мест.

Кроме того, следует обратить внимание на необходимость наращивания объемов контрейлерных перевозок (рис. 7).

По данным ОАО «РЖД», к сентябрю 2022 г. парк универсальных и фитинговых платформ РФ насчитывает более 65 000 ед., парк контрейлерных платформ АО «ФГК» — 102 специальные контрейлерные платформы с планами по дополнительной закупке 100 единиц «колодецевого» типа. Для сравнения — в составе транспортного комплекса США сформировано более 100 специальных терминалов при наличии 310 тыс. контрейлерных платформ. Несмотря на нестабильность мировой логистики, в 2021 г. были протестированы пилотные маршруты между странами пространства 1520, характеристики которых представлены на рис. 8.

Москва — Орша (Беларусь) — Лиепая (Латвия) — Травемюнде (Германия)

- цель тестового маршрута — установить особенности международной отправки контейнеров, уточнить порядок таможенных операций;
- участники — Schenker AG («Шенкер АГ»), Stena Line, ООО «LDZ Logistik», АО «Первый федеральный контейнерный оператор»
- реальное время в пути — 6 дней с проектируемым снижением сроков до 3–4 дней

Московская область — Калининград — Беларусь

- цель тестового маршрута — установить особенности международной отправки, уточнить порядок таможенных операций;
- участники — ОАО «РЖД», ПАО «ТрансКонтейнер», ТД «ЭкоПолимеры», ООО «Стройкерамика», ООО «Рустрейл», ООО «Лазурит Карго», Белорусская железная дорога

Рис. 8. Пилотные маршруты контейнерной грузоперевозки

К положительным эффектам от развития контейнерных перевозок для стран пространства 1520 можно отнести рост качественной составляющей транспортной услуги: безопасности (сохранность груза), экологичности, мобильности транспортировки [11, 12]. Мультипликативный эффект от перевозок контейнерами зависит от роста объемов грузоперевозок и эффективности использования электроэнергии. Однако, по данным на начало 2022 г., статус контейнера не определен, поскольку прицеп является транспортным средством и параллельно грузом, перевозимым по ж.-д. платформе. Соответственно, необходимо принятие мер в части внесения изменений в существующие нормативно-правовые акты по совершенствованию таможенных процедур и определению статуса перевозимого груза контейнером.

За 2020–2022 гг. рынок грузовых перевозок России претерпел значительные изменения. Перестройка рынков сбыта, санкции, уход мировых контейнерных гигантов из РФ привели к снижению ставок и объемов океанских перевозок — с максимальных значений в 10–15 тыс. долл. за фрахт 40-футового контейнера на китайско-европейском маршруте (уровень осени 2021 г.) стоимость снизилась до 2,7 тыс. долл. [13]. Железнодорожные контейнерные перевозки менее волатильны к внешним условиям и потому могут выступать дублирующим инструментом. Главным трендом остается транспортировка грузов с Запада на Восток, что подтверждается данными об увеличении по итогам 6 мес. 2022 г. объемов контейнерных перевозок по Транскаспийскому международному транспортному маршруту до 14 тысяч TEU (рост в 1,5 раза с аналогичным периодом за 2021 г.), из КНР транзитом через Россию — до 500 тыс. TEU, а также экспорта товаров из Ирана в Россию за 2022 г. более чем на 70 % [14]. К сожалению, текущая общемировая ситуация не дает возможности прогнозировать, в том числе на краткосрочный период, что однозначно ведет к применению контейнерными операторами адаптивных механизмов и работе в оперативном режиме.

Заключение

Проведенное исследование и итоги 2022 г. подтверждают необходимость расширения возможностей железнодорожной инфраструктуры [15]. В 2022 г. с учетом текущей общемировой ситуации, токсичной атмосферы вокруг России и Беларуси наблюдается восстановление динамики транзита из Китая в Европу и прирост объемов почти на 58 %, несмотря на сокращение субсидий Китая на экспорт товара железнодорожным транспортом (сокращение — до 10 %). В обратном направлении по-прежнему ведется политика сдерживания, что предопределяет дисбаланс трансевразийских контейнерных перевозок по колее 1520. Все вышесказанное указывает на стрессоустойчивость большей части маршрутов и обосновывает необходимость обеспечения благоприятных условий для наращивания объемов перевозки грузов [16] с целью достижения экономического роста национальных экономик стран пространства 1520.

Библиографический список

1. Аналитический обзор инвестиционной компании «РЖД-Инвест». — URL: <https://rzd-invest.ru/> (дата обращения: 07.11.2022).
2. Особые условия международных перевозок (SCIC) по проездным документам в сообщении Восток — Запад (EWT). — URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=805> (дата обращения: 07.11.2022).
3. Соглашение о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) и Служебная инструкция к СМГС (с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 июня 2022 г.). — URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=1816> (дата обращения: 07.11.2022).
4. Журавлева Н. А. Влияние постпандемийной экономики на бизнес-модель транспортных организаций / Н. А. Журавлева // Транспорт Российской Федерации. — 2020. — № 3-4(88-89). — С. 20–23.
5. Постановление Правительства РФ от 21 августа 2020 г. № 1265 «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета открытому акционерному обществу «Российские железные дороги» на возмещение недополученных доходов, возникающих в результате установления льготных тарифов на транзитные перевозки по территории Российской Федерации железнодорожным транспортом общего пользования грузов в контейнерах». — URL: <https://www.zakonrf.info/postanovlenie-pravitelstvo-rf-1265-21082020/> (дата обращения: 07.11.2022).
6. Приказ Федеральной антимонопольной службы от 26 мая 2022 г. № 408/22 «О внесении изменений в приказ ФАС России от 10 декабря 2015 г. № 1226/15 и о неприменении отдельных коэффициентов на экспортные перевозки угля каменного, установленных постановлением ФЭЖ России от 17 июня 2003 г. № 47-т/5». — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202205310010> (дата обращения: 07.11.2022).

7. Распоряжение Правительства РФ от 27 мая 2022 г. № 1328-р «О внесении изменений в распоряжение Правительства РФ от 29 декабря 2017 г. № 2991-р». — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202205280027> (дата обращения: 07.11.2022).
8. Гулый И. М. Подход к экономической оценке инвестиционных проектов развития железнодорожной инфраструктуры / И. М. Гулый // Транспорт Российской Федерации. — 2021. — № 1-2(92-93). — С. 12–14.
9. Гулый И. М. Цифровые технологии искусственного интеллекта в деятельности Российского железнодорожного транспорта / И. М. Гулый // Транспортное дело России. — 2021. — № 1. — С. 121–123.
10. Генеральная схема развития сети транспортно-логистических центров (в рамках федерального проекта «Транспортно-логистические центры» Транспортной части комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 г.). — URL: <http://mintrans.org/ftpgetfile.php?id=10> (дата обращения: 07.11.2022).
11. Журавлева Н. А. Методология исследования цифровой трансформации в условиях дестабилизации бизнес-моделей транспортных организаций / Н. А. Журавлева // Методология развития экономики, промышленности и сферы услуг в условиях цифровизации. — СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018. — С. 10–47. — DOI: 10.18720/IEP/2018.6/1.
12. Волыхина Н. В. Концепция «Mobility-as-a-service» в период цифровой трансформации транспортных систем / Н. В. Волыхина // III Бетанкуровский международный инженерный форум. — 2021. — С. 89–92.
13. Сетевое издание «Вгудок». — URL: <https://vgudok.com/rassledovaniya/rossiya-vs-mir-mirovoy-konteynernyy-rynok-skatyvaetsya-k-recessii-rossiyskiy-mozhet> (дата обращения: 07.01.2023).
14. Данные аналитического портала ERAI. — URL: <https://index1520.com/analytics/novye-transportnye-koridory/> (дата обращения: 07.01.2023).
15. Данные форума по устойчивому транспортному сообщению между Азией и Европой (5–6 октября 2021 г.). — URL: https://icctt.com/f/forum_po_ustojchivoj_transportnoj_svyaznosti_eskato_broshyura.pdf (дата обращения: 07.06.2022).
16. Гулый И. М. Методология оценки влияния цифровых платформ взаимодействия участников мультимодальных перевозок грузов на параметры международных транспортных коридоров / И. М. Гулый // Транспортное дело России. — 2021. — № 6. — С. 167–169. — DOI: 10.52375/20728689_2021_6_167.

Дата поступления: 28.01.2023

Решение о публикации: 28.02.2023

Контактная информация:

ЧЕЧЕНОВА Лиана Мухамедовна — канд. экон. наук, доц.; liana1981-149@mail.ru

Cargo Transportation Aspect in the Borders of Countries of 1520 Area

L. M. Chechenova

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Batalova N. V., Chechenova L. M. Cargo Transportation Aspect in the Borders of Countries of 1520 Area. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 133–146. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-133-146

Summary

Purpose: To assess the importance of multimodal cargo transportation for the economy of 1520 area countries. This study confirms the need to expand the capabilities of railway infrastructure despite the consequences of sanctions restrictions, international political situation uncertainty and trans-Eurasian container transportation imbalance with the purpose to achieve economic growth of the national economies of 1520 area countries.

Methods: There were used analytics and diagnostics methods for the data (observation, analysis, synthesis) of regulatory and legal provisions governing relations within the framework of freight transportation by railway network as well as reports of leading railway companies of 1520 area countries — JSC “Russian Railways”, JSC “NC “Kazakhstan Temir Zholy”, Belarussian Railways and others, Russian and foreign forwarding companies, carrier operators, data from Russian Federation Federal Customs Service and foreign customs authorities, statistical and analytical informational databases. **Results:** The characteristics for main railway systems of 1520 area leading countries are given with specification of the number of international and domestic container and container-piggyback routes. The factors influencing the development of freight transportations on Russia territory along 1520 track have been identified, the prospects for cargo transportation have been assessed in view of Russia transport and logistics market current state. **Practical significance:** The obtained results have applied character since they offer and justify measure series to ensure effective development of multimodal transportations given existing infrastructure limitations.

Keywords: The “1520 area”, rail transport, multimodal transportation.

References

1. *Analiticheskiy obzor investitsionnoy kompanii “RZhD-Invest”* [Analytical review of the investment company “RZD-Invest”]. Available at: [https:// rzd-invest.ru /](https://rzd-invest.ru/) (accessed: November 07, 2022). (In Russian)

2. *Osobyie usloviya mezhdunarodnykh perezovozok (SCIC) po proezdnyim dokumentam v soobshchenii Vostok — Zapad (EWT)* [Special conditions of international Transportation (SCIC) for travel documents in the East — West (EWT) message]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=805> (accessed: November 07, 2022). (In Russian)

3. *Soglashenie o mezhdunarodnom zheleznodorozhnom gruzovom soobshchenii (SMGS) i Sluzhebnyaya instruktsiya k SMGS (s izmeneniyami i dopolneniyami po sostoyaniyu na I iyunya 2022 g.)* [Agreement on International Railway Freight Traffic (SMGS) and Service Instructions to SMGS (with amendments and additions as of June 1, 2022)]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=1816> (accessed: November 07, 2022). (In Russian)

4. Zhuravleva N. A. Vliyanie postpandemiynoy ekonomiki na biznes-model' transportnykh organizatsiy [The influence of the post-pandemic economy on the business model of transport organizations]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2020, Iss. 3-4 (88-89), pp. 20–23. (In Russian)

5. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 21 avgusta 2020 g. № 1265 "Ob utverzhdenii Pravil predostavleniya subsidiy iz federal'nogo byudzheta otkrytomu aktsionernomu obshchestvu "Rossiyskie zheleznye dorogi" na vozmeshchenie nedopoluchennykh dokhodov, vznikayushchikh v rezul'tate ustanovleniya l'gotnykh tarifov na tranzitnye perevozki po territorii Rossiyskoy Federatsii zheleznodorozhnym transportom obshchego pol'zovaniya gruzov v konteynerakh"* [Decree of the Government of the Russian Federation of August 21, 2020 № 1265 "On Approval of the Rules for Providing Subsidies from the Federal Budget to the Open Joint-Stock Company Russian Railways for Compensation of Lost Revenues Arising from the Establishment of Reduced Tariffs for Transit Transportation Through the Territory of the Russian Federation by Rail general use of cargo in containers"]. Available at: <https://www.zakonrf.info/postanovlenie-pravitelstvo-rf-1265-21082020/> (accessed: November 07, 2022). (In Russian)

6. *Prikaz Federal'noy antimonopol'noy sluzhby ot 26 maya 2022 g. № 408/22 "O vnesenii izmeneniy v prikaz FAS Rossii ot 10 dekabrya 2015 g. № 1226/15 i o neprimenenii otel'nykh koeffitsientov na eksportnye perevozki uglya kamennogo, ustanovlennykh postanovleniem FEK Rossii ot 17 iyunya 2003 g. № 47-t/5"* [Order of the Federal Antimonopoly Service № 408/22 dated May 26, 2022 "On Amendments to Order № 1226/15 of the Federal Antimonopoly Service of Russia dated December 10, 2015 and on the non-application of certain coefficients for the export transportation of hard coal established by the Decree of the FEC of Russia dated December 10, 2015 June 17, 2003 № 7-t/5"]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202205310010> (accessed: November 07, 2022). (In Russian)

7. *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 27 maya 2022 g. № 1328-r "O vnesenii izmeneniy v rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 29 dekabrya 2017 g. № 2991-r"* [Order of the Government of the Russian Federation dated May 27, 2022 № 1328-r "On Amendments to the Order of the Government of the Russian Federation dated December 29, 2017 № 2991-r"]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202205280027> (accessed: November 07, 2022). (In Russian)

8. Gulyi I. M. Podkhod k ekonomicheskoy otsenke investitsionnykh proektov razvitiya zheleznodorozhnoy infrastruktury [Approach to the economic assessment of investment projects for the development of railway infrastructure]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2021, Iss. 1-2(92-93), pp. 12–14. (In Russian)

9. Gulyi I. M. Tsifrovye tekhnologii iskusstvennogo intellekta v deyatel'nosti Rossiyskogo zheleznodorozhnogo transporta [Digital technologies of artificial intelligence in the activity of Russian railway transport]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2021, Iss. 1, pp. 121–123. (In Russian)

10. *General'naya skhema razvitiya seti transportno-logisticheskikh tsentrov (v ramkakh federal'nogo proekta "Transportno-logisticheskie tsentry" Transportnoy chasti kompleksnogo plana modernizatsii i rasshireniya magistral'noy infrastruktury na period do 2024 g.)* [General scheme of

development of the network of transport and logistics centers (within the framework of the federal project “Transport and logistics centers” of the Transport part of the comprehensive plan for modernization and expansion of the backbone infrastructure for the period up to 2024)]. Available at: <http://mintrans.org/ftpgetfile.php?id=10> (accessed: November 07, 2022). (In Russian)

11. Zhuravleva N. A. Metodologiya issledovaniya tsifrovoy transformatsii v usloviyakh destabilizatsii biznes-modeley transportnykh organizatsiy [Methodology of digital transformation research in the conditions of destabilization of business models of transport organizations]. *Metodologiya razvitiya ekonomiki, promyshlennosti i sfery uslug v usloviyakh tsifrovizatsii* [Methodology of economic, industrial and service sector development in the context of digitalization]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskiy universitet Petra Velikogo Publ., 2018, pp. 10–47. DOI: 10.18720/IEP/2018.6/1. (In Russian)

12. Volykhina N. V. Kontsepsiya “Mobility-as-a-service” v period tsifrovoy transformatsii transportnykh system. III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum [The concept of “Mobility-as-a-service” in the period of digital transformation of transport systems. III Betancourt International Engineering Forum]. 2021, pp. 89–92. (In Russian)

13. *Setevoe izdanie “Vgudok”* [Network publication “Vgudok”]. Available at: https://icctt.com/f/forum_po_ustojchivoj_transportnoj_svyaznosti_eskato_broshyura.pdf (accessed: January 07, 2023). (In Russian)

14. *Dannye analiticheskogo portala ERAI* [Data from the analytical portal ERAI]. Available at: <https://index1520.com/analytics/novye-transportnye-koridory/> (accessed: January 07, 2023). (In Russian)

15. *Dannye foruma po ustoychivomu transportnomu soobshcheniyu mezhdue Azii i Evropoy (5–6 oktyabrya 2021 g.)* [Forum data on sustainable transport links between Asia and Europe (October 5–6, 2021)]. Available at: https://icctt.com/f/forum_po_ustojchivoj_transportnoj_svyaznosti_eskato_broshyura.pdf (accessed: June 07, 2022). (In Russian)

16. Gulyy I. M. Metodologiya otsenki vliyaniya tsifrovyykh platform vzaimodeystviya uchastnikov mul'timodal'nykh perevozok gruzov na parametry mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [Methodology for assessing the impact of digital platforms for the interaction of participants in multimodal transportation of goods on the parameters of international transport corridors]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2021, Iss. 6, pp. 167–169. DOI: 10.52375/20728689_2021_6_167. (In Russian)

Received: January 28, 2023

Accepted: February 28, 2023

Author’s information:

Liana M. CHECHENOVA — PhD in Economics, Associate Professor; liana1981-149@mail.ru

УДК 629.4.017: 625.03

Сравнение требований стандартов разных стран к оценке динамических качеств и воздействия на путь грузовых вагонов

А. В. Саидова¹, А. В. Гусев², Е. А. Рудакова²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²ООО «Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий», Российская Федерация, 197046, Санкт-Петербург, Петроградская набережная, 22а

Для цитирования: Саидова А. В., Гусев А. В., Рудакова Е. А. Сравнение требований стандартов разных стран к оценке динамических качеств и воздействия на путь грузовых вагонов // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 147–160. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-147-160

Аннотация

Цель: Произвести анализ и сравнить требования действующих государственных стандартов России, стран Европы и Северной Америки к оценке динамических качеств грузовых вагонов, их воздействия на рельсовый путь. **Методы:** Обзор и анализ требований разных стран к условиям проведения испытаний грузовых вагонов на динамические качества и их воздействие на путь, требований к допускаемым значениям показателей позволил сформировать наиболее представительные расчетные случаи для моделирования движения железнодорожного экипажа по пути различной конструкции (прямые, криволинейные участки) и провести исследование динамики грузового вагона с помощью имитационного компьютерного моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм». **Результаты:** Проведено сравнение требований разных стран к оценке динамического поведения грузовых вагонов. Методами компьютерного моделирования получены осциллограммы различных показателей (сил, ускорений, коэффициентов) для универсального полувагона, установленного на тележки модели 18-100 при его движении по пути различной конструкции. Показаны преимущества и недостатки применяемых подходов к оценке динамических качеств, показателей воздействия экипажа на путь в разных странах. **Практическая значимость:** Полученные результаты работы, а также представленные в заключении предложения в дальнейшем могут быть использованы для совершенствования системы оценки динамического поведения железнодорожного экипажа и его воздействия на путь в целях повышения безопасности движения грузовых вагонов в России.

Ключевые слова: Грузовой вагон, полувагон, моделирование движения вагона, динамические качества, воздействие на путь, устойчивость колеса от схода с рельсов.

Введение

Безопасность движения грузового вагона в процессе эксплуатации зависит от многих факторов, одним из которых является качество хода экипажа. Оно оценивается на этапе проектирования новой конструкции единицы подвижного состава или модернизации существующей и определяется характеристиками самого экипажа, параметрами рельсового пути и условиями эксплуатации.

В комплексе с оценкой ходовых (динамических) качеств экипажа обычно проводят исследование его воздействия на железнодорожный путь с целью предупреждения возникновения повышенных нагрузок на путь, приводящих к его деградации.

Оценка показателей динамических качеств и воздействия грузовых вагонов на путь по результатам натурных испытаний, компьютерного моделирования в специальных программных комплексах, теоретических расчетов в разных странах ведется по существенно отличающимся критериям, устанавливаемым государственными стандартами и нормативными документами. Отличия обусловлены историческим развитием науки в области железнодорожного движения, особенностями конструкций подвижного состава и железнодорожного пути, а также условиями эксплуатации экипажей.

Целью данного исследования является анализ и сравнение методик оценки динамических качеств и воздействия грузовых вагонов на путь, действующих в России, Северной Америке и в европейских странах. Для количественного сравнения показателей динамических качеств и воздействия на путь методами компьютерного моделирования исследовалось движение четырехосного грузового вагона в представительных режимах по пути различной конструкции. В качестве базового экипажа принят универсальный полувагон на тележках 18-100, модель которого разработана в программном комплексе «Универсальный механизм» [1–4] (рис. 1).

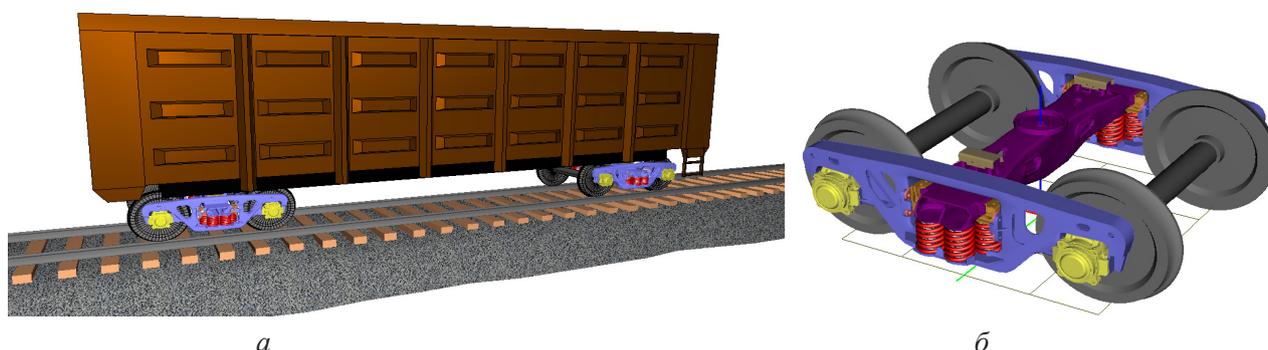


Рис. 1. Модель универсального полувагона (а) и тележки 18-100 (б) в программном комплексе «Универсальный механизм»

Методика оценки динамических качеств и воздействия на путь грузовых вагонов в России

Требования к динамическим качествам и воздействию грузовых вагонов на путь в РФ устанавливаются стандартами [5–7]. При определении показателей рассматривают движение порожнего и груженого до максимальной грузоподъемности вагона по прямолинейному участку пути и в кривых различного радиуса (от 300 м до 800 м) со скоростями вплоть до конструкционной, увеличенной на 10 %, или до скорости, обеспечивающей непогашенное ускорение в кривой не более $0,7 \text{ м/с}^2$. В стрелочном переводе на боковой путь движение экипажа осуществляется со скоростями от 10 км/ч до 40 км/ч с шагом 10 км/ч. Исследование динамических качеств и воздействия на путь ведется при движении экипажа на пути с рельсовыми неровностями, не превышающими допустимые величины отступлений (табл. 7 [5]). При моделировании рекомендуется использовать неровности согласно [8], однако могут использоваться и в соответствии с РД 32.68 [9], отмасштабированные таким образом, чтобы ширина колеи, уровень и просадки рельсовых нитей не превышали II степень отступления от номинальных значений.

В РФ оценка динамических качеств и воздействия на путь ведется по показателям, представленным на рис. 2, 3 (в числителе указаны значения для вагона с минимальной расчетной массой, в знаменателе — с максимальной). Помимо указанных на рис. 3 основных показателей ГОСТ 34759 [7] содержит методику установления допустимых скоростей движения железнодорожного подвижного состава, включающую в себя расчет дополнительных показателей (например, расчетные значения осевых напряжений в подошве рельса от его изгиба, Приложение Б [7]).



Рис. 2. Показатели динамических качеств вагона и их допускаемые значения в РФ (в числителе для вагона с минимальной расчетной массой, в знаменателе — с максимальной)



Рис. 3. Показатели воздействия на путь, их допускаемые значения в РФ

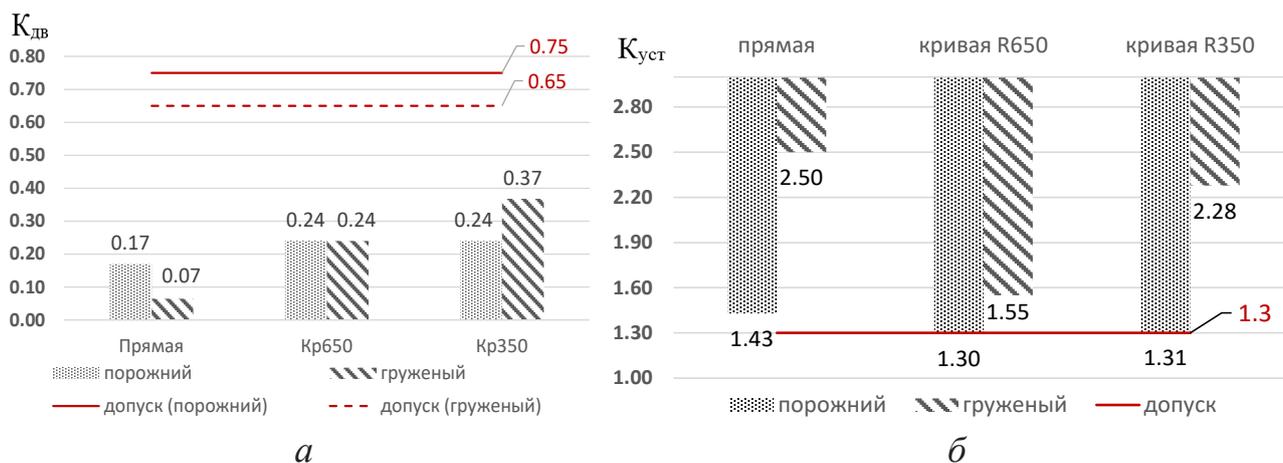


Рис. 4. Показатели динамических качеств порожнего и груженого полувагона при скорости движения 90 км/ч:
 а) коэффициент динамической добавки обрессоренных частей;
 б) коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельса

Примеры результатов расчета некоторых показателей динамических качеств грузового вагона, полученные с помощью базовой модели экипажа на тележках 18-100 в «Универсальном механизме», представлены на рис. 4. Красными линиями отмечены допускаемые стандартами значения показателей.

Методика оценки динамических качеств и воздействия грузовых вагонов на путь в Америке

Показатели динамических качеств в Северной Америке носят название «эксплуатационные критерии». В соответствии со стандартами [10, 11] их определяют в восьми основных режимах движения вагона:

hunting — виляние в прямой и кривых большого радиуса (1° и 2°);

constant curving — устойчивость в кривых (от 3° до 12°);

curve resistance — сопротивление повороту в кривых (от 3° до 12°);

spiral — движение по переходному участку пути;

twist and roll — скручивание и боковой наклон в прямом участке пути;

pitch and bounce — галопирование и раскачивание в прямом участке пути;

yaw and sway — виляние и боковой относ кузова в прямом участке пути;

dynamic curving — динамическое прохождение кривой (радиус 12°).

Для каждого режима установлен свой перечень нормируемых показателей (рис. 5), скоростные диапазоны движения вагона (выбор скоростей движения в криволинейных участках пути осуществляется исходя из условия обеспечения дисбаланса от -3 до $+3$ дюймов), определены условия загрузки вагона (порожний и груженный режимы), конструкция и неровности пути. При движении вагона в криволинейных участках дисбаланс U вычисляется по формуле:



Рис. 5. Показатели динамических качеств и их допускаемые значения в Северной Америке

$$U = V^2 \cdot (R/S) - H, \quad (1)$$

где V — скорость движения, м/с²;

R — радиус кривой, м;

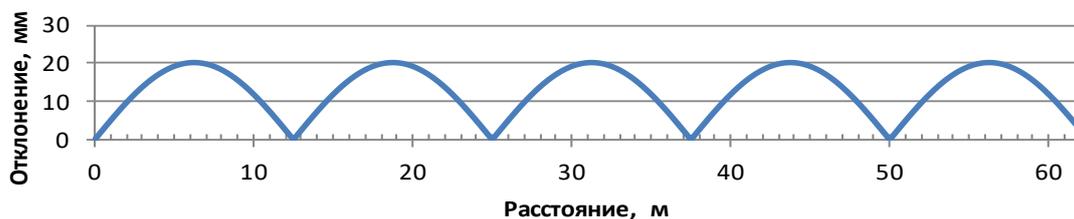
S — ширина колеи, м;

H — возвышение наружного рельса в кривой, м.

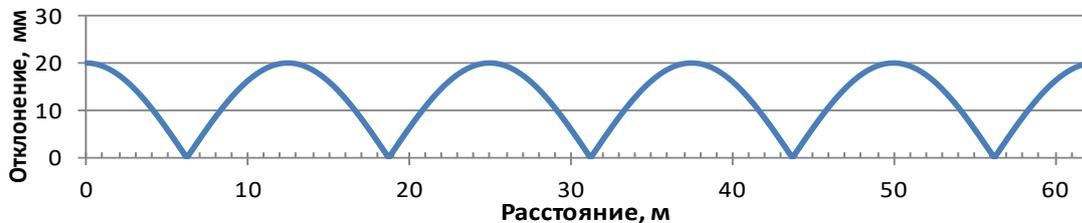
Движение вагона рекомендуется оценивать на пути с унифицированными неровностями рельсовых нитей (примеры представлены на рис. 6) и с натурными, полученными по результатам обмера отклонений рельсовых нитей на полигонах специальными путеизмерительными средствами.

Особенность требований стандартов [10, 11] заключается в полноценной все-сторонней оценке динамических качеств грузового экипажа, в том числе в режимах, обуславливающих отдельные формы колебаний вагона, и в эксплуатационных условиях.

Оценка воздействия экипажа на путь отдельно не рассматривается, а ведется косвенно по показателям взаимодействия колес с рельсами (через вертикальные и поперечные силы в пятнах контакта, на колесо, на оси и для одной стороны тележки). Примеры результатов расчета отношения поперечных и вертикальных сил, характеризующих воздействие базового экипажа на путь по требованиям стандартов Северной Америки в кривых, показаны на рис 7.



а



б

Рис. 6. Унифицированные вертикальные неровности рельсовых нитей в режиме «Скручивание и боковой наклон» для определения динамических качеств в Северной Америке:

а) для левого рельса; *б)* для правого рельса

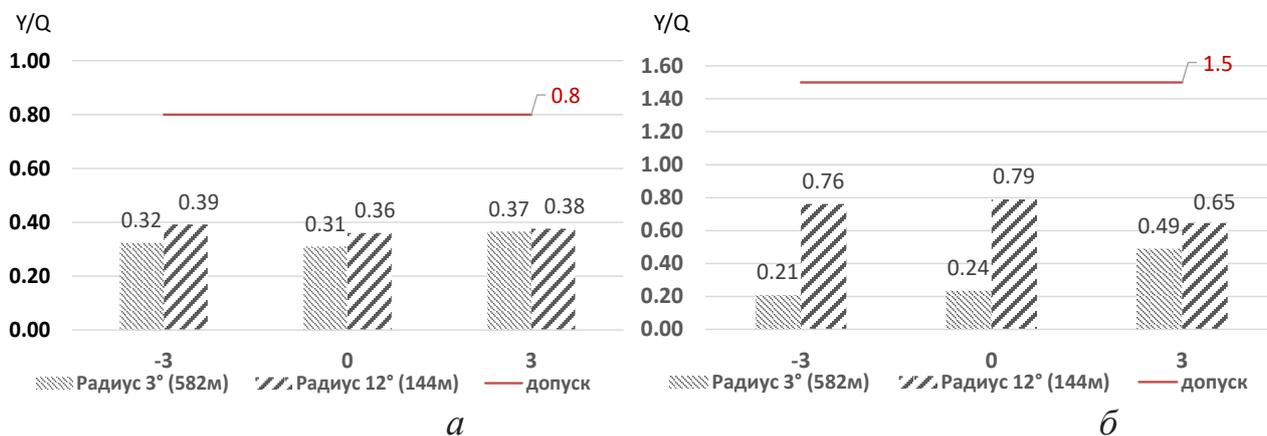


Рис. 7. Результаты расчета отношения поперечных (Y) и вертикальных (Q) сил для груженого вагона согласно требованиям стандартов Северной Америки:
а) на колесе; *б)* на оси

Методика оценки динамических качеств и воздействия грузовых вагонов на путь в странах Европы

В европейских странах согласно описанным в [12, 13] методикам динамические качества грузовых экипажей оценивают при их движении по прямым участкам пути, в односторонних кривых радиусами от 250 м и в S -образных кривых со скоростями вплоть до конструкционной, увеличенной в 1,1 раза. Стандарт [12] предусматривает два способа оценки показателей — обычный и упрощенный. В любом из этих случаев обязательно измеряются силы взаимодействия колеса и рельса в поперечном и вертикальном направлениях, боковые силы, измеренные на уровне буксовых узлов, и ускорения кузова вагона. Стандартом [13] дополнительно рекомендовано проводить проверку безопасности движения вагона против схода с рельсов при наиболее критичных условиях (например, при радиусе кривой 150 м).

В табл. 1, 2 приведены показатели динамических качеств (ride characteristics), безопасности движения (running safety) и их допускаемые значения в соответствии с требованиями стандартов [12, 13].

По аналогии с применяемым в Северной Америке подходом воздействие грузового экипажа на путь в странах Европы отдельно не исследуют. В рамках динамических испытаний оценивают величины горизонтальных (поперечных) и вертикальных сил, возникающих в контакте колес с рельсами, и их отношения. Для примера возможными к оценке показателями (track loading) являются квазистатические направляющие (поперечные и вертикальные) силы от колеса на рельс (допускаемые значения составляют 60 кН и 155 кН соответственно).

ТАБЛИЦА 1. Показатели динамических качеств в странах Европы

Показатель	Допускаемое значение
Боковая нагрузка на буксу, кН	$k_{п/гр} \cdot 0,8 \cdot (10 + P_{F0} / 3)$, где $k_{п} = 0,80$ для порожнего вагона; $k_{гр} = 0,75$ для груженого вагона; P_{F0} — максимальная статическая осевая нагрузка, кН
Боковое ускорение на раме тележки над буксой, m/c^2	$12 - (m / (5 \cdot t))$, где m — номер тележки
Боковое ускорение на кузове вагона над ходовой частью, m/c^2	3
Вертикальное ускорение на кузове вагона над ходовой частью, m/c^2	5

Таблица 2. Показатели безопасности движения в странах Европы

Показатель	Допускаемое значение
Сумма направляющих сил левого и правого колеса, кН	$0,85 \cdot (10 + P_{F0} / 3)$
Коэффициент схода с рельсов (критерий Надаля — отношение поперечной силы, действующей от колеса на рельс, к вертикальной)	не более 1,2
Угол набегания ведущей колесной пары, рад	0,017
Высота поднятия испытуемого колеса ведущей колесной пары, мм	не более 5

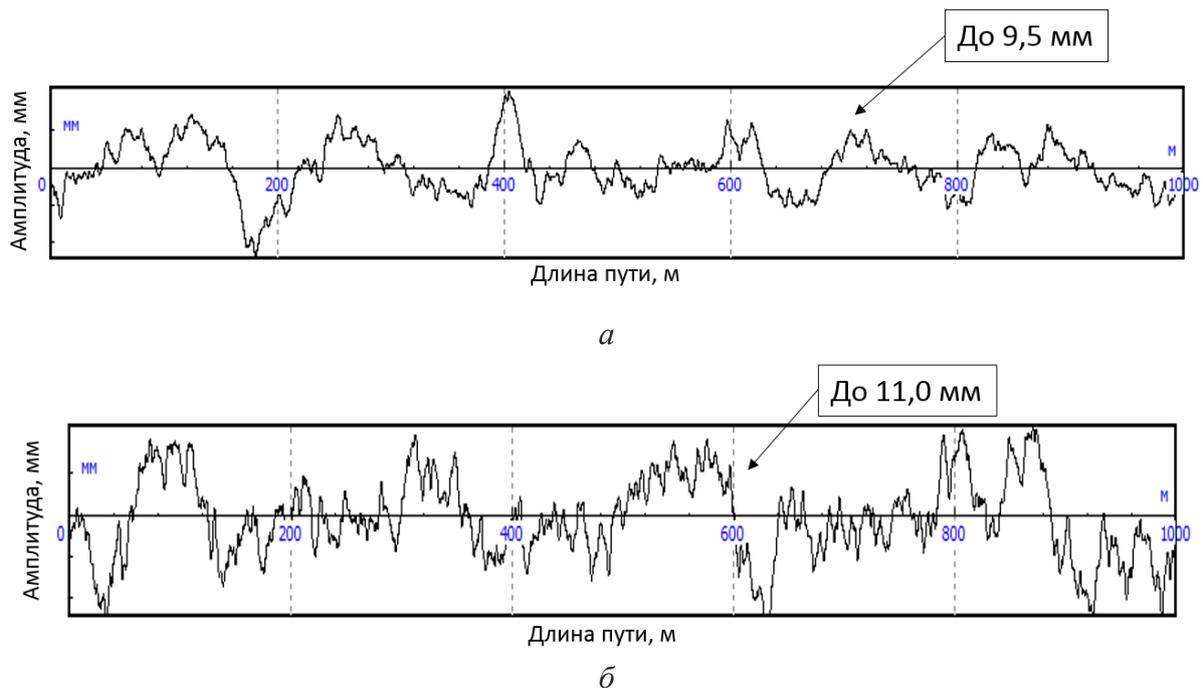


Рис. 8. Горизонтальные (а) и вертикальные (б) неровности рельсовых нитей для определения динамических качеств в Европе, соответствующие «хорошему» состоянию пути

Рекомендуемые к использованию неровности рельсовых нитей условно делят на соответствующие «хорошему» и «плохому» состоянию пути. На рис. 8 представлены горизонтальные и вертикальные отклонения рельсовых нитей для «хорошего» состояния пути.

Пример результатов расчета критерия Надаля [14] — показателя устойчивости колеса от схода с рельса (отношение поперечных и вертикальных сил между колесом и рельсом) по требованиям стандартов Европы при движении базового экипажа со скоростью 90 км/ч показан на рис. 9.

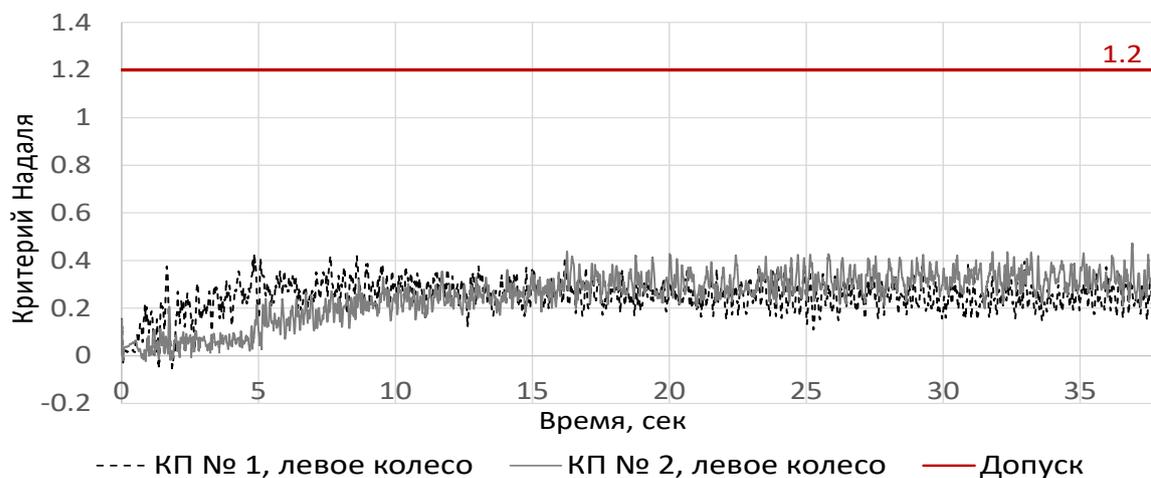


Рис. 9. Результаты расчета коэффициента устойчивости от схода колеса с рельса по требованиям европейских стандартов

Сравнение требований к оценке динамического поведения экипажа

В табл. 3 представлено комплексное сравнение требований стандартов разных стран к оценке показателей динамических качеств грузовых вагонов и их воздействия на путь.

Помимо отличия показателей между собой, их допустимых значений, для разных стран существует разница в подходе к обработке получаемых результатов. Так, в стандартах Европы и Северной Америки максимальные значения большинства показателей получают с вероятностью 95 %, в России — 99,85 % (минимальное значение коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельса — с вероятностью 0,15 %), причем при обработке временных зависимостей рамных сил, коэффициентов динамической добавки и ускорений учитывают частоты от 0 до 20 Гц. Кроме того, в РФ существует разделение качества хода грузового вагона на «допустимое» (предельно допускаемые значения показателей), «удовлетворительное», «хорошее» и «отличное».

Анализ требований к оценке взаимодействия грузовых железнодорожных экипажей с рельсовым путем позволил установить, что:

ТАБЛИЦА 3. Сравнение параметров, характеризующих взаимодействие экипажа и пути

Параметр	Описание параметра в соответствии со стандартами		
	России	Европы	Северной Америки
Максимальная скорость движения, км/ч	Конструкционная + 10 %		Конструкционная / скорости, обеспечивающие дисбаланс (от -3 до +3 дюймов)
Тип участка пути	прямая; кривые среднего радиуса (300–400 м и 600–800 м); стрелочный перевод на боковой путь	прямая; S-образные кривые; кривая большого радиуса (более 1000 м); кривая малого радиуса (400–600 м); кривая очень малого радиуса (250–400 м)	прямая; кривые (с возвышением наружного рельса от 1 до 12 дюймов); переходный участок (спиралевидный)
Неровности пути	Соответствуют натурным, принимаются согласно [8]	Соответствуют натурным, делятся на «хороший»/«плохой» путь (максимальное отклонение рельсовой нити до 11 мм/16 мм)	Соответствуют натурным/специальные, обеспечивающие определенную форму колебаний элементов экипажа (скручивание, боковая качка, галопирование и т. д.)
Оцениваемые показатели	Динамические качества: рамные силы; ускорения обрессоренных частей; коэффициенты динамической добавки обрессоренных/необрессоренных частей; коэффициенты запаса устойчивости от схода колеса с рельса, от выжидания и опрокидывания в кривых. Воздействие на путь: динамические напряжения в элементах пути; динамическая погонная нагрузка от тележки на путь; боковые и вертикальные силы от колес на рельс/на шпалу; рамные силы; коэффициент устойчивости рельсошпальной решетки от поперечного сдвига по балласту	Динамические качества: суммы направляющих сил левого и правого колес; коэффициенты от схода колес с рельсов; углы набегания ведущих колесных пар; высоты поднятия колес; боковые нагрузки на буксу; ускорения обрессоренных/необрессоренных частей. Воздействие на путь: вертикальные и боковые силы в контакте колес с рельсами	Динамические качества: боковые/вертикальные ускорения кузова; отношения боковых и вертикальных сил на колесе/оси/стороне тележки; минимальные вертикальные нагрузки на колеса; сжатия рессорных комплектов. Воздействие на путь: вертикальные и боковые силы в контакте колес с рельсами

1. Оценка безопасности эксплуатации грузового железнодорожного подвижного состава, его качество хода, воздействие на путь в России, странах Европы и в Северной Америке ведется по существенно отличающимся показателям.

2. Требования стандартов Северной Америки позволяют наиболее полно оценивать динамическое поведение экипажа и включают режимы, обуславливающие отдельные виды колебаний элементов конструкции, и полноценные режимы, соответствующие реальным условиям эксплуатации.

3. Оценка воздействия экипажа на путь выделена в отдельный вид исследований (и испытаний) только в России. Представляет собой расчет комплекса показателей (динамических напряжений в конструкции пути, погонной нагрузки, коэффициента устойчивости рельсошпальной решетки от поперечного сдвига по балласту и т. д.) на основании результатов моделирования движения экипажа по пути (по значениям вертикальных, поперечных сил в контакте колес с рельсами, коэффициентов динамической добавки обрессоренных частей, рамных сил). Существующие методики оценки воздействия на путь требуют унификации [15, 16].

4. В странах Европы и в Северной Америке оценка воздействия на путь ведется косвенно по показателям взаимодействия колес с рельсами (через вертикальные и поперечные силы в пятнах контакта, углы набегания колесных пар и т. д.).

Заключение

Сравнение методов оценки безопасности движения железнодорожного подвижного состава в РФ, Северной Америке и Европе позволило установить, что подходы к определению взаимодействия экипажа и пути, приведенные в регулирующих документах этих стран, отличаются. По результатам сравнительного анализа показателей безопасности движения, а также методов их определения разработаны рекомендации для усовершенствования системы оценки качества хода грузового экипажа в РФ и его воздействие на путь за счет:

– введения дополнительных режимов со специально подобранными неровностями рельсового пути, обуславливающих отдельные виды колебаний элементов конструкции (скручивание, боковой наклон и т. д.), которые могут использоваться на начальном этапе проектирования новых конструкций для подтверждения безопасности движения;

– перехода от многопараметризованной оценки воздействия экипажа на путь к оценке вертикальных и горизонтальных сил взаимодействия колес с рельсами.

Библиографический список

1. Бороненко Ю. П. Особенности динамики вагона-цистерны с жидким грузом / Ю. П. Бороненко, Ю. Б. Житков // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС. — 2017. — Т. 14. — № 4. — С. 597–604.

2. Гончаров С. Е. Сравнительная оценка воздействия на путь и сопротивления движению инновационных вагонов и вагонов устаревших конструкций методами компьютерного

моделирования / С. Е. Гончаров, Д. Ю. Погорелов, В. А. Симонов // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2019. — № 1. — С. 36–45.

3. Саидова А. В. Современные методы моделирования динамики подвижного состава: электронное учебное пособие / А. В. Саидова, Ю. Б. Житков. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022. — 52 с.

4. Черкашин Ю. М. Влияние параметров экипажей и пути на безопасность движения поездов / Ю. М. Черкашин, Д. Ю. Погорелов, В. А. Симонов // Вестник ВНИИЖТ. — 2010. — № 2. — С. 3–9.

5. ГОСТ 33211—2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. — М.: Стандартинформ, 2014.

6. ГОСТ 33788—2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. — М.: Стандартинформ, 2016.

7. ГОСТ 34759—2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. — М.: Стандартинформ, 2022.

8. ПНСТ 511—2020. Вагоны грузовые. Расчетные неровности железнодорожного пути для оценки показателей динамических качеств грузовых вагонов расчетными методами. — М.: Стандартинформ, 2021.

9. РД 32.68—96. Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях и проектировании пассажирских и грузовых вагонов. — М.: МПС, 1996.

10. Specification M-976. Truck Performance for Rail Cars (Last Revised: 2019).

11. Specification M-1001. Design, Fabrication, and construction of freight cars (Last Revised: 2019).

12. UIC Code 518. Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour — Safety — Track fatigue — Running behaviour, 4th edition, 2009.

13. DIN EN 14363:2016. European Standard Railway applications — Testing and Simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles — Testing of running behavior and stationary tests.

14. Блохин Е. П. Графическое представление критерия Надаля / Е. П. Блохин, М. Л. Коротенко, И. В. Клименко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. — 2010. — № 35. — С. 7–9.

15. Антонов А. Ю. О внесении изменений в расчетные формулы методики оценки воздействия подвижного состава на путь по условию обеспечения его надежности / А. Ю. Антонов, И. И. Иванов // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2019 — Т. 16. — Вып. 1. — С. 31–36.

16. Орлова А. М. К вопросу об установлении допускаемых скоростей движения железнодорожных экипажей на сети дорог РФ / А. М. Орлова, А. В. Саидова, Е. А. Рудакова и др. // Вестник ИПЕМ: Техника железных дорог. — 2019. — Вып. 3(47). — С. 52–60.

Дата поступления: 09.02.2023

Решение о публикации: 28.02.2023

Контактная информация:

САИДОВА Алина Викторовна — канд. техн. наук; av-saidova@yandex.ru

ГУСЕВ Артем Владимирович — канд. техн. наук; agusev@tt-center.ru

РУДАКОВА Екатерина Александровна — канд. техн. наук; erudakova@tt-center.ru

Comparison of Requirements for Standards of Different Countries to Assessment of Freight Car Dynamic Qualities and Impact on Track

A. V. Saidova¹, A. V. Gusev², E. A. Rudakova²

¹ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²All-Union Research and Development Centre for Transport Technologies, LLC, 22, Liter A, Petrogradskaya Naberezhnaya, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

For citation: Saidova A. V., Gusev A. V., Rudakova E. A. Comparison of Requirements for Standards of Different Countries to Assessment of Freight Car Dynamic Qualities and Impact on Track. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 147–160. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-147-160

Summary

Purpose: To analyze and compare the requirements of State Standards of Russia, countries of Europe and North America to assessment of dynamic qualities of freight cars, their impact on railway track. **Methods:** Review and analysis of requirements of various countries to conditions to pursue testing of freight cars on dynamic qualities and their impact on a track, requirements to indicator permissible values made it possible to form the most representative calculated cases for simulation of railway crew motion along various construction tracks (straight, curve sections) and to pursue the study of freight car dynamics with the help of computer simulation modelling in program complex “Universal Mechanism”. **Results:** The comparison of various country’s requirements to the assessment of freight car dynamic behavior is made. Using computer simulation methods, oscillograms of various indicators (forces, accelerations, coefficients) for universal gondola car, installed on bogies of 18-100 model, at its motion along various construction tracks were obtained. The advantages and flaws of used approaches to assess dynamic qualities, indicators of crew impact on various country’s track are shown. **Practical significance:** The work obtained results can be used to improve the system of railway crew dynamic behavior assessment and its impact on a track with the purpose to improve the safety of freight car motion in Russia.

Keywords: Freight car, gondola car, car motion simulation, dynamic qualities, impact on track, wheel derailment resistance.

References

1. Boronenko Yu. P., Zhitkov Yu. B. Osobennosti dinamiki vagona-tcisternyi s zhidkim gruzom [The specificities of dynamics of a tank car with liquid consignment]. *Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2017, vol. 14, Iss. 4, pp. 597–604. (In Russian)
2. Goncharov S. E., Pogorelov D. Yu., Simonov V. A. Sravnitel’naya otsenka vozdeistviya na put’ i soprotivleniya dvizheniyu innovatcionnikh vagonov i vagonov ustarevshih konstruktcii metodami komp’yuternogo modelirovaniya [Comparative assessment of the impact on the track and resistance to movement of innovative cars and cars of obsolete designs using computer simulation methods]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University], 2019, Iss. 1, pp. 36–45. (In Russian)
3. Saidova A. V., Zhitkov Yu. B. *Sovremennye metody modelirovaniya. Dinamiki podvizhnogo sostava: elektronnoe uchebnoe posobie* [Modern methods for modeling the dynamics of rolling stock: electronic textbook]. PGUPS [Petersburg State Transport University]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2022, 52 p. (In Russian)
4. Cherkashin Yu. M., Pogorelov D. Yu., Simonov V. A. Vliyanie parametrov ekipazheyi i puti na bezopasnost’ dvizheniya poezdov [Influence of vehicle and track parameters on train traffic safety]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik VNIIZHT]. 2010, Iss. 2, pp. 3–9. (In Russian)

5. GOST 33211—2014. *Vagonyi gruzoviye. Trebovaniya k prochnosti I dinamicheskim kachestvam* [GOST 33211—2014. Freight wagons. Requirements for strength and dynamic qualities]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian)
6. GOST 33788—2016. *Vagonyi gruzoviye I passazhirskie. Metodyi ispyitaniyi na prochnost' i dinamicheske kachestva* [GOST 33788—2016. Freight and passenger cars. Test methods for strength and dynamic qualities]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. (In Russian)
7. GOST 34759—2020. *Zheleznodorozhnyi podvizhnoi sostav. Normyi dopustimogo vozdeystviya na zheleznodorozhnyy put' I metodyi ispyitaniyi* [GOST 34759—2020. Railway rolling stock. Norms of permissible impact on the railway track and test methods]. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian)
8. PNST 511—2020. *Vagonyi gruzoviye. Raschetnyie nerovnosti zheleznodorozhnogo puti dlya otcenki pokazateleyi dinamicheskikh kachestv gruzovih vagonov raschetnimi metodami* [PNST 511—2020. Freight wagons. Estimated railway track irregularities for assessing the dynamic qualities of freight cars by calculation methods]. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian)
9. RD 32.68—96. *Raschetnyie nerovnosti zheleznodorozhnogo puti dlya ispolzovaniya pri issledovaniyah I proektirovanii passazhirskih I gruzovih vagonov* [RD 32.68—96. Estimated railway track irregularities for use in research and design of passenger and freight cars]. Moscow: MPS Publ., 1996. (In Russian)
10. Specification M-976. Truck Performance for Rail Cars (Last Revised: 2019).
11. Specification M-1001 Design, Fabrication, and construction of freight cars (Last Revised: 2019).
12. UIC Code 518. Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour — Safety — Track fatigue — Running behaviour, 4th edition, 2009.
13. DIN EN 14363:2016. European Standard Railway applications — Testing and Simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles — Testing of running behavior and stationary tests.
14. Blohin E. P., Korotenko M. L., Klimenko I. V. Graficheskoe predstavlenie kriteriya Nadalya [Graphical representation of the Nadal criterion]. *Visnik Dnipropetrovs'kogo natsional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu im. akademika V. Lazaryana* [Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport of Academician V. Lazaryan]. 2010, Iss. 35, pp. 7–9.
15. Antonov A. Yu., Ivanov I. I. O vnesenii izmenenii v raschetniye formulyi metodiki otcenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyu obespecheniya ego nadezhnosti [On introduction of changes in calculation formulas of impact assessment method of the rolling stock influence on the track by the condition of its reliability]. *O vnesenii izmeneniy v raschetnye formuly metodiki otcenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyu obespecheniya ego nadezhnosti* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2019, vol. 16, Iss. 1, pp. 31–36. (In Russian)
16. Orlova A. M., Saidova A. V., Rudakova E. A. et al. K voprosu ob ustanovlenii dopuskaemih skorostei dvizheniya zheleznodorozhnykh ekipazheyi na seti dorog RF [On the issue of establishing permissible speeds of movement of railway carriages on the track network of the Russian Federation]. *Vestnik IPPEM: Tekhnika zheleznykh dorog* [Vestnik IPPEM: Technique of Railways]. 2019, Iss. 3(47), pp. 52–60. (In Russian)

Received: February 09, 2023

Accepted: February 28, 2023

Author's information:

Alina V. SAIDOVA — PhD in Engineering; av-saidova@yandex.ru

Artyom V. GUSEV — PhD in Engineering; agusev@tt-center.ru

Ekaterina A. RUDAKOVA — PhD in Engineering; erudakova@tt-center.ru

Лабораторные исследования упругих материалов подшпального основания трамвайных путей

А. В. Петряев, А. А. Сайдалиев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: *Петряев А. В. Сайдалиев А. А. Лабораторные исследования упругих материалов подшпального основания трамвайных путей // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 161–169. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-161-169*

Аннотация

Цель: Изучение упругих свойств подбалластных матов при динамическом воздействии. **Методы:** Одним из основных методов снижения вибрации в источнике его образования является виброизоляция путем укладки упругих материалов. Для оценки долговременного поведения подбалластных матов в конструкции пути проводились исследования упруго-динамических свойств матов «Элапор» и Sylomer австрийской фирмы Getzner. Образцы материалов отбирались с экспериментального участка через год после укладки с целью определения влияния эксплуатационных условий на характеристики исследуемых геосинтетических материалов. Измерения параметров вибрации проводились с помощью комплекта акселерометров и регистрирующего прибора МС-026. **Результаты:** Виброгасящий мат «Элапор» практически сразу сжимается, и в дальнейшем его динамический модуль упругости изменяется незначительно (что характерно для синтетических резин), а мат Sylomer ведет себя более «гибко». **Практическая значимость:** Проведенные исследования позволяют оценить эффективность применения упругих материалов подшпального основания в качестве средства борьбы с негативными явлениями (шум, вибрация), возникающими при движении трамвайных вагонов.

Ключевые слова: Шум, вибрация, трамвай, окружающая среда, электротранспорт, виброизоляция рельса.

Введение

Рельсовый городской транспорт оказывает влияние на экологическое состояние прилегающей территории. Главными недостатками этого вида транспорта являются шум и вибрации, передаваемые в окружающую среду. Проведенные исследования показали негативное действие шума и вибрации на формирование среды городской территории и влияние этих условий на человека [1].

Неудовлетворительное состояние рельсового пути трамвая приводит к возникновению дополнительных источников вибрации и шума, что вызывает некомфортное состояние человека [2].

Исследования показали, что наибольшее влияние на увеличение шума при проезде трамвая оказывают геометрические неровности поверхности катания рельсов и колеса трамвайного вагона, техническое состояние трамвайного вагона и скорость движения трамвая [3, 4].

Для снижения шума и вибрации от проходящих трамваев на окружающие здания необходимы не только хорошая подвеска двигателя и трансмиссия, а также необходимо использовать специальные упругие материалы при прокладке трамвайных путей. Амортизационные устройства применяются для снижения вибрации зданий при устройстве фундаментов, уменьшающих передачу колебаний от грунта [5].

Наиболее эффективно снижение шума и вибрации в источнике его образования. Для этого используется шлифование рельсов, которое устраняет неровности в виде волнообразного износа, влияющие на интенсивность шума качения. Снижение звукоизлучения рельса достигается установкой вибродемпфирующих накладок на шейку рельса, боковых профилей. Виброизоляция рельса достигается установкой прокладок под рельс [6].

Эффективным решением, позволяющим как снизить вибродинамическое воздействие на прилегающую территорию, так и значительно уменьшить уровень шума от подвижного состава, является укладка в подбалластный слой упругой прослойки в виде матов. Анализ исследований, выполненных в нашей стране и за рубежом, показывает, что введением упругих матов в подбалластный слой можно уменьшить уровень вибраций, снизить интенсивность накопления остаточных деформаций пути, замедлить процессы истирания щебня и за счет этого снизить затраты на содержание пути [7–9].

Методы исследования

Для оценки изменения свойств во времени подбалластных матов в конструкции пути проводились исследования упруго-динамических свойств матов «Элапор» и Sylomer австрийской фирмы Getzner. Образцы материалов отбирались с экспериментального участка через год после укладки с целью определения влияния эксплуатационных условий на характеристики исследуемых геосинтетических материалов.

Производились измерения квазистатической характеристики упругости, а также показателей динамической жесткости на гидроимпульсной установке фирмы Getzner, представленной на рис. 1.

Геометрические размеры, объемный вес и коэффициент механических потерь испытуемых образцов из стирол-бутадиен-каучука («Элапор»), а также данные материала Sylomer приведены в табл. 1.



Рис. 1. Гидроимпульсная установка

ТАБЛИЦА 1. Характеристики образцов подбалластных матов

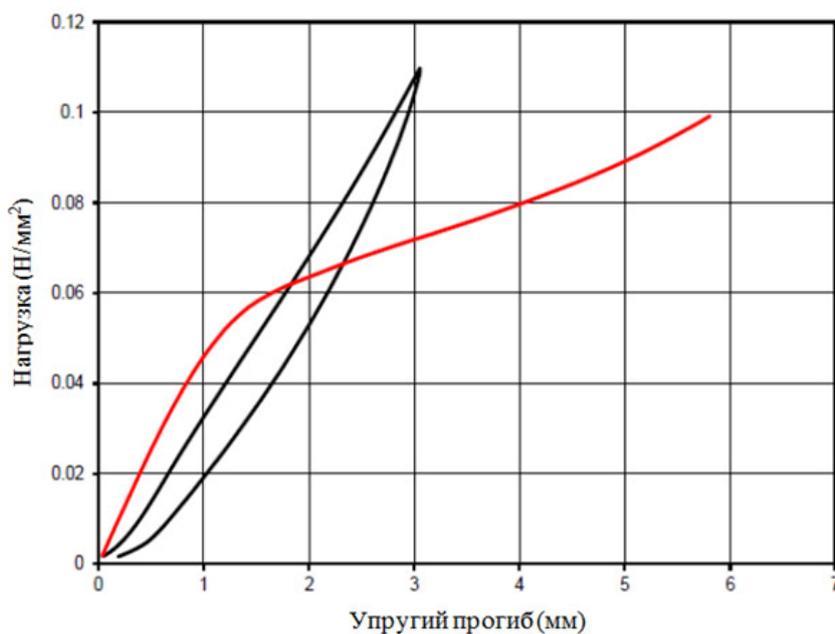
Характеристики	Элапор	Sylomer
Длина × ширина × толщина, мм	300 × 300 × 18,3	300 × 300 × 10,0
Объемный вес, кг/м ³	735	275
Коэффициент механических потерь	0,14	0,17

В табл. 1 обращает на себя внимание высокий объемный вес образцов «Элапора», который более чем в 2,5 раза превышает данный показатель у материала Sylomer.

Результаты и дискуссия

Полученные в результате лабораторных испытаний деформационные свойства образцов до укладки в путь представлены в виде графических зависимостей на рис. 2.

Упругий прогиб виброгасящего мата «Элапор» демонстрирует практически прямо пропорциональную зависимость от прикладываемой нагрузки и меняется от 0 мм до 3,1 мм при изменении нагрузки от 0,002 до 0,11 Н/мм². При разгрузке в этом же диапазоне прямо пропорциональная зависимость сменяется зависимостью параболического типа. На графике (рис. 2) видно, что кривая упругого прогиба не возвращается в точку начала нагружения и останавливается на значении 0,2 мм. Очевидно, это связано с тем, что имеет место остаточная деформация образца либо необходим достаточно продолжительный временной период после снятия нагрузки, чтобы образец вернулся в исходное состояние.



– Sylomer; – «Элапор»

Рис. 2. Сравнение зависимостей упругого прогиба подбалластного мата от нагрузки на сжатие

Упругий прогиб материала Sylomer дает иную зависимость при приложении нагрузки. Сначала он плавно и медленно возрастает с 0 мм до 1,5 мм при изменении нагрузки от 0,002 Н/мм² до 0,058 Н/мм², а затем при меньших степенях приложения нагрузки начинает увеличиваться быстрее, приобретая характер, близкий к линейному прямо пропорциональному типу, и изменяясь с 1,5 мм до 5,8 мм в интервале нагрузок от 0,058 Н/мм² до 0,1 Н/мм².

Зависимость динамического модуля упругости от нагрузки на сжатие для исследуемых материалов представлена на рис. 3. При квазистатической частоте нагружения (кривая 1) динамический модуль упругости виброгасящего мата Элапор сразу возрастает от 0,02 Н/мм³ до 0,04 Н/мм³ в диапазоне нагрузок от 0,004 Н/мм² до 0,02 Н/мм², затем плавно и незначительно снижается до 0,035 Н/мм³ при изменении нагрузки от 0,02 Н/мм² до 0,04 Н/мм² и далее начинает также незначительно возрастать, приобретая линейный характер с 0,035 Н/мм³ до 0,043 Н/мм³ в интервале нагрузок от 0,04 Н/мм² до 0,11 Н/мм².

При приложении нагрузки с частотами 10 Гц и 30 Гц наблюдается практически одинаковый характер поведения кривых, близкий к линейному. При частоте 10 Гц (кривая 2) динамический модуль упругости возрастает с 0,055 Н/мм³ до 0,078 Н/мм³ в диапазоне нагрузок от 0,01 Н/мм² до 0,085 Н/мм². При частоте 30 Гц (кривая 3) динамический модуль упругости возрастает с 0,067 Н/мм³ до 0,091 Н/мм³ в том же интервале нагрузок.

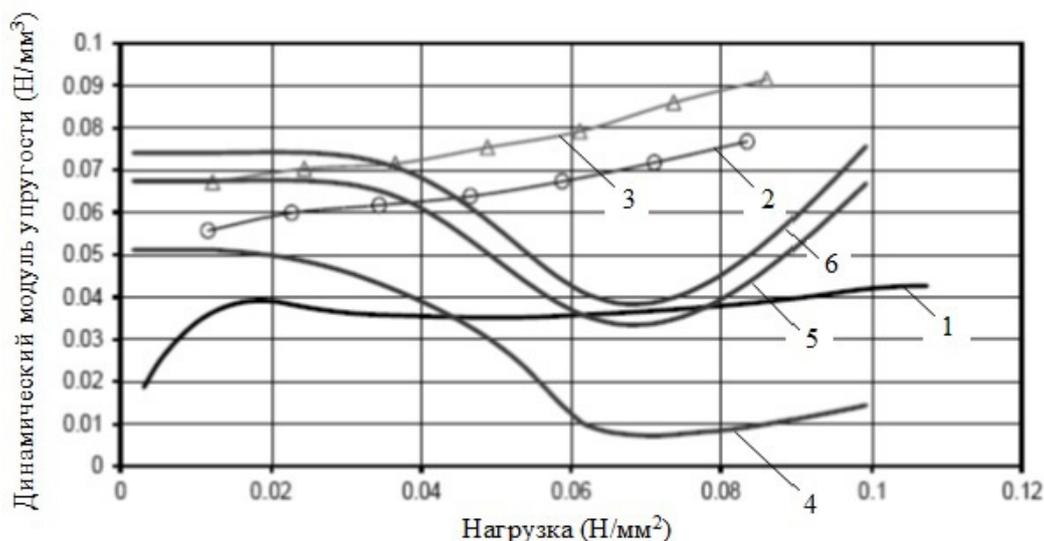


Рис. 3. Зависимость динамического модуля упругости от нагрузки на сжатие для образца «Элапор» и Sylomer при различных частотах приложения нагрузки:
 1 — «Элапор», $f = 0$ Гц; 2 — «Элапор», $f = 10$ Гц; 3 — «Элапор», $f = 30$ Гц;
 4 — Sylomer, $f = 0$ Гц; 5 — Sylomer, $f = 10$ Гц; 6 — Sylomer, $f = 30$ Гц

При квазистатической частоте нагружения (кривая 4) динамический модуль упругости материала Sylomer сначала держится на одном уровне $0,05 \text{ Н/мм}^3$ при изменении нагрузки от $0,002 \text{ Н/мм}^2$ до $0,02 \text{ Н/мм}^2$, затем начинает плавно снижаться с $0,05 \text{ Н/мм}^3$ до $0,01 \text{ Н/мм}^3$ при диапазоне нагрузок от $0,02 \text{ Н/мм}^2$ до $0,065 \text{ Н/мм}^2$ и далее незначительно возрастать с $0,01 \text{ Н/мм}^3$ до $0,015 \text{ Н/мм}^3$ в интервале нагрузок от $0,065 \text{ Н/мм}^2$ до $0,1 \text{ Н/мм}^2$.

При приложении нагрузки с частотами 10 Гц и 30 Гц наблюдается несколько иная картина, но характер поведения соответствующих кривых идентичен. При частоте 10 Гц (кривая 5) динамический модуль упругости сначала держится на одном уровне $0,067 \text{ Н/мм}^3$ при изменении нагрузки от $0,002 \text{ Н/мм}^2$ до $0,03 \text{ Н/мм}^2$, затем начинает плавно снижаться с $0,067 \text{ Н/мм}^3$ до $0,032 \text{ Н/мм}^3$ в интервале нагрузок от $0,03 \text{ Н/мм}^2$ до $0,07 \text{ Н/мм}^2$ и далее возрастать с $0,032 \text{ Н/мм}^3$ до $0,067 \text{ Н/мм}^3$ при диапазоне нагрузок от $0,07 \text{ Н/мм}^2$ до $0,1 \text{ Н/мм}^2$. При частоте 30 Гц (кривая 6) динамический модуль упругости сначала держится на одном уровне $0,073 \text{ Н/мм}^3$ в интервале нагрузок от $0,002 \text{ Н/мм}^2$ до $0,03 \text{ Н/мм}^2$, затем начинает плавно снижаться с $0,073 \text{ Н/мм}^3$ до $0,038 \text{ Н/мм}^3$ при диапазоне нагрузок от $0,03 \text{ Н/мм}^2$ до $0,07 \text{ Н/мм}^2$ и далее возрастать с $0,038 \text{ Н/мм}^3$ до $0,073 \text{ Н/мм}^3$ при изменении нагрузки от $0,07 \text{ Н/мм}^2$ до $0,1 \text{ Н/мм}^2$.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что виброгасящий мат «Элапор» практически сразу сжимается и в дальнейшем его динамический модуль упругости изменяется незначительно (что характерно для синтетических резин), а мат Sylomer ведет себя более «гибко». Это обусловлено тем, что «Элапор» является по своей структуре пористым материалом, а Sylomer имеет замкнутые поры,

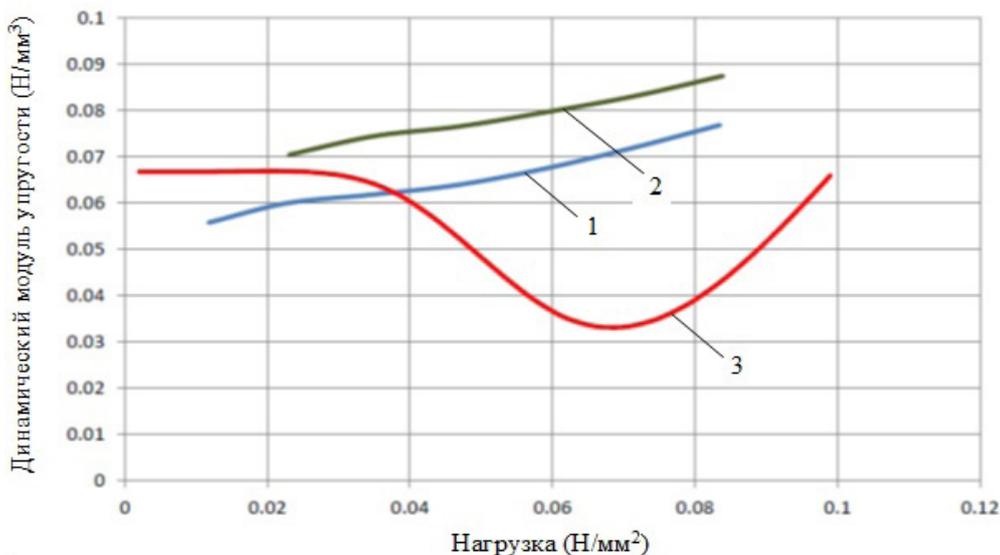


Рис. 4. Изменение динамического модуля упругости при частоте приложения нагрузки 10 Гц:

1 — «Элапор» до укладки в путь; 2 — «Элапор» после укладки в путь;
3 — Sylomer после укладки в путь

которые при нагрузке лишь изменяют свои формы и размеры, обеспечивая влаго- и воздухопроницаемость.

Сравнение динамического модуля упругости исследованных материалов через год после укладки в путь показало, что материал Sylomer не поменял своих свойств в отличие от образцов «Элапор». Зависимости динамического модуля упругости материалов при частоте приложения нагрузки на сжатие 10 Гц представлены на рисунке 4.

Сравнение полученных зависимостей позволяет утверждать, что жесткость материала «Элапор» за год эксплуатации в пути увеличилась на 18 %, в отличие от материала матов Sylomer, который не изменил своих свойств.

Здесь следует обратить внимание на то, что ход изменения кривых динамического модуля упругости образцов «Элапор» стабильно прогрессивный, что типично для изделий из резины. Также следует отметить, что мат Sylomer при изменении нагрузки от 0,03 Н/мм² до 0,07 Н/мм² способен снижать динамический модуль упругости относительно своего начального уровня и удерживать его до нагрузки 0,1 Н/мм².

Заключение

1. Жесткость материала «Элапор» за год эксплуатации в пути увеличилась на 18 %, в отличие от материала матов Sylomer, который не изменил своих свойств.

2. Ход изменения кривых динамического модуля упругости образцов «Элапор» стабильно прогрессивный, что типично для изделий из резины.

Библиографический список

1. Юшков В. С. Диагностика рельсового пути электротранспорта / В. С. Юшков, В. И. Кычкин // Вестник МГСУ. — 2015. — № 1. — С. 36–43.
2. Сергеев А. А. Виброакустическая диагностика технического состояния участков трамвайных путей в целях снижения неблагоприятных факторов движения / А. А. Сергеев, М. Н. Мисюров, В. И. Кычкин // Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика: материалы XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) (г. Пермь, 21 ноября 2014 г.). — С. 351–360.
3. Кычкин В. И. Оценка состояния рельсового пути городского электротранспорта мегаполиса / В. И. Кычкин, В. С. Юшков. — Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. — С. 58–65.
4. Лакусик С. Влияние трамвайного движения на шум и вибрацию / С. Лакусик // Техническая акустика. — 2006. — № 13. — URL: <http://ejta.org>.
5. Кустенко А. А. Исследование влияния шума и вибрации в трамвайном движении / А. А. Кустенко // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. — 2017. — № 2(45). — С. 97–99.
6. Дудкин Е. П. Проблемы охраны труда и геоэкологической опасности городского транспорта / Е. П. Дудкин, В. А. Черняева // Технологии техносферной безопасности. — 2014. — Вып. 1(53). — URL: <http://ipb.mos.ru/ttb>.
7. Патент № 168144 Российская Федерация, МПК В60В 17/00 (2006.01), 168 144. Шумопоглощающее колесо для железнодорожного транспорта / Ю. А. Панин, В. В. Березин, М. Л. Дисветов. — 2017. — Бюл. № 2(51).
8. Патент № 130319 Российская Федерация МПК E01В 19/00 (2006.01), 130 319. Устройство для уменьшения шума и/или вибраций на рельсовом транспорте / С. М. Пронин, Н. И. Питеев. — 2013. — Бюл. № 20.
9. Краскевич С. Статические и динамические характеристики упруги мтов для виброизоляции железнодорожных путей / С. Краскевич, С. Липко, М. Плудовска и др. // Procedia Engineering. — 2016. — № 153. — С. 317–324.

Дата поступления: 11.01.2023

Решение о публикации: 25.02.2023

Контактная информация:

ПЕТРЯЕВ Андрей Владимирович — канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; pgups60@mail.ru

САЙДАЛИЕВ Абдунаим Абдурауфович — аспирант 1-го курса; saidaliev18@mail.ru

Laboratory Studies of Elastic Materials for Sleeper Base of Tram Tracks

A. V. Petriaev, A. A. Saydaliev

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Petriaev A. V., Saidaliev A. A. Laboratory Studies of Elastic Materials for Sleeper Base of Tram Tracks. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 161–169. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-161-169

Summary

Purpose: Study of elastic properties of subballast mats at dynamic impact. **Methods:** To calculate the optimal parameters of these inserts, mathematical model was created using the Autodesk Robot software package. To estimate durable behavior of subballast mats in track structure, the research of “Elapor” and Sylomer (Getzner, Austria) mats’ elastic-dynamic properties was pursued, Material samples were selected from experimental section a year past after laying with the purpose to define exploitation conditions effect on investigated geosynthetic materials. Vibration parameter measurements were held with the help of acetometer kit and registering device MIC-026. **Results:** Vibration extinguishing mat “Elapor” shrinks practically right away and further its elasticity dynamic module changes slightly (that’s characteristic for synthetic rubbers) and Sylomer mat behaves more “flexible”. **Practical significance:** Pursued research allows to assess application efficiency for elastic materials of slipper base as a mean of struggle with negative phenomenon (noise, vibration), appearing at tram carriage motion.

Keywords: Noise, tram, vibrations, natural environment, urban area, electric transport, carriage structure vibrations, rail vibration isolation.

References

1. Yushkov V. S., Kychkin V. I. Diagnostika rel’sovogo puti elektrotransporta [Diagnostics of the rail track of electric transport]. *Vestnik MGSU* [Vestnik MGSU]. 2015, Iss. 1, pp. 36–43. (In Russian)
2. Sergeev A. A., Misyurov M. N., Kychkin V. I. *Vibroakusticheskaya diagnostika tekhnicheskogo so-stoyaniya uchastkov tramvaynykh putey v tselyakh snizheniya neblago-priyatnykh faktorov dvizheniya. Ekologiya i nauchno-tekhnicheskiy progress. Urbanistika: materialy KhII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (s mezh-dunarodnym uchastiem) (g. Perm’, 21 noyabrya 2014 g.)* [Vibroacoustic diagnostics of the technical condition of tramway sections in order to reduce unfavorable traffic factors. Ecology and Scientific and Technical Progress. Urban studies: materials of the XII All-Russian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists (with international participation) (Perm, November 21, 2014)]. pp. 351–360. (In Russian)
3. Kychkin V. I., Yushkov V. S. *Otsenka sostoyaniya rel’sovogo puti gorodskogo elektrotransporta megapolisa* [Evaluation of the state of the rail path of the urban electric transport of the metrop-

olis]. Perm': Permskiy natsional'nyy issledovatel'skiy politekhni-cheskiy universitet Publ., pp. 58–65. (In Russian)

4. Lakusik S. Vliyanie tramvaynogo dvizheniya na shum i vibratsiyu [Influence of tram traffic on noise and vibration]. *Tekhnicheskaya akustika* [Technical Acoustics]. 2006, Iss. 13. Available at: <http://ejta.org>. (In Russian)

5. Kustenko A. A. Issledovanie vliyaniya shuma i vibratsii v tramvaynom dvizhenii [Study of the influence of noise and vibration in the tram movement]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Kurgan State University. Series: Engineering sciences]. 2017, Iss. 2(45), pp. 97–99. (In Russian)

6. Dudkin E. P., Chernyaeva V. A. Problemy okhrany truda i geoekologicheskoy opasnosti gorodskogo transporta [Problems of labor protection and geoeological hazards of urban transport]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti* [Technologies of technosphere safety]. 2014, Iss. 1(53). Available at: <http://ipb.mos.ru/ttb>. (In Russian)

7. Panin Yu. A., Berezin V. V., Disvetov M. L. *Shumopogloshchayushchee koleso dlya zheleznodorozhnogo transporta* [Noise-absorbing wheel for railway transport]. Patent RF, no. 168144, 2017. (In Russian)

8. Pronin C. M., Piteev N. I. *Ustroystvo dlya umen'sheniya shuma i/ili vibratsiy na rel'sovom transporte* [A device for reducing noise and/or vibrations on rail transport]. Patent RF, no. 130319, 2013. (In Russian)

9. Kraskevich S., Lipko S., Pludovska M. et al. *Sticheskie i dinamicheskie kharakteristiki uprugih mtov dlya vibrozolyatsii zheleznodorozhnykh putey* [Static and dynamic characteristics of elastic bands for vibration isolation of railway tracks]. *Procedia Engineering*. 2016, Iss. 153, pp. 317–324. (In Russian)

Received: January 11, 2023

Accepted: February 25, 2023

Author's information:

Andrei V. PETRIAIEV — PhD in Engineering, Research Scientist; pgups60@mail.ru

Abdunaim A. SAIDALIEV — 1st year Postgraduate Student; saidaliev18@mail.ru

Решение задачи параметрического синтеза для САУ скоростью длинносоставного грузового поезда

Н. О. Жухин, В. И. Легкая

Российский университет транспорта, РУТ (МИИТ), Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Жухин Н. О., Легкая В. И. Решение задачи параметрического синтеза для САУ скоростью длинносоставного грузового поезда // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 170-182. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-170-182

Аннотация

Цель: Обоснование необходимости рационального выбора значений параметров системы автоматического управления (САУ) скоростью локомотива длинносоставного грузового поезда по условию обеспечения необходимого качества управления САУ. Выбор метода решения задачи параметрического синтеза САУ и показателей качества управления. Отыскание рациональных с точки зрения принятой системы оценки качества управления параметров САУ для поездов различной массы и длины. **Методы:** Математического и имитационного моделирования, теории электрической тяги, теории автоматического управления, многокритериальной оптимизации. **Результаты:** При решении задачи параметрического синтеза для рассматриваемой САУ скоростью установлено, что ее параметры зависят от длины поезда и его массы. Найдены аналитические зависимости, устанавливающие функциональную связь между средней массой вагона поезда и параметрами САУ скоростью. **Практическая значимость:** Полученные зависимости могут быть реализованы в виде адаптера в составе системы автоматического управления, позволяя осуществлять оперативную настройку параметров САУ в зависимости от средней массы вагона поезда.

Ключевые слова: Динамика поезда, длинносоставный грузовой поезд, методы оптимизации, многокритериальная оптимизация, параметрический синтез, показатели качества, регулятор скорости, система автоматического управления скоростью.

В настоящее время на железнодорожном транспорте наблюдается рост грузовых перевозок. При этом наиболее грузонапряженные участки железных дорог приближаются к пределу как пропускной, так и провозной способности. Один из методов повышения провозной способности железной дороги заключается в использовании длинносоставных грузовых поездов. Вес такого поезда и число вагонов в нем значительно выше, чем в грузовых поездах нормальной длины. Поэтому при управлении таким поездом машинист должен учитывать протекающие в поезде динамические процессы, что повышает напряженность работы машиниста и требует от него повышенной квалификации. При нерациональном управлении длинносоставным грузовым поездом продольные силы, возникающие в его межвагонных связях, могут превысить максимально допустимые значения [1]. В результате возможен разрыв автосцепок поезда под действием продольных растягивающих сил или сход вагонов с рельсов под действием продольных сжимающих сил [2].

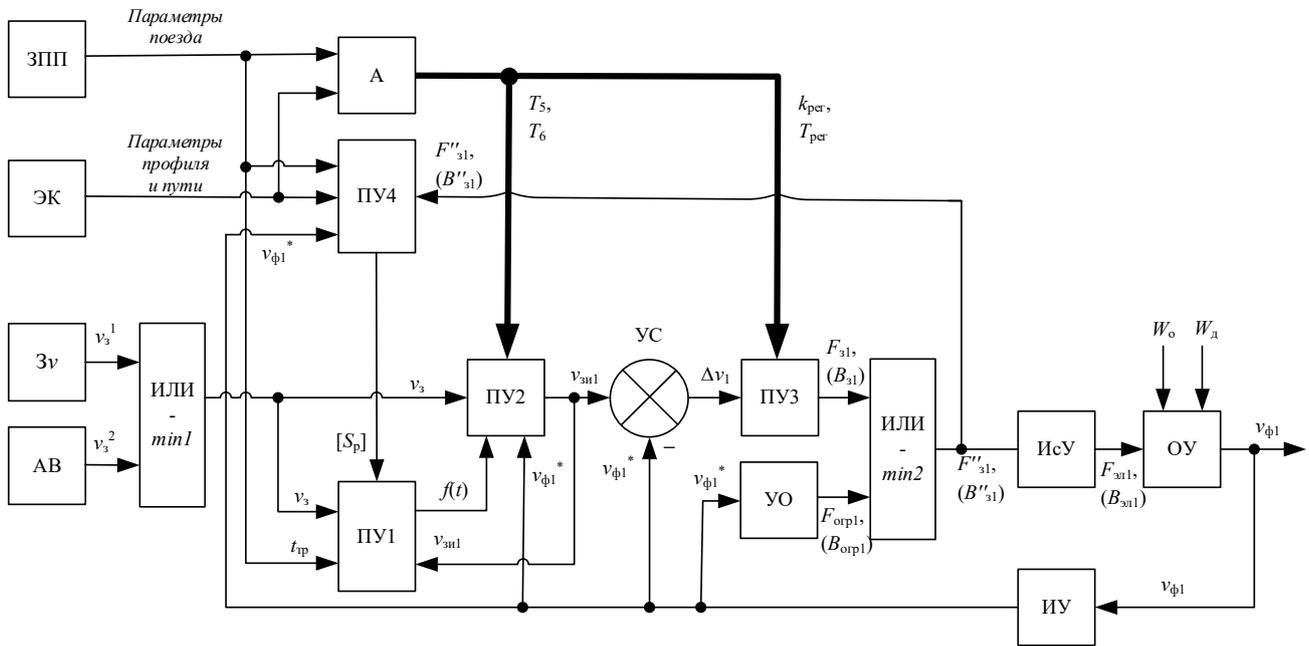


Рис. 1. Функциональная схема САУ скоростью с автоматическим выбором режима разгона (торможения) поезда

Для снижения вероятности возникновения подобных ситуаций под действием человеческого фактора, а следовательно, повышения безопасности движения поездов, на локомотивах грузовых поездов применяют системы автоведения поездов САВП. Внутренним контуром систем автоведения является контур регулирования скорости, представляющий собой систему автоматического управления скоростью [3]. В настоящее время для грузовых поездов разработаны и применяются САУ скоростью, способные учитывать протекающие в длинносоставном грузовом поезде динамические процессы; при этом снижается напряженность работы машиниста и повышается качество управления длинносоставным поездом [4].

Рассмотрим САУ скоростью (рис. 1), в которой в зависимости от состояния межвагонных связей поезда перед началом разгона (торможения) поезда осуществляется автоматический выбор способа изменения силы тяги или торможения с целью улучшения характера протекающих в поезде динамических процессов [5].

Величина заданной скорости движения v_3 вводится в систему задатчиком скорости Zv контроллера машиниста, а в режиме автоведения — и вышестоящей системой автоведения АВ. Устройство ИЛИ-*min1* выбирает минимальное из двух значений заданной скорости и передает его промежуточным устройствам ПУ1 и ПУ2. С помощью задатчика параметров поезда ЗПП в данную САУ поступает информация о числе вагонов в поезде, весе каждого вагона и других параметрах поезда. Информация об участке пути, по которому движется поезд (параметры пути и профиля), вводятся в САУ с электронной карты ЭК.

На основании параметров поезда, пути и профиля модуль адаптации А определяет постоянные времени T_5 и T_6 сглаживающего устройства ПУ2, а также пропорциональный и интегральный коэффициенты регулятора скорости ПУ3 — $k_{\text{рег}}$ и $T_{\text{рег}}$. Промежуточное устройство ПУ4 осуществляет расчет величин возникающих в поезде продольных сил, массив значений которых передается в устройство ПУ1.

На основании параметров поезда, пути и профиля модуль адаптации А определяет постоянные времени T_5 и T_6 сглаживающего устройства ПУ2, а также пропорциональный и интегральный коэффициенты регулятора скорости ПУ3 — $k_{\text{рег}}$ и $T_{\text{рег}}$. Промежуточное устройство ПУ4 осуществляет расчет величин возникающих в поезде продольных сил, массив значений которых передается в устройство ПУ1. Данное устройство производит оценку состояния поезда и выбирает способ изменения сил тяги или торможения. Скачкообразно изменяющееся значение заданной скорости движения v_3 , поступающее с выхода устройства ИЛИ-*min1*, сглаживается промежуточным устройством ПУ2. В основе устройства ПУ2 находится апериодическое звено второго порядка с постоянными времени T_5 и T_6 .

Рассогласование заданного значения скорости, поступающего с выхода устройства ПУ2, и фактического измеренного значения скорости определяется устройством сравнения УС. На основе этого рассогласования пропорционально-интегральный регулятор скорости (устройство ПУ3) вычисляет заданное значение силы тяги или торможения. Это значение поступает в устройство ИЛИ-*min2*, где сравнивается с максимально допустимым значением силы тяги (торможения), рассчитанным устройством ограничения УО. Наименьшее из двух значений силы тяги (торможения) поступает на вход исполнительного устройства ИсУ — автоматизированного тягового электропривода. Последний формирует фактическое значение силы тяги (торможения), воздействующее на грузовой поезд — объект управления ОУ. Фактическая скорость движения поезда измеряется датчиком скорости ИУ. В качестве модели объекта управления использована многомассовая модель поезда [6], в которой каждому экипажу поезда соответствует элемент с массой, равной массе данного экипажа. Взаимодействие элементов (экипажей) модели осуществляется через нелинейные и нелианеризируемые связи с зазором, представляющие собой межвагонные связи в виде поглощающих аппаратов автосцепок и самих автосцепок.

В промежуточном устройстве ПУ4 рассмотренной САУ осуществляется расчет в режиме реального времени величин продольных сил для всех межвагонных соединений. Как известно, величины продольных сил в межвагонных соединениях в установившемся режиме движения поезда зависят от величин всех сил, действующих на соседние экипажи. Зная в каждый момент времени величину силы тяги локомотива, величины сил сопротивления движению экипажей, а также масс и ускорений всех экипажей экипажа в данный момент времени, можно оценить величины продольных сил, возникающих в автосцепках поезда. Так, величина

продольной силы в межвагонном соединении за локомотивом в режиме тяги представляет собой разницу силы тяги локомотива и доли силы тяги, затраченной на преодоление силы сопротивления движению локомотива и на ускорение локомотива. Отсюда, величину продольной силы в межвагонном соединении за любым экипажем поезда равна величине продольной силы в межвагонном соединении перед этим экипажем за вычетом силы сопротивления движению, а также произведению веса данного экипажа на среднее значение ускорения экипажей поезда [7].

По знакам величин продольных сил устройством ПУ1 определяется процент растянутых и сжатых межвагонных соединений относительно их общего числа. Если процент растянутых межвагонных соединений превышает некоторое пороговое значение $a_{пр}$, система оценивает состояние поезда как растянутое. Аналогично выполняется определение сжатого состояния поезда на основе сопоставления числа сжатых межвагонных соединений и порогового значения $a_{нс}$. По результатам оценки фактического состояния поезда и выбранного режима движения САУ выбирает способ изменения силы тяги или торможения. Так, если задан режим разгона поезда, находящегося в сжатом состоянии, система выбирает способ увеличения силы тяги в два этапа. При этом на первом этапе осуществляется разгон с минимальным ускорением, обеспечивающим растяжение поезда, после чего на втором этапе происходит разгон поезда до заданной скорости с максимальным ускорением. Использование двухэтапного разгона сжатого поезда значительно снижает величины продольных динамических сил, возникающих при растяжении сжатого поезда.

В том случае, если перед очередным разгоном поезд уже находится в растянутом состоянии, система сразу переходит ко второму этапу разгона поезда — с максимальным заданным ускорением. Поскольку поезд растянут, в нем практически не возникает продольных колебаний, а следовательно, значительных по величине продольных динамических сил. Применение разгона поезда в два этапа в этом случае привело бы к повышению времени разгона поезда. В режиме торможения данная САУ работает аналогично, так, торможение уже сжатого поезда осуществляется с максимальным замедлением. Автоматический выбор режима разгона (торможения) поезда, применяемый данной САУ, позволяет без ухудшения качества управления сократить время движения поезда, а также обеспечить экономию топливно-энергетических ресурсов [5].

Существует целый ряд показателей, позволяющих оценить качество управления САУ скоростью грузового поезда. Это, во-первых, показатели качества, характерные для всех систем автоматического управления [4] — вид переходного процесса, его длительность (время регулирования), величина ошибки в установленном режиме, величина перерегулирования и т. д. Кроме того, для САУ скоростью грузового поезда целесообразно использовать показатели, позволяющие оценить качество динамических процессов, происходящих в грузовом поезде [8].

Это величина усталостных повреждений, накопленных автосцепками поезда, максимальная величина возникающей в поезде продольной динамической силы, минимальное значение коэффициента устойчивости вагона против схода с рельсов при действии продольных сжимающих сил.

Выбрав рациональные значения определенных параметров системы управления, можно значительно улучшить величины вышерассмотренных показателей качества. Для этого необходимо выполнить решение задачи параметрического синтеза, то есть при известной структуре системы управления выбрать такие значения ее параметров, при которых показатели качества управления САУ принимают рациональные значения с позиции принятой системы критериев оценки ее качества.

Как показал предварительный анализ системы, а также опыт ранее выполненных исследований, различные показатели качества предъявляют различные, зачастую противоречивые требования к параметрам системы управления. В этом случае поиск оптимальных параметров системы по одному критерию (однокритериальная оптимизация) позволяет определить наилучшее значение только одного показателя качества при возможном ухудшении значений других показателей. Поэтому методом однокритериальной оптимизации невозможно одновременно улучшить значения нескольких разнородных показателей качества. Для определения параметров САУ, которым будут соответствовать компромиссные значения разнородных показателей качества, следует использовать методы многокритериальной оптимизации [9], в которых для описания компромисса между различными частными критериями, предъявляющими противоречивые требования к системе, необходимо использовать так называемую целевую функцию.

На основании накопленного опыта решения подобных задач [3, 9, 10] в качестве целевой функции выбрана функция суммарных допустимых потерь:

$$\ddot{O} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{U_i - U_i^*}{U_i^{**} - U_i^*} \right\}^2},$$

где n — количество показателей качества управления;

U_i — текущее значение i -го показателя качества;

U_i^* — минимальное значение i -го показателя качества, полученное путем решения задачи однокритериальной оптимизации по данному показателю;

U_i^{**} — максимальное (допустимое) значение i -го показателя качества.

Из формулы для данной функции следует, что перед решением задачи многокритериальной оптимизации необходимо найти минимальные значения оптимизируемых параметров путем решения задачи однокритериальной оптимизации.

Решение задачи параметрического синтеза представляет из себя поиск минимального значения целевой функции. Задачу поиска минимума целевой функции выполним с использованием метода Нелдера — Мида (метод поиска с использованием деформируемого многогранника). Данный метод, по сравнению с методами случайного поиска, требует меньшего времени вычислений, а также не требует вычисления производных. Поэтому он использовался при решении ряда задач оптимизации параметров САУ [11] и показал адекватные результаты.

При решении задачи параметрического синтеза данным методом осуществляется поиск минимального значения функции $f(x)$ в пространстве, имеющем n координат (n -мерном пространстве). В этом пространстве строится многогранник с $n + 1$ вершиной, каждой из которых соответствует определенное сочетание из n оптимизируемых параметров САУ. Значения этих параметров являются координатами данной вершины, на их основе определяется значение целевой функции. Из множества значений функции происходит определение максимального и минимального. В процессе поиска происходит постепенная замена точки максимума функции точкой с меньшим значением. Перед началом оптимизации задают исходные координаты вершин многогранника — $n + 1$ сочетание из n оптимизируемых параметров. Начальные значения параметров системы можно определить путем пробных расчетов на модели разрабатываемой САУ. Полное описание метода Нелдера — Мида рассмотрено в [12].

Рассмотрим выбор параметров САУ и их многокритериальную оптимизацию методом Нелдера — Мида на примере вышерассмотренной САУ скоростью грузового поезда. При этом рассмотрим движение грузового поезда, состоящего из электровоза массой 180 т и 71 полувагона, в режиме трогания с места, разгона до скорости 40 км/ч с последующей стабилизацией скорости и повторным разгоном до скорости 80 км/ч. Движение поезда осуществляется по площадке. Рассмотрим 5 вариантов формирования поезда, различающихся массой одного вагона — 30 т, 45 т, 60 т, 75 т и 90 т. При этом общая масса поезда составила 2310, 3375, 4440, 5505 и 6570 т соответственно.

Перед решением данной задачи были выбраны 7 оптимизируемых параметров САУ: отношение x_1 ускорения (замедления), реализуемого на первом этапе разгона (торможения) к максимальному ускорению (замедлению), постоянные времени T_5 и T_6 сглаживающего устройства ПУ2; параметры $a_{пр}$ и $a_{пс}$ устройства ПУ1, автоматически выбирающего режим разгона (торможения) поезда; а также параметры ПИ-регулятора скорости $k_{рег}$ и $T_{рег}$. В ходе расчетов осуществляется моделирование движения поезда, оборудованного вышерассмотренной САУ с выбранными значениями этих параметров. На основе полученных значений 4 выбранных показателей качества САУ (суммы усталостных повреждений, накопленных автосцепками поезда; времени регулирования, средней установившейся ошибки и величины перерегулирования) по формуле суммарных допустимых

потерь осуществляется расчет значения целевой функции. Перед этим путем однокритериальной оптимизации были определены минимальные значения данных показателей качества.

На рис. 2 представлены графики, иллюстрирующие движение данного грузового поезда массой 4440 т в вышерассмотренном режиме после решения задачи многокритериальной оптимизации САУ скоростью. Это графики зависимости от времени заданной и фактической скорости движения поезда $v_3(t)$ и $v_f(t)$ (рис. 2, а), силы тяги локомотива $F_k(t)$ (рис. 2, б), величин продольных сил в 1-м и 35-м межвагонных соединениях поезда $S_1(t)$ и $S_{35}(t)$ (рис. 2, в). Значения параметров САУ и показателей качества управления, полученные в результате решения данной задачи для всех вариантов формирования поезда, приведены в табл. 1.

Сравним значения параметров и показателей качества данной САУ до и после решения задачи многокритериальной оптимизации на примере грузового поезда массой 4440 т. В качестве исходных приняты следующие значения параметров САУ: $T_5 = 0,7$ с; $T_6 = 0,4$ с; $x_1 = 0,4$; $k_{\text{рег}} = 380\,000$; $T_{\text{рег}} = 0,250$; $a_{\text{пр}} = 0,7$; $a_{\text{пс}} = 0,25$. При данных параметрах системы получены следующие значения показателей качества: максимальная величина продольной динамической силы $S = 440,5$ кН; сумма усталостных повреждений, накопленных в автосцепках, $a = 2,42 \cdot 10^{-6}$; время переходного процесса при повторном разгоне поезда $T_{\text{п}} = 412,1$ с; величина установившейся ошибки $\Delta v = 0,769$ км/ч; величина перерегулирования $\Delta v_{\text{пер}} = 0$ км/ч. После решения задачи многокритериальной оптимизации получены следующие значения параметров САУ: $T_5 = 1,856$ с; $T_6 = 0,774$ с; $x_1 = 0,386$; $k_{\text{рег}} = 371\,139$; $T_{\text{рег}} = 0,243$ с; $a_{\text{пр}} = 0,693$; $a_{\text{пс}} = 0,243$. При этом значения показателей качества составили: $T_{\text{п}} = 200,8$ с; $a = 2,21 \cdot 10^{-6}$; $S = 251,4$ кН; $\Delta v = 0,295$ км/ч; $\Delta v_{\text{пер}} = 0,234$ км/ч. Из полученных результатов видно, что изменение параметров САУ в процессе многокритериальной оптимизации привело к значительному сокращению времени переходного процесса при повторном разгоне поезда (в 2 раза), величины установившейся ошибки (в 2,5 раза), а к уменьшению также максимальной величины продольной динамической силы (в 1,5 раза) и суммы усталостных повреждений автосцепок (на 8 процентов). При этом максимальная величина перерегулирования составила 0,234 км/ч.

Рассмотренные варианты формирования поезда при одинаковом числе экипажей имеют разную массу одного вагона, а значит, и разную массу поезда. Согласно [9], оптимальные величины параметров САУ зависят от массы поезда. Анализируя данные табл. 1, можно также выявить зависимость параметров САУ и показателей качества ее работы от средней массы вагонов поезда. Так, в общем случае с ростом средней массы одного вагона (и массы поезда) постоянная времени T_5 , доля ускорения x_1 , постоянная регулятора скорости $T_{\text{рег}}$ и доли межвагонных соединений $a_{\text{пр}}$ и $a_{\text{пс}}$ уменьшаются, а постоянная времени T_6 и постоянная регулятора скорости $k_{\text{рег}}$ увеличиваются. Зависимости этих параметров от

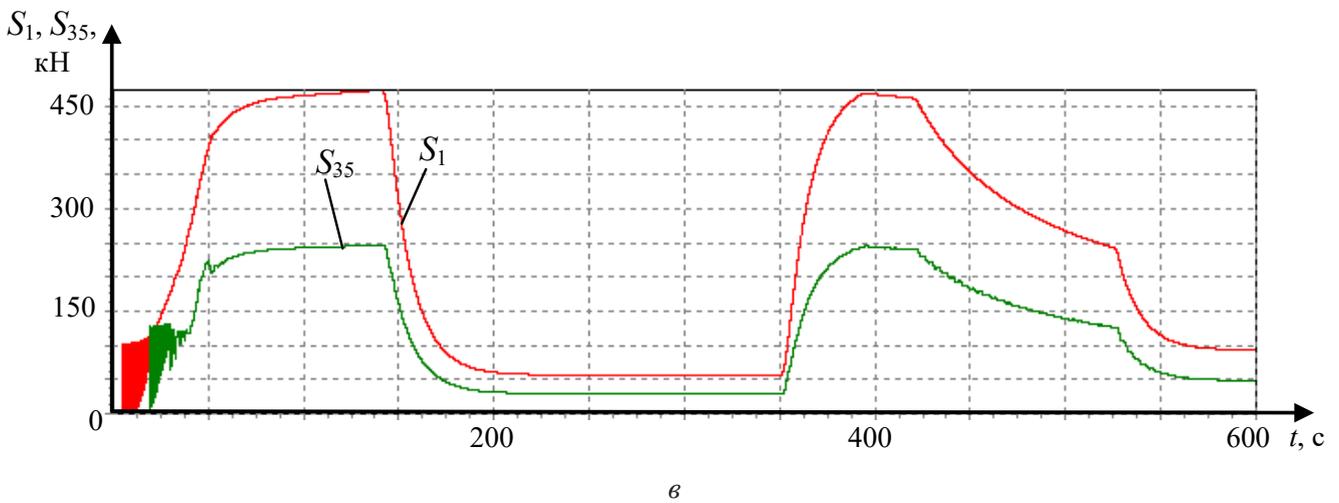
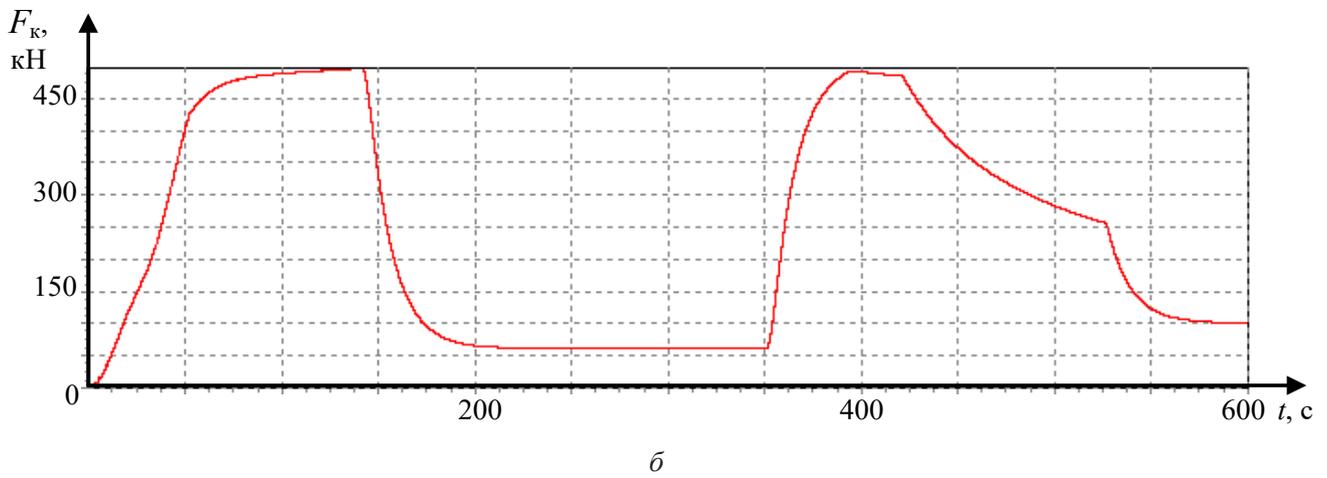
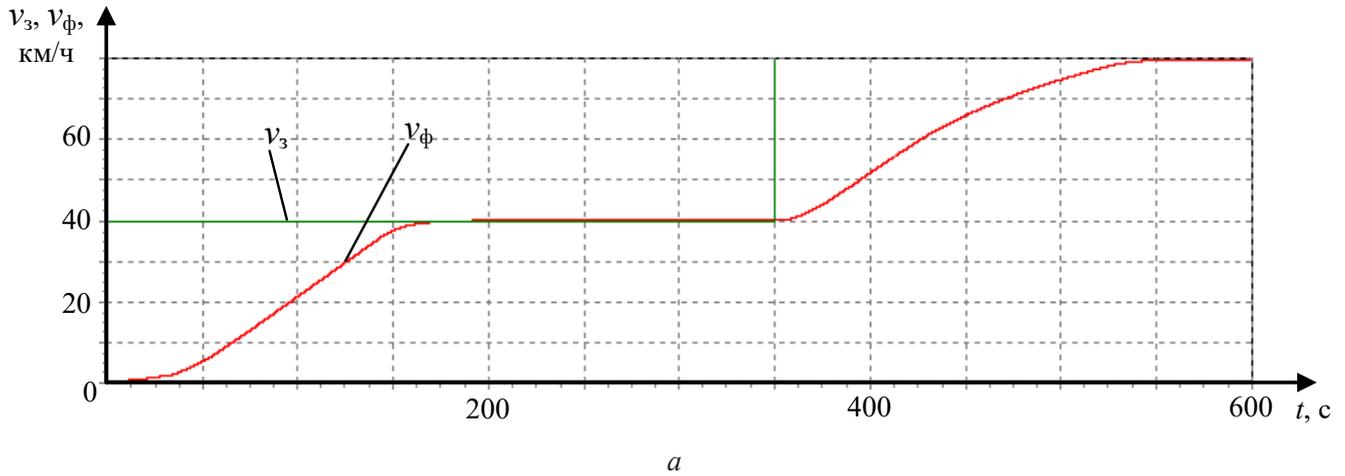


Рис. 2. Графики зависимостей от времени фактической и заданной скорости движения поезда (*a*), силы тяги локомотива (*б*), величин продольной силы в 1-м и 35-м межвагонных соединениях (*в*) после решения задачи многокритериальной оптимизации параметров САУ скоростью грузового поезда массой 4440 т

ТАБЛИЦА 1. Значения параметров САУ и показателей качества управления после решения задачи многокритериальной оптимизации

Параметр (показатель)	Масса поезда, т				
	2310 ($m_{\text{ваг}} = 30$ т)	3375 ($m_{\text{ваг}} = 45$ т)	4440 ($m_{\text{ваг}} = 60$ т)	5505 ($m_{\text{ваг}} = 75$ т)	6570 ($m_{\text{ваг}} = 90$ т)
T_5 , с	2,279	2,112	1,856	1,784	1,442
T_6 , с	0,976	1,058	0,774	1,339	1,284
x_1	0,497	0,457	0,386	0,435	0,352
$k_{\text{рег}}$	149 907	248 671	371 139	385 094	601 763
$T_{\text{рег}}$, с	0,299	0,279	0,243	0,268	0,226
$a_{\text{пр}}$	0,749	0,729	0,693	0,718	0,676
$a_{\text{пс}}$	0,291	0,277	0,244	0,269	0,225
$T_{\text{п}}$, с	134,9	164,2	200,8	249,9	289,4
a	$0,212 \cdot 10^{-6}$	$0,221 \cdot 10^{-6}$	$0,221 \cdot 10^{-6}$	$0,219 \cdot 10^{-6}$	$0,220 \cdot 10^{-6}$
S , кН	245,1	247,9	251,4	240,1	484,8
Δv , км/ч	0,416	0,297	0,295	0,252	0,189
$\Delta v_{\text{пер}}$, км/ч	0,374	0,372	0,234	0,172	0,117

средней массы вагона показаны в виде отдельных точек на графиках на рис. 3. Для удобства использования полученных результатов в САУ скоростью их целесообразно представить в виде аналитических выражений, позволяющих определять значения параметров САУ для любой массы поезда. Выполненный анализ показал, что наиболее достоверно зависимости параметров САУ от средней массы вагона можно аппроксимировать линейными и степенными функциями. Выражения полученных аппроксимирующих функций, связывающих величины параметров САУ с массой вагона, приведены в табл. 2. Графики этих функций (так называемые настроечные кривые САУ) также приведены на рис. 3.

Использование в САУ скоростью локомотива зависимостей рациональных значений параметров системы от массы вагона позволяет определить значения параметров САУ, близкие к рациональным, для поезда с любой средней массой вагона. В качестве примера по найденным зависимостям (настроечным кривым) определим значения параметров САУ для II и IV вариантов формирования поезда (масса одного вагона 45 и 75 т соответственно). Полученные значения параметров САУ приведены в табл. 3. Используя эти значения, выполним моделирование движения поездов со средней массой вагона 45 и 75 т в вышерассмотренном режиме движения. Значения показателей качества, полученные в результате моделирования, также приведены в табл. 3. Из анализа этих значений следует, что способ определения параметров САУ в зависимости от средней массы вагона показывает удовлетворительные результаты и может быть использован в САУ скоростью грузового поезда.

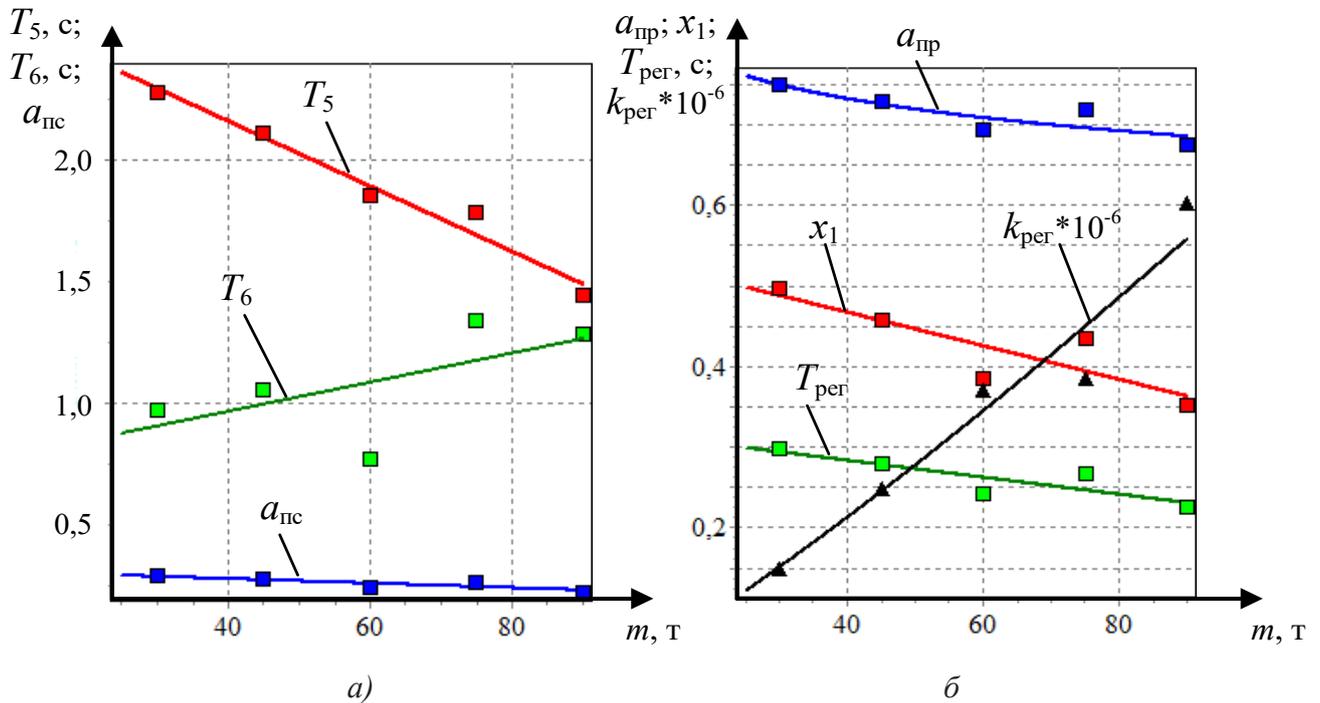


Рис. 3. Графики зависимостей от массы вагона поезда параметров САУ скоростью: постоянных времени T_5 и T_6 , параметра a_{pc} для оценки состояния поезда (а); доли ускорения x_1 , коэффициентов регулятора скорости k_{per} и T_{per} , параметра a_{pr} для оценки состояния поезда (б)

ТАБЛИЦА 2. Аппроксимирующие функции, показывающие зависимость параметров САУ скоростью от средней массы вагона

Параметр САУ	Аппроксимирующая функция данного параметра
T_5, c	$y(m) = -0,0134m + 2,695$
T_6, c	$y(m) = 0,00598m + 0,727$
x_1	$y(m) = -0,00208m + 0,550$
k_{per}	$y(m) = 2686m^{1,186}$
T_{per}, c	$y(m) = -0,00105m + 0,325$
a_{pr}	$y(m) = 0,986m^{-0,0808}$
a_{pc}	$y(m) = -0,00093m + 0,317$

ТАБЛИЦА 3. Значения параметров САУ и показателей качества управления, полученные при определении параметров САУ скоростью с использованием настроечных кривых

Параметр (показатель)	Масса поезда, т	
	3195 ($m_{\text{ваг}} = 45$ т)	5325 ($m_{\text{ваг}} = 75$ т)
T_5 , с	2,092	1,690
T_6 , с	0,966	1,176
x_1	0,456	0,394
$k_{\text{рег}}$	245 366	449 706
$T_{\text{рег}}$, с	0,278	0,246
$a_{\text{пр}}$	0,725	0,696
$a_{\text{пс}}$	0,275	0,247
$T_{\text{п}}$, с	168,4	242,8
a	$0,531 \cdot 10^{-6}$	$0,415 \cdot 10^{-6}$
S , кН	201,0	199,5
Δv , км/ч	0,315	0,217
$\Delta v_{\text{пер}}$, км/ч	0,217	0,091

Таким образом, рациональный подход к выбору параметров САУ скоростью локомотива грузового поезда и определение рациональных значений данных параметров позволяют существенно улучшить качество управления длинносоставным грузовым поездом.

Библиографический список

1. ГОСТ 33211—2014. Вагоны грузовые: требования к прочности и динамическим качествам. — М.: Стандартиформ, 2016. — 53 с.
2. Блохин Е. П. Расчеты и испытания тяжеловесных поездов / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Е. Л. Стамблер и др.; под ред. Е. П. Блохина. — М.: Транспорт, 1986. — 263 с.
3. Савоськин А. Н. Автоматизация электроподвижного состава: учебник для вузов ж.-д. трансп. / А. Н. Савоськин, Л. А. Баранов, А. В. Плакс и др.; под ред. А. Н. Савоськина. — М.: Транспорт, 1990. — 311 с.
4. Pudovikov O. E. Application of reference train model in automatic control system of freight-train speed / O. E. Pudovikov, S. V. Vespal'ko, M. D. Kiselev et al. // Russian Electrical Engineering. — 2017. — Iss. 9. — Pp. 563–567.
5. Жухин Н. О. Совершенствование алгоритмов управления движения длинносоставных грузовых поездов / Н. О. Жухин, О. Е. Пудовиков // Электротехника. — 2021. — № 9. — С. 41–46.
6. Блохин Е. П. Динамика поезда (нестационарные продольные колебания) / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин. — М.: Транспорт, 1982. — 222 с.
7. Жухин Н. О. Новые подходы к разработке систем автоматического управления скоростью длинносоставных грузовых поездов / Н. О. Жухин, О. Е. Пудовиков // Известия Транссиба. — 2020. — № 4. — С. 81–89.

8. Баранов Л. А. Критерии качества регулирования скорости поезда / Л. А. Баранов, А. Н. Савоськин, О. Е. Пудовиков // Мир транспорта. — 2009. — № 4. — С. 50–56.

9. Брахман Т. Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике / Т. Р. Брахман. — М.: Радио и связь, 1984. — 288 с.

10. Дехтяренко В. А. Методы многокритериальной оптимизации сложных систем при проектировании / В. А. Дехтяренко, Д. А. Своятыцкий. — Киев: АН УССР, 1976. — 41 с.

11. Пудовиков О. Е. Параметрический синтез системы автоматического управления скоростью движения грузового поезда / О. Е. Пудовиков // Транспорт: наука, техника, управление: научный информационный сборник. — 2010. — № 4. — С. 22–27.

12. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау; пер. с. англ. — М.: Мир, 1975. — 534 с.

Дата поступления: 08.02.2023

Решение о публикации: 28.02.2023

Контактная информация:

ЖУХИН Никита Олегович — аспирант; rzd1997@mail.ru

ЛЕГКАЯ Валерия Игоревна — студент; tiger.rut@yandex.ru

Parametric Synthesis Task Solution for Automatic Control Systems (ACS) by Speed of Long Freight Train

N. O. Zhukhin, V. I. Legkaya

Russian University of Transport, RUT (MIIT), 9, Obratsova str., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Zhukhin N. O., Legkaya V. I. Parametric Synthesis Task Solution for Automatic Control Systems (ACS) by Speed of Long Freight Train. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 170–182. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-170-182

Summary

Purpose: To consider the need for rational choice of the values of automatic control system (ACS) parameters by speed of long freight train locomotive under the condition of ACS management necessary quality provision. Choosing method to solve the task of ACS parametric synthesis and control quality indicators. Finding rational, from view of accepted system of management quality assessment, ACS parameters for trains of various mass and length. **Methods:** Methods of mathematical and simulation modeling, electric traction theory, automatic control theory, multi-criteria optimization. **Results:** At parametric synthesis task solution for considered by ACS speed, it's been indicated that the task's parameters depend on train length and its mass. Analytical dependences, establishing functional connection between train car mass and ACS parameters by speed, have been found. **Practical significance:** The obtained dependences can be realized in the form of adapter as a part of automatic control system, allowing to embody operative setting of ACS parameters in dependence of train car average mass.

Keywords: Train dynamics, long freight train, optimization methods, multi-criteria optimization, parametric synthesis, quality indicators, speed controller, automatic speed control system.

References

1. GOST 33211—2014. *Vagoni gruzovye: trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [GOST 33211—2014. Freight cars: requirements for strength and dynamic qualities]. Moscow: Standartinform Publ., 2016, 53 p. (In Russian)
2. Blochin E. P., Manashkin L. A., Stambler E. L. *Rascheti i ispitaniya tyajelovesnih poezdov* [Calculations and tests of heavy trains]. Moscow: Transport Publ., 1986, 263 p. (In Russian)
3. Savos'kin A. N., Baranov L. A., Plaks A. V. et al. *Avtomatizatsiya elektropodvizhnogo sostava* [Automation of Electric Rolling Stock]. Moscow: Transport Publ., 1990, 311 p. (In Russian)
4. Pudovikov O. E., Beshpal'ko S. V., Kiselev M. D. et al. Application of reference train model in automatic control system of freight-train speed. *Russian Electrical Engineering*. 2017, Iss. 9, pp. 563–567.
5. Zhukhin N. O., Pudovikov O. E. Sovershenstvovaniye algoritmov upravleniya dvizheniya dlinnosostavnykh gruzovykh poyezdov [Improvement of traffic control algorithms for long freight trains]. *Electrotechnica* [The journal of electrical engineering]. 2021, Iss. 9, pp. 41–46. (In Russian)
6. Blochin E. P., Manashkin L. A., *Dinamika poyezda* [Train dynamics]. Moscow: Transport Publ., 1982, 222 p. (In Russian)
7. Zhukhin N. O., Pudovikov O. E. Novyye podkhody k razrabotke sistem avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu dlinnosostavnykh gruzovykh poyezdov [New approaches to the development of automatic speed control systems for long-distance trains]. *Izvestiya Transsiba* [Journal of Transsib Railway Studies]. 2020, Iss. 4(44), pp. 81–89. (In Russian)
8. Baranov L. A., Savos'kin A. N., Pudovikov O. E. Kriterii kachestva regulirovaniya skorosti poyezda [Criteria for the quality of train speed control]. *Mir transporta* [World of transport and transportation]. 2009, Iss. 4, pp. 50–56. (In Russian)
9. Brakhman T. R. *Mnogokriterial'nost' i vybor al'ternativy v tekhnike* [Multi-criteria and the choice of alternatives in technology]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1984, 288 p. (In Russian)
10. Dekhtyarenko V. A., Svoiyatytskiy D. A. *Metody mnogokriterial'noy optimizatsii slozhnykh sistem pri proyektirovanii* [Methods of multicriteria optimization of complex systems in design]. Kiyev: AN USSR Publ., 1976, 41 p. (In Russian)
11. Pudovikov O. E. Parametricheskiy sintez sistemy avtomaticheskogo upravleniya skorost'yu dvizheniya gruzovogo poyezda [Parametric synthesis of the automatic control system for the speed of a freight train]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: Science, equipment, management: Scientific information collection]. 2010, Iss. 4, pp. 22–27. (In Russian)
12. Khimmel'blau D. *Prikladnoe nelineynoe programmirovaniye; per. s. angl.* [Applied non-linear programming; translation from English]. Moscow: Mir Publ., 1975, 534 p.

Received: February 08, 2023

Accepted: February 28, 2023

Author's information:

Nikita O. ZHUKHIN — Postgraduate Student; rzd1997@mail.ru

Valeria I. LEGKAYA — Student; tiger.rut@yandex.ru

Совершенствование методики расчета крепления колесной техники на открытом железнодорожном подвижном составе

В. А. Болотин, К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин, Н. Г. Янковская, А. Д. Иванова

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Болотин В. А., Ковалев К. Е., Новичихин А. В., Янковская Н. Г., Иванова А. Д. Совершенствование методики расчета крепления колесной техники на открытом железнодорожном подвижном составе // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 183–196. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-183-196

Аннотация

Цель: Рассмотрены вопросы обеспечения безопасности и сохранности перевозки колесной техники на открытом подвижном железнодорожном составе. Установлено, что существующая методика расчета не в полной мере учитывает взаимодействие элементов крепления с колесной техникой, размещенной в вагоне, а также отсутствие или невключение тормозов (неисправное состояние тормозной системы). Предложена новая расчетная схема для определения нагруженности элементов крепления колесной техники, не противоречащая существующим нормативным документам. **Методы:** Применены методы анализа и синтеза, методы теоретической механики. **Результаты:** Усовершенствована методика расчета крепления колесной техники на открытом подвижном составе, учитывающая незаторможенное состояние колес. **Практическая значимость:** Предлагаемая методика расчета крепления незаторможенной колесной техники на открытом подвижном составе учитывает параметры коэффициента трения колеса, расположение и расчетные усилия в растяжках. Методика прошла апробацию при перевозках колесной техники со станций Октябрьской железной дороги филиала ОАО «РЖД».

Ключевые слова: Железнодорожный транспорт, открытый подвижной состав, колесная техника, крепление, расчетная схема, методика расчета.

Введение

К колесной технике относятся автомобили, прицепы, дорожные, строительные, грузоподъемные и погрузочно-разгрузочные машины, катки. Колесная техника в большинстве случаев перевозится на универсальных платформах и располагается, как правило, вдоль продольной оси вагона. Размещение колесной техники на платформах с точки зрения безопасности перевозки и сохранности груза наиболее уязвимо, поскольку перевозки выполняются при опущенных боковых бортах платформы или борта отсутствуют вовсе. При таких перевозках крепление грузов должно быть надежным, что закладывается в процессе его проектирования. Особенностью перевозки колесной техники является также ее закрепление от перекатывания.

Порядок размещения и крепления техники на колесном ходу на открытом подвижном составе (ОПС) Российских железных дорог устанавливается положениями «Технических условий размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах ТУ» [1].



Рис. 1. Размещение и крепление колесной техники на платформе

При перевозках по железным дорогам колеи 1520 мм стран — участниц Соглашения о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) требования к размещению и креплению грузов регламентируют «Технические условия размещения и крепления грузов (приложение 3 к СМГС)» [2].

Для перевозки конкретного вида колесной техники необходимо разрабатывать технологическую документацию по размещению и креплению ее на платформе (НТУ), включающую схему размещения и крепления и расчетное обоснование схемы.

Для крепления колесной техники на платформах согласно [1] используются проволочные растяжки, продольные и поперечные упорные деревянные брусья, деревянные подставки (рис. 1).

Наиболее ответственными процессами, от которых зависит безопасность перевозки и сохранность груза, являются процесс разработки и согласования НТУ, монтаж элементов крепления, приемка к перевозке погруженного вагона с закрепленной техникой работниками станции, а также качество крепежных материалов [3].

Состояние вопроса

В пути следования возможно снижение давления в колесах, нарушение заторможенности колес. Это приводит к оседанию колес, ослаблению растяжек, начинает проявляться не предусмотренный в расчетах крепления процесс перекатывания колес, и закладываемые в расчеты коэффициенты трения скольжения колес по полу вагона уже не проявляются.

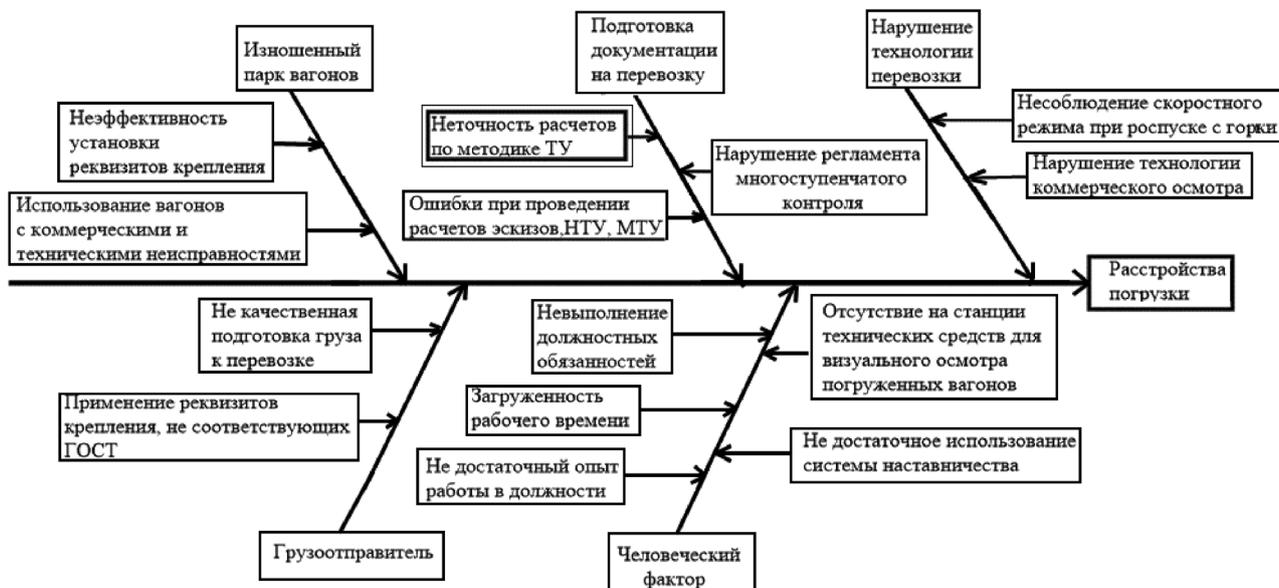


Рис. 2. Факторы, влияющие на отцепки вагонов по причине расстройств погрузки грузов

Как показал анализ отчетных данных по регистрации выявленных коммерческих неисправностей на сети железных дорог [4, 5], свыше 50 % коммерческих неисправностей приходится на расстройство погрузки, вызванное смещением и нарушением устойчивости груза в вагоне. При этом более 25 % случаев связано с нарушениями технических условий погрузки и крепления груза в вагоне. Исследования, выполненные на Восточно-Сибирской железной дороге в 2019–2021 гг. [6], показали, что более 30 % расстройств погрузки связано с нарушениями требований размещения и крепления грузов в вагонах, в том числе вызванных некорректными расчетами.

Коммерческие неисправности, связанные с расстройством погрузки, зависят от многих факторов, которые можно разделить на пять групп (рис. 2):

- подготовка документации на перевозку. Ошибки, допущенные при разработке документации или принятые неверно параметры (например, коэффициент трения), могут привести в дальнейшем к расстройству крепления. По данным [5], до 10 % расстройств погрузки происходят вследствие нарушения регламента многоступенчатого контроля при рассмотрении и утверждении погрузочной документации;

- состояние подвижного состава. Так, при использовании для перевозки колесной техники платформы с изношенным полом снижается несущая способность гвоздевого крепления, предусмотренная расчетом;

- факторы, возникающие по вине грузоотправителей. Некачественная подготовка груза к перевозке (в частности, затормаживание колес техники), использование реквизитов крепления, не соответствующих погрузочной документации (меньший диаметр проволоки, меньшая высота бруска), использование материалов

для крепления, не соответствующих ГОСТ (дерево более низкого, чем требуется, сорта);

– нарушения технологии перевозки. Контроль при приемке погруженной техники к перевозке и контроль состояния погрузки в пути следования при коммерческом осмотре. Существенным фактором является нарушение скорости соударения вагонов на сортировочных горках;

– человеческий фактор. Так, загруженность персонала, недостаточный уровень подготовки и другие факторы также могут стать причиной нарушений погрузки колесной техники. Человеческий фактор имеет место на всех этапах доставки груза.

Анализ факторов показывает, что уже на этапе разработки технологической документации (НТУ) могут быть созданы предпосылки к возникновению расстройств крепления груза в вагоне. В связи с этим на этапе подготовки перевозки важно избежать применения несовершенных или непроверенных методик расчета. В современных условиях перечисленные факторы нарушений должны контролироваться и управляться на основе цифровых технологий [7, 8].

Анализ существующей методики расчета размещения и крепления грузов в вагонах [1, 2] показывает, что отсутствуют указания по учету особенностей поведения колесной техники при перевозке. При расчетах заторможенной колесной техники ее принимают как груз с плоской опорой. При этом существенное влияние оказывает принимаемая величина коэффициента трения заторможенных колес по полу вагона. В работе [1], на основании которой производятся расчеты, не учитывают поведение колесной техники с приспущенными колесами, когда техника имеет большую подвижность и трение колес по полу вагона уже не удерживает ее от продольных смещений. При возможном нарушении в пути следования заторможенности колес возникает вероятность качения шин по полу вагона и деформация шин, поэтому они

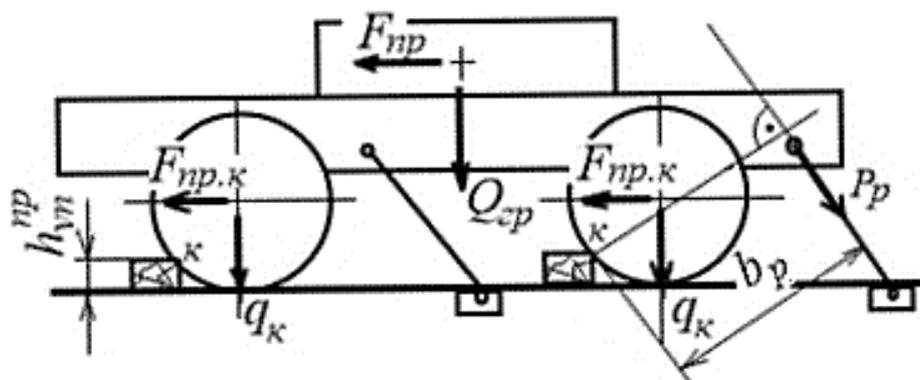


Рис. 3. Обобщенная расчетная схема крепления колесной техники на платформе от продольных смещений

требуют особенного тщательного закрепления от перекатывания через упорные бруски вдоль вагона.

Таким образом, техника на колесном ходу обладает рядом свойств, которые необходимо обязательно учитывать при их перевозке [9, 10], а также при разработке способов погрузки и крепления на открытый подвижной состав. Это определяет необходимость проведения дополнительных исследований с целью выбора и расчета рационального и надежного крепления колесной техники на открытом подвижном составе.

В работах [11–13] предложены усовершенствованные методики расчета элементов крепления колесной техники на платформе, базирующиеся на математических моделях взаимодействия груза и вагона. Однако эти методики являются сложными для практического применения и отсутствуют материалы, подтверждающие их достоверность на базе практического опыта перевозок.

Предложения по корректировке методики расчета

Предлагается усовершенствованная методика расчета элементов крепления колесной техники на платформе, базирующаяся на основных положениях [1], учитывающая возможность перекатывания колес относительно упорных брусьев. Высота упорных брусьев колес согласно [1] принимается в зависимости от диаметра колеса. Как показывает анализ, их высота не обеспечивает устойчивость колес от перекатывания, поэтому в методике расчета параметров растяжек это обстоятельство необходимо учитывать. Следовательно, растяжки препятствуют не смещению, а перекатыванию колес относительно упоров. Обобщенная расчетная схема крепления колесной техники на платформе от продольного смещения приведена на рис. 3.

Согласно приведенной расчетной схеме продольная инерционная сила $F_{пр}$, действующая на груз, прикладывается к осям колес в виде силы, приведенной к оси колеса $F_{пр.к}$, и вызывает их перекатывание относительно точки упора K . От перекатывания колеса удерживаются силой тяжести груза $Q_{гр}$, передаваемой на оси колес в виде сил q_k , и моментом сил, создающимся расчетным усилием в растяжке P_p на плече b_p .

Предлагаемый подход к построению расчетной схемы не противоречит действующей методике расчета цилиндрических грузов от перекатывания, приведенной в [1]. Следовательно, результаты расчета по такой методике могут применяться на практике без дополнительного теоретического и экспериментального обоснования.

Традиционно закрепление деревянных упорных брусьев к полу платформы осуществляется гвоздями. Согласно существующей методике [1] расчетная схема для гвоздевого крепления упорных брусьев перекатываемого колеса приведена на рис. 4.

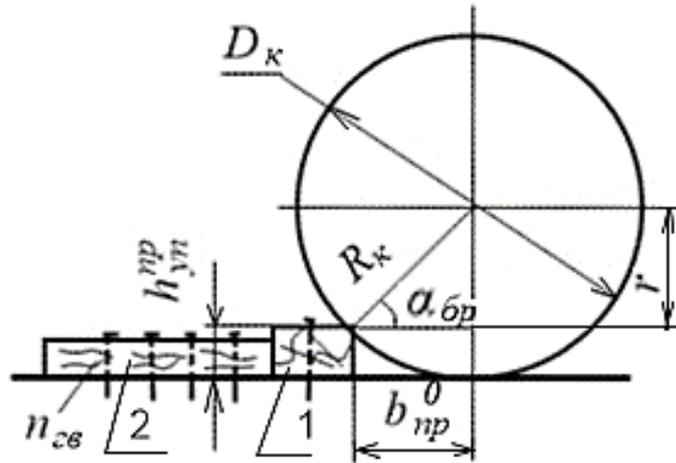


Рис. 4. Расчетная схема для определения количества гвоздей, закрепляющих упорные брусья под колесом к полу платформы:
 1 — брус упорный поперечный; 2 — брус упорный продольный

Расчетное количество гвоздей, которыми закрепляются упорные брусья, определяется по формуле:

$$n_{гв} = \frac{F_{пр} (1 - \mu_{бр} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{бр})}{n_{бр} \cdot R_{гв}};$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{r}{b_{пр}^{0}}; \quad r = R_k - h_{уп}^{np}; \quad R_k = 0,5 \cdot D_k; \quad b_{пр}^0 = \sqrt{R_k^2 - (R_k - h_{уп}^{np})^2},$$

где $F_{пр}$ — продольная инерционная сила, действующая на груз, кг;

D_k, R_k — соответственно диаметр и радиус колеса, м;

$h_{уп}^{np}$ — высота упорного бруса, в который упирается колесо, м;

r — расстояние от горизонтальной оси колеса до точки касания с упорным брусом, м;

$b_{пр}^0$ — расстояние от проекции центра колеса на пол вагона до точки касания колеса с упорным брусом м;

$\alpha_{бр}$ — угол наклона нормальной силы давления на упорный брус к горизонтальной плоскости пола вагона;

$\mu_{бр}$ — коэффициент трения между упорным брусом и опорной поверхностью (полом вагона);

$n_{бр}$ — общее количество упорных брусьев, закрепляющих колеса груза от перекачивания;

$R_{гв}$ — нормируемая нагрузка на один гвоздь, которым прибиваются брусья, кг.

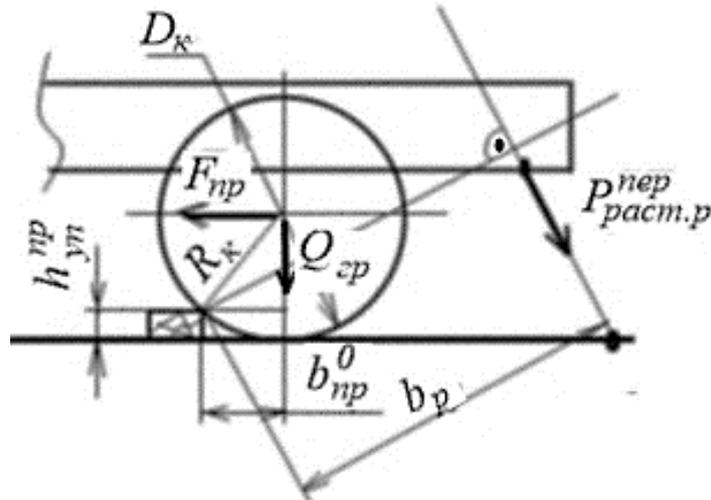


Рис. 5. Расчетная схема для определения усилия в растяжках от перекатывания колес груза в продольном направлении

Как правило, расчетное количество гвоздей равномерно распределяется по продольным упорным брускам (рис. 3). В поперечные упорные брусья, в которые упираются колеса, технологически забивку гвоздей осуществить сложно. Поэтому гвозди, забиваемые в упорный брус под колесом, являются дополнительными и в расчет крепления не входят.

Согласно п. 10.5.8 [1] в тех случаях, когда крепление цилиндрического груза от перекатывания осуществляется только упорными брусками, допускается наряду с брусками применение обвязок или растяжек. Анализируя схемы крепления колесной техники, во всех схемах, помимо упорных брусков, техника закрепляется растяжками. Отсюда следует вывод, что гвоздевое крепление удерживает колесную технику только от смещения, а от перекатывания через упорные брусья под колесами будут удерживать растяжки. Расчетная схема для определения усилия в растяжках от перекатывания груза в продольном направлении приведена на рис. 5.

Усилие в растяжке определяется из рассмотрения суммы моментов сил, стремящихся перекатить колесо относительно точки его контакта с упорным брусом, и моментов усилия в растяжке относительно этой же точки:

$$P_{\text{раст.р}}^{\text{пер}} = \frac{1,25 \cdot F_{\text{нр}} \left(\frac{D_{\text{к}}}{2} - h_{\text{упнр}} \right) - Q_{\text{гр}} \cdot b_{\text{нр}}^0}{n_{\text{р}} \cdot b_{\text{р}} \cdot \cos \gamma_{\text{р}}},$$

где $Q_{\text{гр}}$ — сила тяжести груза, кг;

$b_{\text{р}}$ — расстояние от точки контакта колеса с упорным брусом до линии проекции растяжки на вертикальную плоскость, проходящую через продольную ось вагона;

$\gamma_{\text{р}}$ — угол между растяжкой и проекцией на вертикальную продольную плоскость, град.

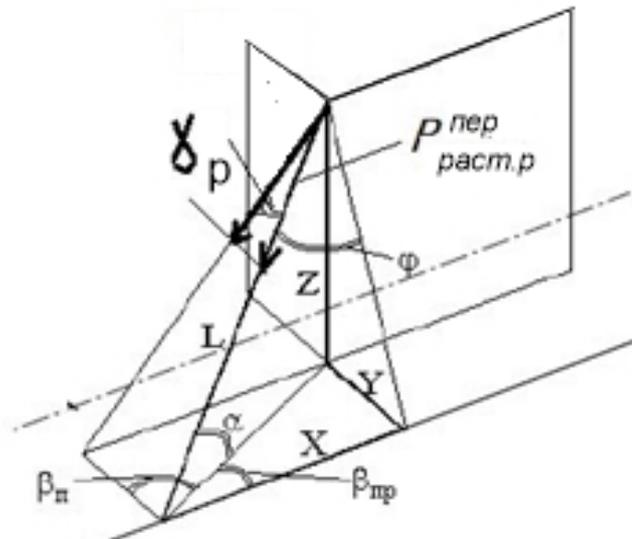


Рис. 6. Схема к расчету угла расположения растяжки γ_p

Схема к определению угла γ_p приведена на рис. 6.

Определение усилия в обвязке (растяжке) от перекатывания цилиндрического груза рассчитывается по формуле:

$$R_{пр}^{об} = \frac{1,25 \cdot F_{пр} \left(\frac{D_k}{2} - h_{уп}^{пр} \right) - Q_{гр} \cdot b_{пр}}{n_p \cdot b_p}$$

В качестве примера представлен расчет параметров крепления на платформе сварочного агрегата АС-81 (рис. 7) с использованием положений предлагаемой уточненной методики расчета.



Рис. 7. Размещение сварочного агрегата АС-81 на ж. д. платформе

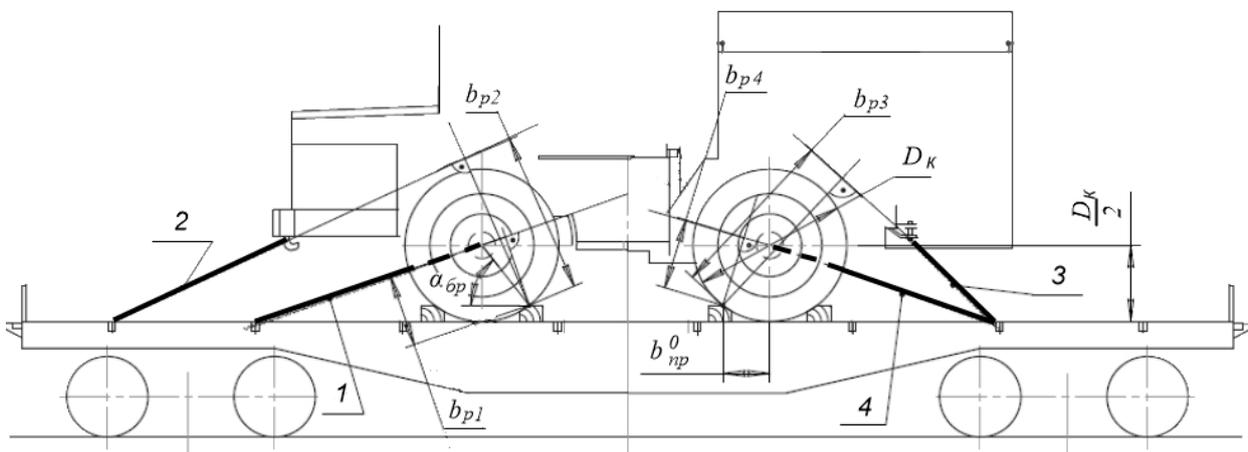


Рис. 8. Расчетная схема для определения расчетных плеч b_p расположения растяжек

Геометрические параметры расположения растяжек

Параметры растяжки	Размерность	Позиция растяжки			
		1	2	3	4
$n_{p,i}$	шт.	2	2	2	2
$b_{p,i}$	м	800	1750	1700	800
$\gamma_{p,i}$	град.	21	25	46	21
$P_{\text{раст.п}}^{\text{пер}}$	кг	2186		2645	

Сварочный агрегат АС-81 смонтирован на шасси трактора «Кировец». Длина агрегата — 8200 мм, масса — 23 тонны, диаметр колеса — 1,7 м. На платформе агрегат размещен симметрично продольной и поперечным осям вагона. Колеса подкреплены продольными упорными брусками сечением 0,15 × 0,15 м, по два на каждое колесо, общее число брусков равно 8. Дополнительно от продольных и поперечных смещений агрегат закреплен по концам четырьмя растяжками из проволоки диаметром 6 мм.

Величина продольной инерционной силы, действующей на груз, определена по формулам методики главы 1 ТУ и равна $F_{\text{пр}} = 25\,910$ кг.

Упорные бруска должны быть закреплены от смещения при накатывании на них колес по приведенной выше формуле. В расчетах приняты:

– коэффициент трения деревянного упорного бруса по деревянному полу платформы — 0,45;

– угол наклона нормальной силы давления на упорный брус к горизонтальной плоскости пола вагона $\alpha_{\text{бр}} = 52$ град.;

– расстояние от проекции центра колеса на пол вагона до точки касания колеса с упорным бруском $b_{\text{пр}}^0 = 0,5$ м;

– нормативная нагрузка на гвоздь диаметром 6 мм принимается равной 108 кг. Расчетное количество гвоздей для закрепления одного упорного бруса составляет $n_{ГВ} = 12,7$ шт. Крепление каждого упорного бруса принимается 14 гвоздями 6×200 мм.

Расчетная схема для определения усилий в растяжках приведена на рис. 8.

Величина расчетного усилия в растяжке от перекатывания определяется с учетом угла между растяжкой и ее проекцией на вертикальную продольную плоскость с учетом количества i типов растяжек по формуле:

$$P_{\text{раст.р}}^{\text{пер}} = \frac{1,25 F_{\text{пр}} \left(\frac{D_{\text{к}}}{2} - h_{\text{уп}}^{\text{пр}} \right) - Q_{\text{гр}} \cdot b_{\text{пр}}^0}{\sum_1^n n_{\text{р.и}} \cdot b_{\text{р.и}} \cdot \cos \gamma_{\text{р.и}}}$$

Геометрические параметры расположения растяжек и расчетные усилия в растяжках приведены в таблице.

Как указано выше, растяжки выполнены из проволоки диаметром 6 мм. Учитывая допустимую нагрузку на одну нить проволоки 310 кг, приходим к выводу, что растяжки поз. 1 и 2 необходимо изготавливать в 8 нитей. Несущая способность такой растяжки — 2480 кгс. Расчетная нагрузка в растяжках поз. 3 и 4 превосходит допустимую 2480 кг, что указывает на необходимость установки дополнительной пары растяжек для обеспечения закрепления груза от продольных смещений в сторону капота.

Заключение

Предложена усовершенствованная методика расчета элементов крепления колесной техники, которая учитывает особенности взаимодействия колес с упорными брусками (приспущенные колеса, недостаточно или полностью незаторможенные), когда принимаемые по существующей методике коэффициенты трения колес по полу вагона не реализуются. Расчетные усилия в растяжках определяются из условия отсутствия перекатывания колес через упорные бруска.

Предложенная методика прошла апробацию на Октябрьской железной дороге (филиал ОАО «РЖД») при подготовке и согласовании технологической документации на перевозку различных видов колесной техники: мотовоз МПТ-6 (ТУП05.17-719 00.000), стреловой автокран КС4571 (ТУП07.16-710 00.000), колесный трактор К-700Т (ТУП07.15-696.00.000).

Основные положения методики расчета элементов крепления колесной техники в вагоне рекомендованы для включения в планируемую к разработке в ЦФТО ОАО «РЖД» цифровую платформу «Автоматизированная система разработки НТУ размещения и крепления груза в вагоне» и ее составную часть «Интеллектуальный помощник» [13].

Библиографический список

1. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах. — М.: Юртранс, 2003. — 544 с.
2. Приложение 3 к СМГС «Технические условия размещения и крепления грузов». — URL: <http://osjd.org/doco/public/ru>.
3. Нутович В. Е. Цифровое обеспечение и соблюдение технических условий размещения и крепления грузов / В. Е. Нутович // Мир транспорта. — 2018. — № 4. — С. 52–59.
4. Гришкова Д. Ю. Анализ причин возникновения коммерческих неисправностей на сети железных дорог Российской Федерации / Д. Ю. Гришкова // Проблемы и перспективы экономики и управления: материалы VI Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, декабрь 2017 г.). — Санкт-Петербург: Свое издательство, 2017. — С. 215–219. — URL: <https://moluch.ru/conf/econ/archive/263/13499/> (дата обращения: 07.01.2023).
5. Тимухина Е. Н. Основные причины и технологические последствия коммерческих неисправностей вагонов с грузами на колесном ходу / Е. Н. Тимухина, А. А. Гордиенко // Транспорт Урала. — 2015. — № 2. — С. 32–37.
6. Власова Н. В. Декомпозиция основных бизнес-процессов и зоны формирования рисков железнодорожной транспортной системы в сфере грузовых перевозок / Н. В. Власова, В. А. Оленцевич // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2022. — № 4(63). — С. 44–52. — DOI: 10.52170/18159265_2022_63_44.
7. Болотин В. А. Совершенствование обеспечения сохранности и безопасности перевозки грузов на открытом подвижном составе на основе информационных технологий / В. А. Болотин, Н. Г. Янковская // Научные труды SWorld. — 2018. — Т. 1. — Вып. 53. — С. 68–77. — URL: <https://www.sworld.com.ua>.
8. Воробьев И. М. Конструктор формирования услуг доставки грузов железнодорожным транспортом на сети ОАО «РЖД» / И. М. Воробьев, А. В. Новичихин, К. Е. Ковалев // Автоматика на транспорте. — 2022. — Т. 8. — № 4. — С. 367–376. — DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-367-376.
9. Гордиенко А. А. Математическое моделирование взаимодействия шин колесной техники при ее перевозке и пола вагона / А. А. Гордиенко // Транспорт-2013: труды Международной научно-практической конференции. — Ростов-на-Дону: РГУПС, 2013. — С. 283–285.
10. Гордиенко А. А. Разработка методики оценки амплитуд вертикальных колебаний колесной техники, перевозимой на открытом подвижном составе / А. А. Гордиенко // Транспорт: Наука, техника, управление. — 2013. — № 5. — С. 64–68.
11. Туранов Х. Т. Пример расчета по новой методике гибких элементов крепления колесной техники при воздействии продольных сил / Х. Т. Туранов, Е. Д. Псеровская, А. А. Гордиенко // Транспорт: наука, техника, управление: научный информационный сборник. — 2014. — № 4. — С. 50–57.
12. Ситников С. А. Определение устойчивости колесной техники, перевозимой на платформе при наличии гибких элементов крепления / С. А. Ситников // Бюллетень науки и практики. — 2021. — Т. 7. — № 8. — С. 253–263.

13. Болотин В. А. Стратегия цифровизации подготовки проектных грузов к перевозке железнодорожным транспортом / В. А. Болотин, Н. Г. Янковская; ред. кол.: В. В. Щербаков (отв. ред.) и др. // Логистика: форсайт-исследования, профессия, практика: материалы III Национальной научно-образовательной конференции: в 2 ч. Ч. 1. — СПб.: СПбГЭУ, 2022. — С. 147–153.

Дата поступления: 07.02.2023

Решение о публикации: 27.02.2023

Контактная информация:

БОЛОТИН Валерий Алексеевич — канд. техн. наук; spb-vab@yandex.ru

КОВАЛЕВ Константин Евгеньевич — канд. техн. наук; kovalev@pgups.ru

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — д-р техн. наук, доц.; novitchihin@bk.ru

ЯНКОВСКАЯ Наталья Григорьевна — канд. техн. наук; spbng@rambler.ru

ИВАНОВА Анна Дмитриевна — ассистент кафедры; anutalutenko@gmail.com

Methodology Improvement to Calculate Wheeled Vehicles Bracing on Open Railway Rolling Stock

V. A. Bolotin, K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin, N. G. Yankovskaya, A. D. Ivanova

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Bolotin V. A., Kovalev K. E., Novichikhin A. V., Yankovskaya N. G., Ivanova A. D. Methodology Improvement to Calculate Wheeled Vehicles Bracing on Open Railway Rolling Stock. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 183–196. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-183-196

Summary

Purpose: The issues to provide safety and security of wheeled vehicles transportation on open rolling stock of railways are considered. It's been established that calculation method does not take into account fully the interaction of bracing elements with wheeled vehicles, placed in a car, as well as the absence or non-actuation of brakes (brake system faulty state). New calculated scheme is proposed for determining the loading of the elements of wheeled vehicles bracing that does not contradict existing regulatory documents.

Methods: Analysis and synthesis methods, theoretical mechanics methods were applied. **Results:** Improved methodology for calculating the bracing of wheeled vehicles on open rolling stock is proposed that takes into account wheels unbraked state. **Practical significance:** The proposed methodology for calculating the bracing of unbraked wheeled vehicles on open rolling stock takes into account the parameters of friction coefficient of a wheel, the placement and estimated effort in tie-rods. The methodology was tested during wheeled vehicles transportations from Oktyabrskaya railway stations of "Russian Railways" JSC branch.

Keywords: Railway transport, open rolling stock, wheeled vehicles, fastening, design scheme, calculation method.

References

1. *Tekhnicheskie usloviya razmeshcheniya i krepleniya gruzov v vagonakh i konteynerakh* [Technical conditions for the placement and securing of goods in wagons and containers]. Moscow: Yurtrans Publ., 2003, 544 p. (In Russian)
2. *Prilozhenie 3 k SMGS "Tekhnicheskie usloviya razmeshcheniya i krepleniya gruzov"* [Annex 3 to SMGS "Technical conditions for the placement and securing of goods"]. Available at: <http://osjd.org/doco/public/en>. (In Russian)
3. Nutovich V. E. Tsifrovoe obespechenie i soblyudenie tekhnicheskikh usloviy razmeshcheniya i krepleniya gruzov [Digital provision and compliance with the technical conditions for the placement and securing of goods]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2018, Iss. 4, pp. 52–59. (In Russian)
4. Grishkova D. Yu. *Analiz prichin vozniknoveniya kommercheskikh neispravnostey na seti zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii. Problemy i perspektivy ekonomiki i upravleniya: materialy VI Mezhdunar. nauch. konf. (g. Sankt-Peterburg, dekabr' 2017 g.)* [Analysis of the causes of commercial failures on the railway network of the Russian Federation. Problems and prospects of economics and management: materials of the VI Intern. scientific conf. (St. Petersburg, December 2017)]. St. Petersburg: Svoe izdatel'stvo Publ., 2017, pp. 215–219. Available at: <https://moluch.ru/conf/econ/archive/263/13499/> (accessed: July 01, 2022). (In Russian)
5. Timukhina E. N., Gordienko, A. A. Osnovnye prichiny i tekhnologicheskie posledstviya kommercheskikh neispravnostey vagonov s gruzami na kolesnom khodu [The main causes and technological consequences of commercial malfunctions of wagons with goods on wheels]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2015, Iss. 2, pp. 32–37. (In Russian)
6. Vlasova N. V., Olentsevich V. A. Dekompozitsiya osnovnykh biznes-protsessov i zony formirovaniya riskov zheleznodorozhnoy transportnoy sistemy v sfere gruzovykh perevozok [Decomposition of the main business processes and risk formation zones of the railway transport system in the field of freight transportation]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Railways]. 2022, Iss. 4(63). pp. 44–52. DOI: 10.52170/18159265_2022_63_44. (In Russian)
7. Bolotin V. A., Yankovskaya N. G. Sovershenstvovanie obespecheniya sokhrannosti i bezopasnosti perevozki gruzov na otkrytom podvizhnom sostave na osnove informatsionnykh tekhnologiy [Improving the safety and security of cargo transportation on open rolling stock based on information technology]. *Nauchnye trudy SWorld* [Scientific works of SWorld]. 2018, vol. 1, Iss. 53, pp. 68–77. Available at: <https://www.sworld.com.ua>. (In Russian)
8. Vorobyov I. M., Novichikhin A. V., Kovalev K. E. Konstruktor formirovaniya uslug dostavki gruzov zheleznodorozhnym transportom na seti OAO "RZhD" [Constructor for the formation of services for the delivery of goods by rail on the network of Russian Railways]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation]. 2022, vol. 8, Iss. 4, pp. 367–376. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-367-376. (In Russian)
9. Gordienko A. A. *Matematicheskoe modelirovanie vzaimodeystviya shin kolesnoy tekhniki pri ee perezozke i pola vagona. Transport-2013: trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Mathematical modeling of the interaction of tires of wheeled vehicles during its

transportation and the floor of the car. Transport-2013: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Rostov-on-Don: RSTU Publ., 2013, pp. 283–285. (In Russian)

10. Gordienko A. A. Razrabotka metodiki otsenki amplitud vertikal'nykh kolebaniy kolesnoy tekhniki, perevozimoy na otkrytom podvizhnom sostave [Development of a methodology for assessing the amplitudes of vertical oscillations of wheeled vehicles transported on an open rolling stock]. *Transport: Nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: Science, technology, management]. 2013, Iss. 5, pp. 64–68. (In Russian)

11. Turanov Kh. T., Pserovskaya E. D., Gordienko A. A. Primer rascheta po novoy metodike gibkikh elementov krepleniya kolesnoy tekhniki pri vozdeystvii prodol'nykh sil [An example of calculation by a new method of flexible fastening elements of wheeled vehicles under the influence of longitudinal forces]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection]. 2014, Iss. 4, pp. 50–57. (In Russian)

12. Sitnikov S. A. Opredelenie ustoychivosti kolesnoy tekhniki, perevozimoy na platforme pri nalichii gibkikh elementov krepleniya [Determination of the stability of wheeled vehicles transported on a platform in the presence of flexible fastening elements]. *Byulleten' nauki i praktiki* [Bulletin of Science and Practice]. 2021, vol. 7, Iss. 8, pp. 253–263. (In Russian)

13. Bolotin V. A., Yankovskaya N. G. *Strategiya tsifrovizatsii podgotovki proektnykh gruzov k perevozke zheleznodorozhnym transportom; red. kol.: V. V. Shcherbakov (otv. red.) i dr. Logistika: foresayt-issledovaniya, professiya, praktika: materialy III Natsional'noy nauchno-obrazovatel'noy konferentsii: v 2 ch. Ch. 1* [Digitalization strategy for the preparation of project cargo for transportation by rail; ed. coll.: V. V. Shcherbakov (responsible editor) and others. Logistics: foresight research, profession, practice: materials of the III National Scientific and Educational Conference: in 2 hours, Part 1]. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University of Economics Publ., 2022, pp. 147–153. (In Russian)

Received: February 07, 2023

Accepted: February 27, 2023

Author's information:

Valery A. BOLOTIN — PhD in Engineering; spb-vab@yandex.ru

Konstantin E. KOVALEV — PhD in Engineering; kovalev@pgups.ru

Alexey V. NOVICHIKHIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; novitchihin@bk.ru

Natalya G. YANKOVSKAYA — PhD in Engineering; spbng@rambler.ru

Anna D. IVANOVA — Assistant; anutalutenko@gmail.com

Динамические силы воздействия колеса на рельс при безбалластной конструкции пути RHEDA 2000

К. И. Иванова, А. Ф. Колос

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Иванова К. И., Колос А. Ф. Динамические силы воздействия колеса на рельс при безбалластной конструкции пути RHEDA 2000 // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 197–205. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-197-205

Аннотация

Цель: Экспериментальное определение вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс при безбалластной конструкции верхнего строения железнодорожного пути RHEDA 2000 с последующим анализом полученных данных; определение основных факторов, влияющих на величину вертикальной динамической силы; выявление зависимости изменения величины вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс от скорости движения и типа подвижного состава; расчет коэффициентов вертикальной динамики при безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 и их сравнение с коэффициентами вертикальной динамики балластного пути. **Методы:** Измерение вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс осуществлялось тензометрическим методом (методом Шлюмпфа). Численные значения величин, полученных в ходе эксперимента, обрабатывались методом математической статистики, в свою очередь, уровень вероятности принимался равным 0,994. **Результаты:** Определены величины вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс для безбалластной конструкции типа RHEDA 2000 при различных типах подвижного состава и различных диапазонах их скорости движения. Графически построена зависимость изменения величины вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс от скорости движения и типа подвижного состава. Выполнено сравнение коэффициентов вертикальной динамики безбалластной конструкции верхнего строения железнодорожного пути RHEDA 2000 с конструкцией пути на балласте. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы при проектировании, строительстве, реконструкции и ремонте железнодорожного пути, где предусматривается устройство безбалластного верхнего строения пути.

Ключевые слова: Безбалластный путь, вертикальные динамические силы, метод Шлюмпфа, безбалластная конструкция RHEDA 2000, тензометрический метод, коэффициент вертикальной динамики.

Введение

В настоящее время стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации нацелена на решение ряда существенных задач. Одной из наиболее актуальных является масштабное расширение сети скоростных и строительство новых высокоскоростных магистралей. Увеличение скоростей движения влечет за собой рост динамических нагрузок на используемую конструкцию верхнего строения пути. Для решения данной проблемы предлагается внедрение

новых конструкций верхнего строения пути. Опираясь на мировой опыт проектирования скоростных (140–200 км/ч) и высокоскоростных (200–400 км/ч) железных дорог, можно сделать вывод, что все большее предпочтение отдается применению безбалластных конструкций верхнего строения пути [1]. Несмотря на значительные капитальные вложения на этапе строительства, безбалластные конструкции имеют ряд существенных преимуществ по отношению к балластным конструкциям верхнего строения пути. Срок службы безбалластных конструкций в среднем составляет 50–60 лет, при значительном сокращении эксплуатационных расходов. Работа пути характеризуется фиксированным положением в плане, продольном и поперечном профиле, способствует повышению плавности хода подвижного состава, что обеспечивает комфортные условия для пассажиров и ведет к меньшему выходу из строя деталей подвижного состава [2].

Для выбора предпочтительной конструкции верхнего строения пути при конкретных условиях эксплуатации необходимо знать особенности динамического воздействия колеса на рельс. И если для пути на балласте величины вертикальных динамических сил, их зависимости от скорости движения и типа подвижного состава хорошо изучены, то для безбалластных конструкций, эксплуатируемых на территории Российской Федерации, такие исследования отсутствуют [3]. Таким образом, существует необходимость в экспериментальном измерении вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс для безбалластной конструкции, с последующим определением основных факторов, влияющих на их изменение.

Методы исследования

Натурные испытания по определению вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс проходили на линии Москва — Санкт-Петербург, экспериментальный участок располагался на II главном пути (пикет ПК 45 + 65,00) перегона Саблино — Тосно. Земляное полотно отсыпано из песка средней крупности, высотой 2,2 м. В основании расположены суглинки легкие пылеватые от твердых до пластичных. В качестве верхнего строения пути используется безбалластная конструкция RHEDA 2000 [4], армированная несущая бетонная плита которой опирается на фундаментную плиту, представленную гидравлически связанным бетонным слоем (ГСБС) толщиной 300 мм. Под ГСБС уложен защитный слой толщиной 400 мм из щебеночно-песчано-гравийной смеси специально подобранного гранулометрического состава (рис. 1) [5].

В ходе проведения испытаний на участке обращались пассажирские поезда с локомотивом ЭП2К, пригородные электропоезда типа ЭР, а также региональные скоростные электропоезда ЭС1 «Ласточка». Скорость движения подвижных составов варьировалась от 60 до 100 км/ч.

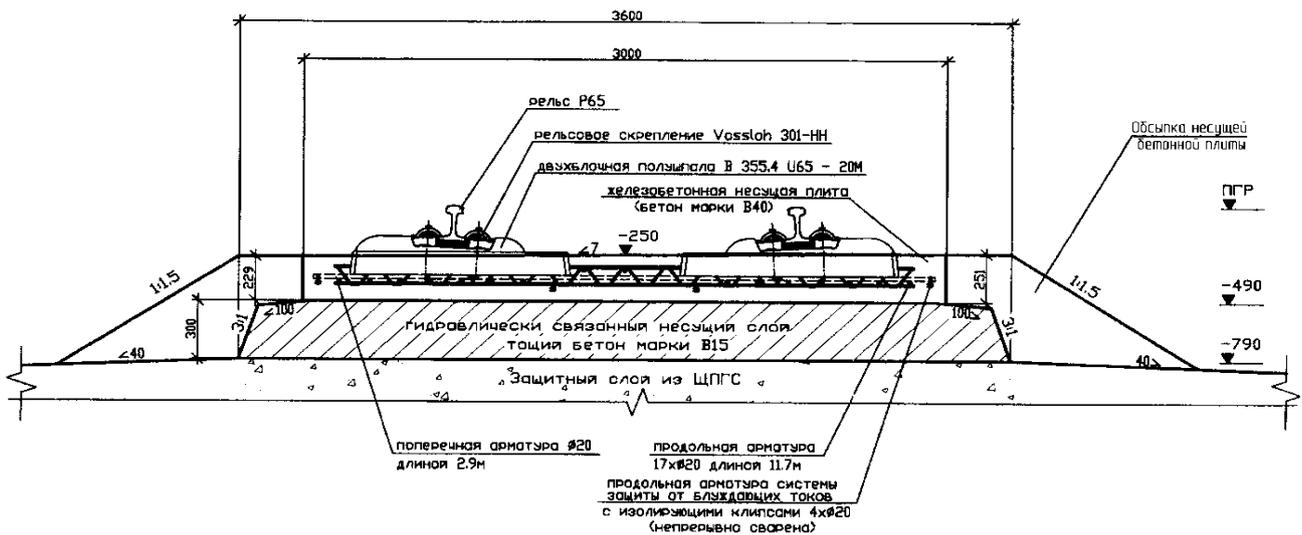


Рис. 1. Безбалластная конструкция RHEDA 2000, расположенная на экспериментальном участке

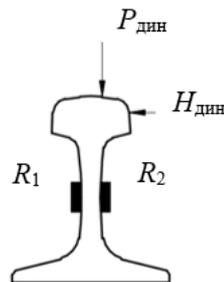


Рис. 2. Схема установки датчиков для измерения вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс:

$P_{\text{дин}}$ — вертикальная динамическая сила воздействия колеса на рельс;
 $H_{\text{дин}}$ — горизонтальная динамическая сила воздействия колеса на рельс;
 R_1 и R_2 — тензорезисторы

Наиболее апробированным и эффективным подходом, позволяющим решить задачу по определению вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс, является метод Шлюмпфа [6], суть которого заключается в том, что в измерительной схеме тензодатчики R_1 и R_2 [7] расположены на нейтральной оси шейки рельса с наружной и внутренней стороны так, что их продольные оси перпендикулярны нейтральной оси рельса. Тензодатчики были включены в схему моста таким образом, чтобы ток по диагонали моста был пропорционален абсолютному значению суммы деформаций рельса (рис. 2). Следовательно, можно утверждать, что при такой схеме подключения текущее значение силы тока пропорционально значению вертикальной динамической силы, действующей на рельс [8].

Учитывая, что число расчетных сечений на рельсе составило 8 и запись показаний всех тензорезисторов проводилась одновременно, появилась возможность определять значения вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс при различном положении осей подвижного состава относительно расчетных сечений в интересующий момент времени.

При камеральной обработке полученных данных учитывались следующие факторы:

1. Отдельный статистический ряд формировался из экспериментальных значений вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс при движении различных типов подвижного состава в заданном диапазоне скоростей.

2. От каждого типа подвижного состава при скорости движения, входящей в заданный диапазон скоростей, в статистический ряд включалась максимальная величина вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс.

3. В случае если скорость движения поезда отличалась более чем на 10 км/ч, полученные данные формировались в отдельный статистический ряд, соответствующий другому диапазону скоростей движения.

4. С помощью методов, основанных на теории математической статистики, определялся ряд интересующих показателей, таких как: максимально вероятное и среднее значение вертикальных динамических сил, действующих на рельс, среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации. Уровень вероятности принимался равным 0,994.

Результаты исследования

В результате натурных испытаний были определены значения вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс, представленные в таблице. Кроме того, для доказательства экспериментальных данных был проведен расчет вертикальных динамических сил по «Методике оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности» [9], где значения модуля упругости подрельсового основания U и коэффициента относительной жесткости подрельсового основания и рельса k принимались на основе ранее проведенных испытаний [10].

Исходя из полученных экспериментальных данных, на рис. 3 отображена полученная зависимость изменения значения вертикальных динамических сил от скорости движения и типа подвижного состава.

Анализ экспериментальных данных показывает, что вертикальные динамические силы воздействия колеса на рельс изменяются в достаточно узком диапазоне при различных скоростях движения, но существенно изменяются для разных типов подвижного состава, что вызвано различной нагрузкой на ось. Это свидетельствует о том, что при безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 основное влияние оказывает только нагрузка от подвижного состава, а изменение скорости движения от 60 до 100 км/ч не приводит к росту вертикальных динамических сил более чем на 5 %.

Вертикальные динамические силы воздействия колеса на рельс при безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000

Тип подвижного состава	Вертикальные динамические силы воздействия колеса на рельс при безбалластной конструкции RHEDA 2000, $P_{дин}$, кН*, в диапазоне скоростей движения поездов, км/ч (в числителе приведены значения, рассчитанные по «Методике оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности», в знаменателе — полученные экспериментально)							
	60–70	Разница, %	71–80	Разница, %	81–90	Разница, %	91–100	Разница, %
Локомотив ЭП2К	131,36 130,74	0,47	133,1 131	1,58	134,85 131,34	2,60	136,61 131,63	3,65
Пассажирский вагон	95,36 96,21	0,89	96,64 96,31	0,34	97,92 96,31	1,64	99,21 96,44	2,79
Электропоезд ЭР	95,36 96,29	0,98	96,65 96,55	0,10	97,94 96,7	1,27	99,25 97,35	1,91
Электропоезд	120,42 119,44	0,81	123,28 119,66	2,94	126,15 119,95	4,91	126,05 120,73	4,22

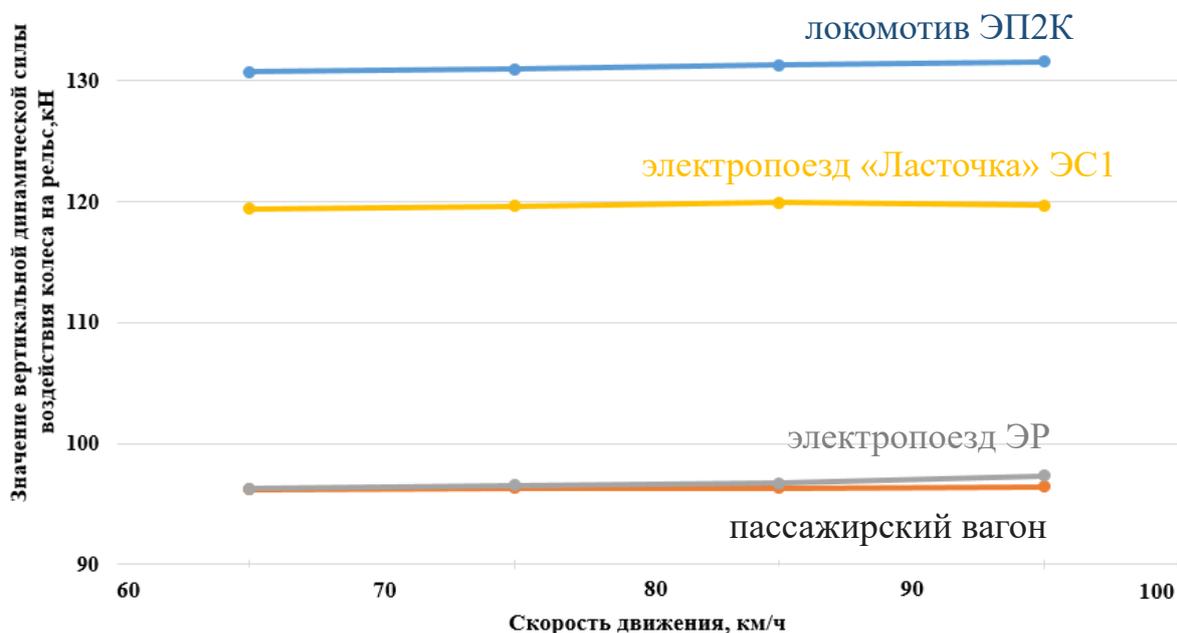


Рис. 3. Зависимости изменения величины вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс от скорости движения и типа подвижного состава

Помимо значений вертикальных динамических сил были рассчитаны коэффициенты вертикальной динамики для безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000, которые были сопоставлены с коэффициентами вертикальной динамики пути на балласте [11] при аналогичных скоростях движения и типах подвижного состава. Полученные зависимости приведены на рис. 4.

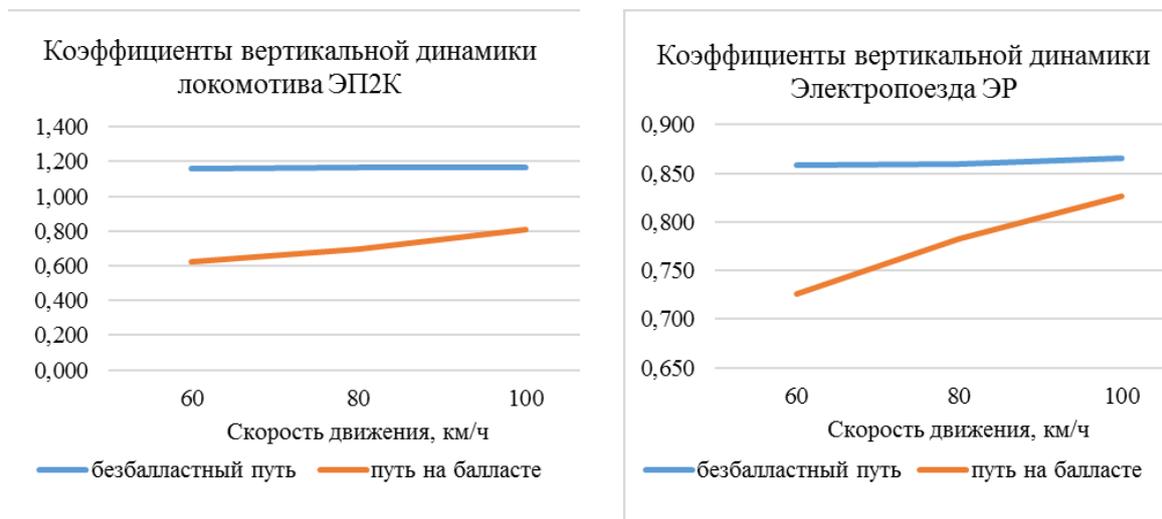


Рис. 4. Изменение величины коэффициентов вертикальной динамики в зависимости от скорости движения различных типов подвижного состава по безбалластному пути и пути на балласте

Исходя из графиков, приведенных на рис. 4, можно утверждать, что коэффициенты вертикальной динамики для безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 практически постоянны и не зависят от изменения скорости движения подвижного состава, в свою очередь, на балластной конструкции железнодорожного пути наблюдается рост значений коэффициента вертикальной динамики при увеличении скорости на каждые 10 км/ч.

В целом полученные результаты вертикальных динамических сил от скорости движения и типа подвижного состава, как видно из таблицы, обладают схожимостью, расхождение результатов, полученных экспериментальным путем, от расчетных значений не превышает 5 %. Следовательно, можно сделать вывод, что при безбалластной конструкции верхнего строения пути в исследуемом диапазоне скоростей можно использовать модель рельса как балки, лежащей на сплошном упругом основании, и для определения вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс можно использовать существующую методику [9] при известных значениях модуля упругости подрельсового основания U и коэффициента относительной жесткости подрельсового основания и рельса k , которые должны быть определены для каждой конструкции безбалластного верхнего строения пути.

Заключение

По полученным результатам экспериментального определения вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс при безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000, приведенным в данной статье, можно сделать следующие основные выводы:

1. Скорость движения подвижного состава не оказывает существенного влияния на изменение величины вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс.

2. Коэффициенты вертикальной динамики для безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 практически постоянны и не зависят от изменения скорости движения подвижного состава.

3. Значения, определенные экспериментально и путем расчета по известной методике, изменяются в пределах статистической погрешности, следовательно, для определения вертикальных динамических сил воздействия колеса на рельс можно использовать существующую «Методику оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности» при известных U и k .

Библиографический список

1. Новые типы безбалластного пути // Железные дороги мира. — 1999. — № 12.
2. Путь на плитном основании в Германии // Железные дороги мира. — М., 2006. — № 4. — С. 64–67.
3. Опыт разработки и эксплуатации безбалластного пути // Железные дороги мира. — 2005. — № 1. — С. 68–71.
4. Колос А. Ф. Проблемы эксплуатации безбалластной конструкции верхнего строения пути RHEDA 2000 на железнодорожной магистрали / А. Ф. Колос, Т. М. Петрова, А. А. Сидоренко // Техника железных дорог. — 2013. — № 2. — С. 42–47.
5. Третьяков В. В. Безбалластная конструкция RHEDA. Использование безбалластных конструкций на железных дорогах России / В. В. Третьяков, О. Ю. Белоцветова, И. Б. Петропавловская // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации земляного полотна железных дорог. Конференция МГУПС (МИИТ). — М., 2011. — С. 65–69.
6. Яковлева Т. Г. Железнодорожный путь: учеб. пособие / Т. Г. Яковлева, Н. И. Карпущенко, С. И. Клинов и др. — М.: Транспорт, 1999. — 213 с.
7. ГОСТ 21616-9. Тензорезисторы. Общие технические условия. 01.01.1992.
8. ГОСТ Р 55050—2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. ОАО «ВНИИЖТ», 01.07.2013.
9. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности. — Утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 22 декабря 2017 г. № 2706/р. — М.: ОАО «РЖД», 2017. — 97 с.
10. Колос А. Ф. Упругие характеристики подрельсового основания безбалластного железнодорожного пути / А. Ф. Колос, К. И. Иванова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2021. — Т. 18. — Вып. 4. — С. 469–479.
11. Ромен Ю. С. Установление условий обращения вагонов с увеличенной осевой нагрузкой / Ю. С. Ромен, А. М. Орлова, М. С. Тихов и др. // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. — 2013. — № 3(46).

Дата поступления: 12.01.2023

Решение о публикации: 25.02.2023

Контактная информация:

ИВАНОВА Ксения Игоревна — ассистент; kivanova@pgups.ru

КОЛОС Алексей Федорович — канд. техн. наук, доц.; kolos2004@inbox.ru

Dynamic Forces of Wheel Impact on Rail at Ballastless Track Structure RHEDA 2000

K. I. Ivanova, A. F. Kolos

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Ivanova K. I., Kolos A. F. Dynamic Forces of Wheel Impact on Rail at Ballastless Track Structure RHEDA 2000. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 197–205. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-197-205

Summary

Purpose: Experimental determination of vertical dynamic forces of wheel impact on a rail at ballastless construction of railway track RHEDA2000 upper structure with subsequent analysis of obtained data; definition of main factors affecting vertical dynamic force value; identification of dependence of change in the value of wheel vertical dynamic force impact on a rail from motion speed and rolling stock type; calculation of coefficients of vertical dynamics at ballastless construction of rail upper structure. **Methods:** Measurement of wheel vertical dynamic force impact on a rail was carried out by strain-gauge method (Schlumpf method). Numerical values of those, obtained in the course of experiment, were processed by mathematical statistics method, in its turn, probability level was taken equal to 0.994. **Results:** The values of vertical dynamic forces of wheel impact on a rail for ballastless structure of RHEDA2000 type at rolling stock different types and various ranges of motion speed have been determined. The dependence of change in the value of wheel vertical dynamic force impact on a rail from motion speed and rolling stock type has been graphically built. Comparison of vertical dynamics coefficients of ballastless construction of railway RHEDA2000 upper structure with the construction of a track on a ballast has been carried out. **Practical significance:** The obtained results can be used in projection, construction, reconstruction and repair of railway track where track ballastless upper composition is provided.

Keywords: Ballastless track, vertical dynamic forces, Schlumpf method, RHEDA2000 ballastless structure, strain gauge method, vertical dynamics coefficient.

References

1. Novye tipy bezballastnogo puti [New types of ballastless track]. *Zheleznnye dorogi mira* [Railways of the world]. 1999, Iss. 12. (In Russian)

2. Put' na plitnom osnovanii v Germanii [Path on a slab base in Germany]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world]. Moscow, 2006, Iss. 4, pp. 64–67. (In Russian)
3. Opyt razrabotki i ekspluatatsii bezballastnogo puti [Experience in the development and operation of a ballastless track]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world]. 2005, Iss. 1, pp. 68–71. (In Russian)
4. Kolos A. F., Petrova T. M., Sidorenko A. A. Problemy ekspluatatsii bezballastnoy konstrukt-sii verkhnego stroeniya puti RHEDA 2000 na zheleznodorozhnoy magistrali [Problems of operation of the ballastless structure of the RHEDA 2000 track superstructure on the railway line]. *Tekhnika zheleznykh dorog* [Railway engineering]. 2013, Iss. 2, pp. 42–47. (In Russian)
5. Tret'yakov V. V., Belotsvetova O. Yu., Petropavlovskaya I. B. *Bezballastnaya konstruktsiya RHEDA. Ispol'zovanie bezballastnykh konstrukt-siy na zheleznykh dorogakh Rossii. Sovremennye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zemlyanogo polotna zheleznykh dorog. Konferentsiya MGUPS (MIIT)* [The use of non-ballast structures on Russian railways. Modern problems of design, construction and operation of railway subgrade. Conference MGUPS (MIIT)]. Moscow, 2011, pp. 65–69. (In Russian)
6. Yakovleva T. G., Karpushchenko N. I., Klinov S. I. et al. *Zheleznodorozhnyy put': ucheb. posobie* [Railway way: tutorial]. Moscow: Transport Publ., 1999, 213 p. (In Russian)
7. *GOST 21616-9. Tenzorezistory. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [GOST 21616-9. Strain gauges. General specifications]. 01.01.1992. (In Russian)
8. *GOST R 55050—2012. Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav. Normy dopustimogo vozdeystviya na zheleznodorozhnyy put' i metody ispytaniy* [GOST R 55050—2012. Railway rolling stock. Norms of permissible impact on the railway track and test methods]. OAO “VNIIZhT”, 01.07.2013. (In Russian)
9. *Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti. Utv. Rasporyazheniem OAO “RZhD” ot 22 dekabrya 2017 g. № 2706/r* [Methodology for assessing the impact of rolling stock on the track in terms of ensuring its reliability. Order of Russian Railways OJSC dated December 22, 2017 № 2706/r]. Moscow: OAO “RZhD” Publ., 2017, 97 p. (In Russian)
10. Kolos A. F., Ivanova K. I. Uprugie kharakteristiki podrel'sovogo osnovaniya bezballastnogo zheleznodorozhnogo puti [Elastic characteristics of the under-rail foundation of a ballast-free railway track]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2021, vol. 18, Iss. 4, pp. 469–479. (In Russian)
11. Romen Yu. S., Orlova A. M., Tikhov M. S. et al. Ustanovlenie usloviy obrashcheniya vagonov s uvelichennoy osevoy nagruzkoy [Establishment of conditions for the circulation of wagons with increased axial load]. *Transport Rossiyskoy Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* [Transport of the Russian Federation. Journal of science, practice, economics]. 2013, Iss. 3(46). (In Russian)

Received: January 12, 2023

Accepted: February 25, 2023

Author's information:

Ksenia I. IVANOVA — Assistant; kivanova@pgups.ru

Alexey F. KOLOS — PhD in Engineering, Associate Professor; kolos2004@inbox.ru

Изменение количества отступлений рельсовой колеи после укладки геосинтетических материалов в подшпальное основание

Е. П. Дудкин, А. В. Петряев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Дудкин Е. П., Петряев А. В. Изменение количества отступлений рельсовой колеи после укладки геосинтетических материалов в подшпальное основание // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 206–215. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-206-215

Аннотация

Цель: Оценить влияние укладки геосинтетических материалов в подшпальное основание на геометрию рельсовой колеи. **Методы:** В работе использованы методы оценки геометрии рельсовой колеи вагонами-путеизмерителями. Для внеклассной высокоскоростной линии Санкт-Петербург — Москва и для грузонапряженной линии Москва — Смоленск — Минск были оценены параметры геометрии рельсового пути с уложенными в конструкцию подшпального основания геосинтетическими материалами и контрольными участками без геосинтетических материалов. Суммирующим показателем состояния геометрии была приведенная сумма отступлений (ПСО). **Результаты:** В первые год-два после ремонта, независимо от наличия геосинтетического материала, стабилизация пути идет одинаковыми темпами, и к третьему году эксплуатации уровень ПСО составляет в среднем 4,9 шт/км. Далее стандартная конструкция показывает нарастание ПСО и к 6 году достигает величины 6,9 шт/км, а затем уменьшается, что объясняется проведением среднего ремонта в этот период. Для пути с геосинтетическим материалом уровень ПСО неуклонно снижается и к 7–10 году достигает величины 3,45 шт/км. После четвертого года эксплуатации среднее значение балловой оценки для участков, усиленных геоматериалами, составляет не более 85 % от среднего балловой оценки участков пути без усиления. **Практическая значимость:** Стабилизация подшпального основания геосинтетическими материалами позволяет добиться равномерности осадки в продольном оси пути направлении, что, естественно, не будет приводить к существенному искажению продольного профиля и позволит снизить затраты на текущее содержание пути за счет сокращения числа выправочных работ примерно в два раза.

Ключевые слова: Подшпальное основание, стабилизация, геосинтетические материалы, вагоны-путеизмерители, приведенная сумма отступлений.

Введение

На железных дорогах, где вводятся большегрузные и высокоскоростные поезда, наблюдается увеличение количества и длины участков пути с ограничением скорости движения поездов. Появление этих участков во многих случаях связано с невозможностью обеспечить стабильность геометрии трассы.

В последнее время геосинтетические материалы все чаще используются для укрепления железнодорожного полотна. Преимущества усиления подшпального основания георешеткой были подчеркнуты рядом исследований [1–5]. Георешетки обладают значительной прочностью на разрыв, высоким модулем деформации (низкое относительное удлинение при разрыве), высокой устойчивостью к температурным, химическим и биологическим воздействиям и, благодаря этому, характеризуются длительным сроком службы [6–11]. Изменение во времени геометрии рельсовой колеи железнодорожного пути, стабилизированного геосинтетическими материалами, представляет значительный интерес.

Методы исследования

Влияние укладки геосинтетических материалов в подшпальное основание оценивалось вагонами-путеизмерителями. Оценка пути вагонами-путеизмерителями производилась согласно инструкции [12] с использованием программного продукта WAY.

Суммирующим показателем состояния геометрии служил показатель — приведенная сумма отступлений (ПСО). Расчет показателя ПСО выполнялся по формуле:

$$\text{ПСО} = \sum \text{II}_{\text{ст}} + 1,35 \cdot \sum \text{III}_{\text{ст}} + 1,71 \cdot \sum \text{IV}_{\text{ст}},$$

где $\sum \text{II}_{\text{ст}}$, $\sum \text{III}_{\text{ст}}$, $\sum \text{IV}_{\text{ст}}$ — это сумма отступлений второй, третьей и четвертой степени соответственно согласно оценке состояния геометрии рельсошпальной решетки [12].

Анализ динамики количества отступлений от норм содержания рельсовой колеи помогает выявлять проблемные места в подшпальном основании. Кроме оценки состояния пути по количеству отступлений от норм содержания, для оценки эффективности используется показатель «средний балл». Методика определения этого показателя также приведена в инструкции [12].

Исследования проводились на объектах Октябрьской железной дороги и Московской железной дороги. Перегоны были разделены на участки пути, не имеющие геосинтетических материалов в подшпальном основании (далее — стандарт), и участки пути, имеющие в подшпальном основании геосинтетические материалы на основной площадке (далее — усиленные участки).

Точкой отсчета изменений принят либо год последнего капитального ремонта, либо год последнего среднего ремонта пути. В оценке эффективности были использованы данные за период от года, следующего за годом последнего ремонта, до десятого года эксплуатации. На результаты исследования влияет то обстоятельство, что учет и хранение данных по форме ПУ32 ведется на участке пути и километр рассматривается как единое целое, геоматериалы же укладывались лишь в локальных местах.

Оценка состояния пути, стабилизированного геосинтетическими материалами, по данным вагонов-путеизмерителей

При анализе состояния объектов использовались 92 194 записи о состоянии геометрии рельсошпальной решетки.

Оценка состояния пути линии Санкт-Петербург — Москва с течением времени по показателю «приведенная сумма отступлений» (ПСО) для выделенных конструкций ВСП (стандарт и усиленные участки) представлена на рис. 1.

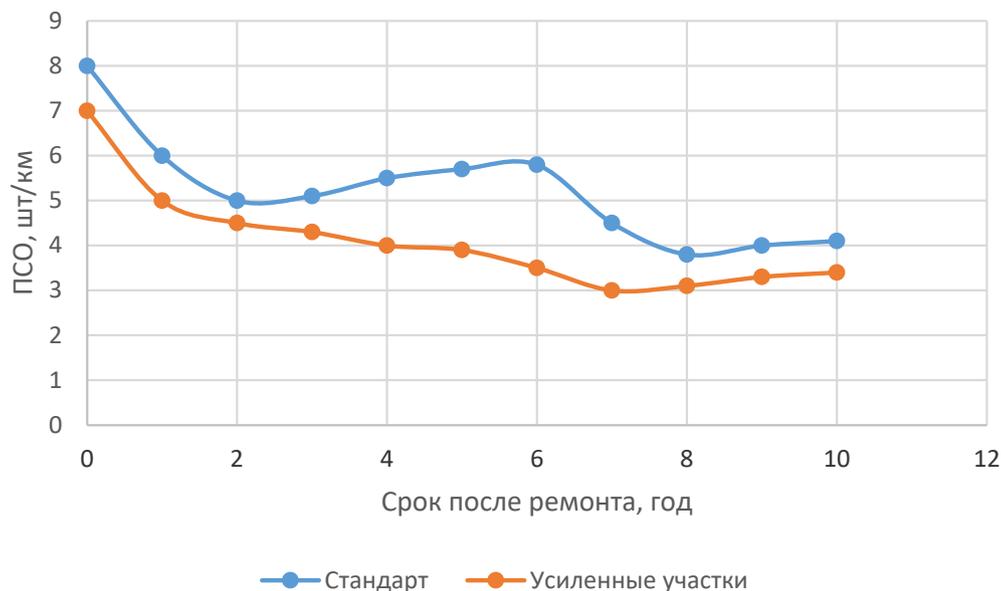


Рис. 1. Изменение средней величины ПСО

Анализ полученных результатов показывает, что общее количество отступлений, превышающих номинальные значения, в послеремонтный период неуклонно снижается. В первый год-два после ремонта, независимо от наличия геосинтетического материала, стабилизация пути идет одинаковыми темпами, и к третьему году эксплуатации уровень ПСО составляет в среднем 4,9 шт/км. Далее стандартная конструкция показывает нарастание ПСО и к 6 году достигает величины 6,9 шт/км, а затем уменьшается, что объясняется проведением среднего ремонта в этот период. Для пути с геосинтетическим материалом уровень ПСО неуклонно снижается, к 7 году достигает величины 3 шт/км и только после этого начинает возрастать, но оставаясь меньше чем на стандартном участке.

Таким образом, динамика изменения количества нештрафуемых отступлений выгодно отличает участки пути с геоматериалами. Количество отступлений от номинальных значений, регламентируемых инструкцией [12], для участков, где геосинтетический материал был уложен в процессе капитального ремонта, через семь-восемь лет эксплуатации настолько мало, что сравнимо с точностью измерений вагонов КВЛП.

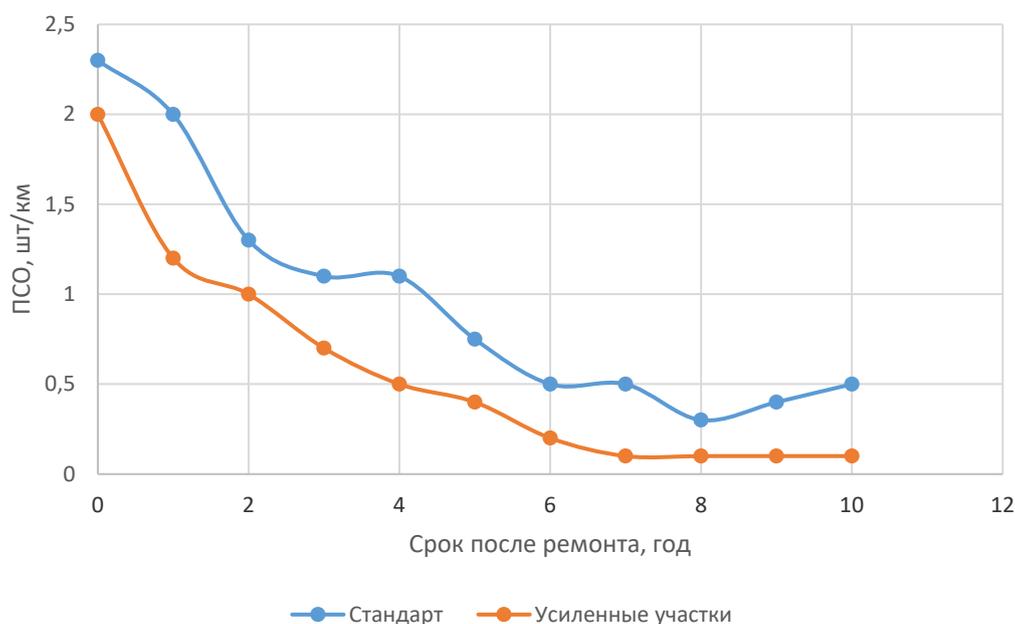


Рис. 2. Изменение среднего количества отступлений 3 степени по годам

Наличие штрафующих отступлений третьей степени в условиях внеклассной линии Санкт-Петербург — Москва относится к неисправностям, которые сразу возникли с амплитудой и длиной, определяющими опасность для движения поездов с установленными скоростями. Специфика содержания этой линии такова, что переход какой-либо неисправности второй степени в неисправность третьей степени практически полностью исключается. Графическое отражение динамики изменения штрафующих отступлений приведено на рис. 2.

На рис. 2 отчетливо виден эффект от укладки геоматериалов в подшпальном основании. Количество отступлений от норм содержания рельсовой колеи, которым присваивается 3 степень, на второй год послеремонтной эксплуатации настолько мало, что становится сравнимым с точностью измерений и оценки пути вагонами КВЛП. На участках без усиления подшпального основания геоматериалами такая степень стабилизации в условиях усиленного текущего содержания внеклассной линии достигается на четвертом году эксплуатации, когда уже требуются работы по приведению пути в нормативное состояние, вызванные нарастанием ПСО. Отступления третьей степени на участках, где были уложены геоматериалы, для первого года послеремонтной эксплуатации следует связывать со стабилизацией балластных материалов после технологии глубокой очистки щебня без снятия путевой решетки.

Дополнительным подтверждением большей стабильности пути с геоматериалами в подшпальном основании может служить зависимость, приведенная на рис. 3. При том что средняя величина балловой оценки неуклонно снижается благодаря усиленному текущему содержанию, соответствующему внеклассной линии, балловая оценка участков со стандартной конструкцией ВСП всегда выше,

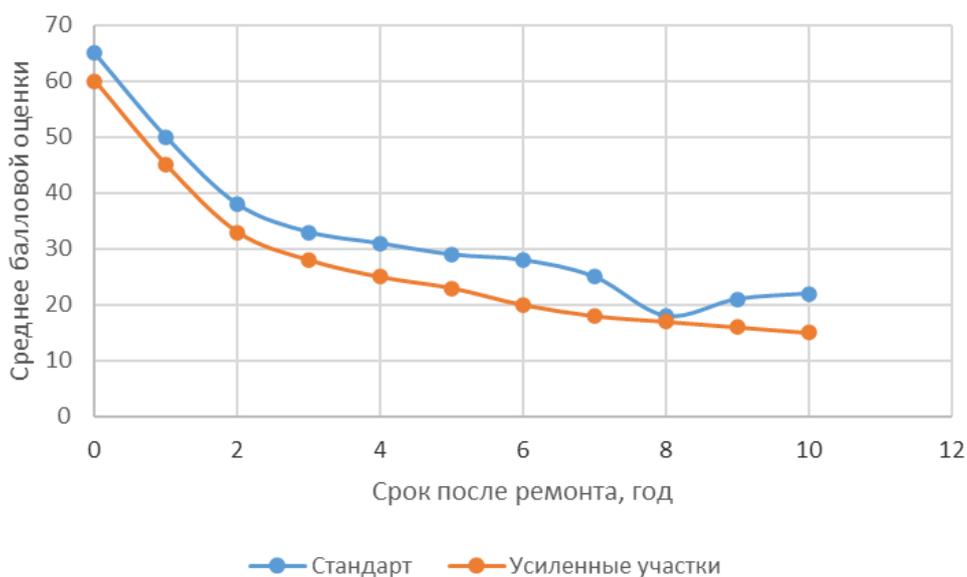


Рис. 3. Изменение средней балловой оценки по годам

чем участков с геоматериалами в основании балластной призмы. После четвертого года эксплуатации среднее значение балловой оценки для участков, усиленных геоматериалами, составляет не более 85 % от средней балловой оценки участков пути без усиления.

Для проверки результатов оценки применения геоматериалов на Октябрьской железной дороге была проведена оценка применения защитных геоматериалов на Московской железной дороге в условиях линии Москва — Смоленск — Минск.

Динамика изменения показателей состояния геометрии пути показала, что и для внеклассной высокоскоростной линии Санкт-Петербург — Москва и для грузонапряженной линии Москва — Смоленск — Минск характер изменения этих показателей одинаковый. Обобщенные результаты оценки состояния пути на участках укладки защитных геоматериалов на Московской железной дороге приведены в таблице.

Данные таблицы показывают, что применение геоматериалов характерно для проблемных участков пути. На участках, где применили геоматериалы, количество отступлений 3 степени в предремонтный год больше в 1,5–2,5 раза. Соответственно, и балловая оценка этих участков была больше в 1,3–1,6 раза по сравнению с теми, где оставили стандартную конструкцию ВСП.

Участки, на которых были уложены геоматериалы, демонстрируют большую стабильность рельсошпальной решетки. На пятый год после ремонта среднее балловой оценки для этих участков составляет 22–26 единиц, в сравнении с 40 единицами для участков со стандартной конструкцией ВСП. Наличие отступлений 3 степени для участков с геосинтетическими материалами характеризуется средней величиной 1,5 шт/10 км. Для пути со стандартной конструкцией ВСП эта величина составляет 2,3 шт/10 км, значения приведены на пятый год эксплуатации.

Изменение оценочных показателей до и после укладки геоматериалов

Период	Конструкция ВСП	
	стандарт	усиленные участки
	среднее показателя ПСО; шт/км	
в год перед ремонтом	53,2	50,2
на 5-й год после ремонта	20,2	14,1
соотношение, до/после	2,6	3,6
	среднее балловой оценки	
в год перед ремонтом	90	141
на 5-й год после ремонта	40	22
соотношение, до/после	2,3	6,4
	среднее количество отступлений 3степени; шт/10 км	
в год перед ремонтом	6,33	15,6
на 5-й год после ремонта	2,27	0,75
соотношение, до/после	2,8	20,8

Оценка состояния пути по данным нивелирования

В целях получения результатов, оценивающих влияние геоматериалов на осадку пути в период с апреля по октябрь, на опытном участке Октябрьской ж. д. были проведены пять нивелировок. Отсчеты снимались по обоим рельсовым нитям. Длина участка проведения работ составила 408 м. При этом усиленный участок располагался в центре. Таким образом, представлялось возможным оценить осадку пути на усиленном и на обычном участках.

Перед проведением нивелировок выполнялись следующие работы:

На местности закреплялось начало и конец участка нивелирования. Выбирались реперы вблизи пути. В качестве реперов принимались фундаменты опор контактной сети, высотное и плановое положение которых не изменяется во времени. В пределах участка на шейках рельсов краской размечались и нумеровались точки с интервалом через 10 шпал. Начало и конец участка наблюдений, точки нивелирования, реперы, места стоянок нивелира были привязаны к пикетажу линии. За условную отметку начального репера принималось значение 10 м.

Анализируя изменение отметок головок рельсов за период с 06.04 по 12.10, можно сделать следующий вывод: в интервалах времени между нивелировками 06.04 и 19.04, а также между 20.06 и 16.08 были проведены выправочные работы. Тогда величину осадки можно оценить по разнице абсолютных отметок между нивелировками 19.04 и 20.06, а также 16.08 и 12.10. На участке без усиления осадка в среднем составила 11 мм между 2 и 3 нивелировками и 20 мм между 4 и 5. Такая разница в значениях просянок может быть обусловлена разными временем, прошедшим между выправочными работами и проведенным нивелированием.

На усиленном геоматериалами участке осадка составила в среднем 8 мм для интервала между 2 и 3 нивелировкой и 7 мм для интервала между 4 и 5, что соответственно в 1,4 и в 2,9 раза меньше по сравнению с обычным участком пути. По результатам проведенных работ также видно, что между 2 и 3 нивелировками прошел 21 день, а между 4 и 5 — 51 день. Следовательно, можно сказать, что в среднем за один день путь садится на 0,46 мм на неусиленном отрезке пути и на 0,26 мм на усиленном. Таким образом, степень накопления осадок во времени на усиленном участке ниже, чем на обычном, в 1,8 раза.

Рассмотрев равномерность осадки пути по его длине, приходим к выводу, что на усиленном отрезке железнодорожной линии проявляется более равномерная осадка, чем на неусиленном. Действительно, в пределах обычного участка величина максимального отклонения от средней осадки составила 9 мм между 2 и 3 нивелировками и 22 мм между 4 и 5, что в 2,4 раза выше. Следовательно, чем больше временной интервал, тем значительнее разница в осадках в отдельных сечениях. На усиленном геоматериалами пути величина максимального отклонения от средней осадки составила соответственно 5 мм и 7 мм, т. е. в 1,4 раза больше. Таким образом, неравномерность просадок на усиленном геоматериалами участке в 1,7 раза ниже по сравнению с обычным. Это является одним из положительных свойств геоматериалов, позволяющих добиться равномерности осадки в продольном оси пути направлении, что, естественно, снижает изменение продольного профиля и позволяет снизить затраты на текущее содержание пути за счет сокращения числа выправочных работ примерно в два раза.

Заключение

Результаты выполненных исследований позволяют утверждать, что участки пути, на которых были уложены геоматериалы, имеют большую стабильность рельсошпальной решетки. Интенсивность накопления остаточных деформаций пути во времени на участке с геосинтетическими материалами в основании подшпального основания ниже, чем на контрольном, в 1,8 раза, а неравномерность просадок — в 1,7 раза. Это является одним из положительных свойств геоматериалов, позволяющих добиться равномерности осадки пути, что, естественно, уменьшает искажение продольного профиля и позволяет снизить затраты на текущее содержание пути за счет сокращения числа выправочных работ примерно в два раза.

Библиографический список

1. Серебряков Д. В. Исследование влияния конструкций переменной жесткости на несущую способность земляного полотна в зоне сопряжения с мостами / Д. В. Серебряков // Актуальные проблемы развития транспортной инфраструктуры: сборник научных трудов. — 2018. — С. 27–33.

2. Kolos A. Reducing of negative heavy axle load impact on the railway track structure / A. Kolos, A. Petriaev, I. Kolos et al. // AIP Conference Proceedings. Proceedings of the Scientific Conference on Railway Transport and Engineering, RTE 2021. — 2021. — P. 060007.

3. Петряев А. В. Расчетный анализ поведения подшпального основания при его стабилизации геосинтетическими материалами / А. В. Петряев, В. Н. Парамонов // Транспорт Урала. — 2022. — № 1(72). — С. 62–67.

4. Петряев А. В. К вопросу о практическом применении метода конечных элементов для расчетов напряженно-деформируемого состояния армогрунтовых конструкций / А. В. Петряев, И. Н. Журавлев // Применение геоматериалов при строительстве и реконструкции транспортных объектов: материалы III Международной научно-технической конференции. Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. — 2013. — С. 101–104.

5. Brown S. F. Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast / S. F. Brown, J. Kwan, N. H. Thom // Geotextiles and Geomembranes — 2007. — № 25. — Pp. 326–335.

6. Esmaeili M. Laboratory and field investigation of the effect of geogrid-reinforced ballast on railway track lateral resistance / M. Esmaeili, J. A. Zakeri, M. Babaei // Geotextiles and Geomembranes. — 2017. — № 45(2). — Pp. 23–33.

7. Indraratna B. Behavior of geogrid-reinforced ballast under various levels of fouling / B. Indraratna, N. T. Ngo, C. Rujikiatkamjorn // Geotextiles and Geomembranes. — 2011. — № 29(3). — Pp. 313–322.

8. Gobel C. H. Effectiveness of a reinforcing geogrid in a railway subbase under dynamic loads / C. H. Gobel, U. C. Weisemann, R. A. Kirschner // Geotextiles and Geomembranes. — 1994. — № 13(2). — Pp. 91–99.

9. Kwan J. Geogrid reinforcement of railway ballast / J. Kwan. — Thesis, University of Nottingham, UK. — 2006. — 195 p.

10. Sharpe P. Geogrid trials at coppull moor on the west coast main line / P. Sharpe, M. J. Brough, J. Dixon // Proceedings of Railway foundations conference: Railfound 06, University of Birmingham, UK. — 2006. — P. 375.

11. Ishikawa T. Application of the UIUC model for predicting ballast settlement to unsaturated ballasts under moving wheel loads / T. Ishikawa, T. Li, T. Yang et al. // Transportation Geotechnics. — 2019. — № 18. — Pp. 149–162.

12. Инструкция по расшифровке лент и оценке состояния рельсовой колеи по показаниям путеизмерительного вагона ЦНИИ-2 и мерам по обеспечению безопасности движения поездов. — Утв. МПС РФ от 14 октября 1997 г. № ЦП-515. — М.: МПС РФ, 1997. — 57 с.

Дата поступления: 28.01.2023

Решение о публикации: 15.02.2023

Контактная информация:

ДУДКИН Евгений Павлович — д-р техн. наук, проф.; ed@pgups-tempus.ru

ПЕТРЯЕВ Андрей Владимирович — канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; pgups60@mail.ru

Changes in the Number of Rail Gauge Crimes after Laying Geosynthetics under the Sleeper Base

E. P. Dudkin, A. V. Petriaev

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Dudkin E. P., Petriaev A. V. Changes in the Number of Rail Gauge Crimes after Laying Geosynthetics under the Sleeper Base. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 206–215. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-206-215

Summary

Purpose: To consider the effect of laying geosynthetic materials in the footplate on the geometry of the rail track. **Methods:** The paper uses methods for evaluating the geometry of the rail track by track measuring cars. For the extra-curricular high speed line St. Petersburg — Moscow and for the heavy-duty line Moscow — Smolensk — Minsk, the parameters of the rail track geometry were evaluated for sections with geosynthetic materials and control sections laid in the construction of the base. The summative indicator of the geometry state was the indicator of the reduced amount of deviations (PSO). **Results:** In the first year or two after repair, regardless of the presence of geosynthetic material, the stabilization of the track is proceeding at the same pace and by the third year of operation, the level of PSO is on average 4.9 pcs/km. Further, the standard design shows an increase in PSO, and by the 6th year reaches a value of 6.9 pcs/km, and then decreases, which is explained by the average repair during this period. For the rail track with geosynthetic material, the level of PSO is steadily decreasing and by the 7th — 10th year reaches a value of 3.45 pcs/km. After the fourth year of operation, the average score for sections reinforced with geomaterials is no more than 85% of the average score for sections of the track without reinforcement. **Practical significance:** Stabilization of the track base with geosynthetic materials makes it possible to achieve uniformity of precipitation in the longitudinal axis of the path, which naturally will not lead to a significant distortion of the longitudinal profile and of course will reduce the cost of the current maintenance of the rail track by reducing the number of track realigning by about half.

Keywords: Sleeper bearing, stabilization, geosynthetic materials, track meters, amount of deviations.

References

1. Serebryakov D. V. Issledovanie vliyaniya konstruktsii peremennoi gestkosti na nesushyu sposobnost zemlyanogo polotna v zone sopryazheniya s mostami [Investigation of the influence of structures of variable rigidity on the bearing capacity of the roadbed in the area of interface with bridges]. *Actualnie problemmi razvitiya transportnoi infrastruktury. Sbornik nauchnix trudov* [Actual problems of transport infrastructure development. Collection of scientific papers]. 2018, pp. 27–33. (In Russian)
2. Kolos A., Petriaev A., Kolos I. et al. Reducing of negative heavy axle load impact on the railway track structure. AIP Conference Proceedings. Proceedings of the Scientific Conference on Railway Transport and Engineering, RTE 2021. 2021, p. 060007.
3. Petriaev A. V., Paramonov V. N. Raschetnii analiz povedeniya podshpalnogo osnovaniya pri ego stabilizatsii geosynteticheskimi materialami [Computational analysis of the behavior of the subshell

base during its stabilization by geosynthetic materials]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2022, Iss. 1(72), pp. 62–67. (In Russian)

4. Petriaev A. V., Zhuravlev I. N. k voprosu o prakticheskom primenenii metoda konechnih elementov dlya raschetov napryagenno-deformiruemogo sostoyaniya armogruntovykh konstruksii [On the practical application of the finite element method for calculations of the stress-strain state of armogruntovykh konstruksii]. *Primenenie geomaterialov pri stroitelstve i rekonstruktsii transportnykh obektov. Materiali III Megdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii* [The use of geomaterials in the construction and reconstruction of transport facilities. Materials of the III International Scientific and Technical Conference]. Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 2013, pp. 101–104. (In Russian)

5. Brown S. F., Kwan J., Thom N. H. Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, vol. 25, pp. 326–335.

6. Esmaeili M., Zakeri J. A., Babaei M. Laboratory and field investigation of the effect of geogrid-reinforced ballast on railway track lateral resistance. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, vol. 29(3), pp. 313–322.

7. Indraratna B., Ngo N. T., Rujikiatkamjorn C. Behavior of geogrid-reinforced ballast under various levels of fouling. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, Iss. 29(3), pp. 313–322.

8. Gobel C. H., Weisemann U. C., Kirschner R. A. Effectiveness of a reinforcing geogrid in a railway subbase under dynamic loads. *Geotextiles and Geomembranes*, 1994, vol. 13(2), pp. 91–99.

9. Kwan J. Geogrid reinforcement of railway ballast. Thesis, University of Nottingham, UK, 2006, 195 p.

10. Sharpe P., Brough M. J., Dixon J. Geogrid trials at coppull moor on the west coast main line. Proceedings of railway foundations conference: Railfound 06, University of Birmingham, UK, 2006, 375 p.

11. Ishikawa T., Li T., Yang T. et al. Application of the UIUC model for predicting ballast settlement to unsaturated ballasts under moving wheel loads. *Transportation Geotechnics*, 2019, vol. 18, pp. 149–162.

12. *Instruktsiya po rasshifrovke lent i otsenke sostoyaniya relsovoi kolei po pokazaniyam puteismeritel'nogo vagona TSNII-2 i meram po obespecheniu bezopasnosti dviganiya poezdov* [Instructions for assessing the condition of the track gauge by track measuring means and measures to ensure traffic safety]. Appr. by the Ministry of Railways of the Russian Federation no. TsPT-515, dated 14th, October 1997. Moscow, The Ministry of Railways of the Russian Federation Publ., 2000, 57 p. (In Russian)

Received: January 28, 2023

Accepted: February 15, 2023

Author's information:

Evgeniy P. DUDKIN — Dr. Sci. in Engineering, Professor; ed@pgups-tempus.ru

Andrei V. PETRIAEV — PhD in Engineering, Senior Researcher; pgups60@pgups.ru