

Входит в перечень ведущих научных журналов и изданий,  
в которых должны быть опубликованы основные  
результаты диссертаций на соискание ученой степени  
доктора и кандидата наук, утвержденный экспертными  
советами Высшей аттестационной комиссии  
Министерства науки и высшего образования РФ

Иркутский государственный университет путей сообщения • Irkutsk State Transport University • Иркутский государственный университет путей сообщения



Иркутский государственный университет путей сообщения • Irkutsk State Transport University • Иркутский государственный университет путей сообщения

Подписной индекс  
в каталоге «Урал-Пресс» – 64556

Зарегистрирован  
Федеральной службой по надзору  
в сфере связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).  
Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС77-66109 от 20 июня 2016 г.

Modern technologies.  
System analysis. Modeling

2023 № 2(78)  
№ 2(78)

Современные технологии.  
Системный анализ. Моделирование

ISSN 1813-9108 (Print)

# Современные технологии Системный анализ Моделирование

2023  
№ 2 (78)

Иркутский государственный  
университет путей сообщения

Машиностроение • Транспортные системы • Информационные технологии

Д.Э.н., профессор  
**Ирина Юрьевна**



**СОЛЬСКАЯ**

«Инфраструктурные  
аспекты социально-  
экономической  
динамики»

Machine Building • Transport Systems • Information Technology

# Modern technologies System analysis Modeling

2023  
No. 2 (78)

Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

**Современные технологии**  
**Системный анализ**  
**Моделирование**

**№ 2 (78)**

**2 0 2 3**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

Главный редактор **А.П. Хоменко**  
Ответственный за выпуск **Д.В. Буторин**

---

#### Приоритетные цели журнала

- передача знаний и опыта, накопленного мировым сообществом и научными школами университета;
- выработка новых знаний в области механики, машиностроения, информатики и транспорта для решения актуальных проблем современной техники;
- ознакомление читателей с передовым мировым опытом внедрения научных разработок по техническим наукам.

#### Стратегические задачи

- предоставлять ученым возможность публиковать результаты своих исследований;
- привлекать внимание к наиболее актуальным перспективным и интересным направлениям научных исследований по тематике журнала;
- обмен мнениями между исследователями из разных регионов и государств.

#### Учредитель и издатель

Иркутский государственный университет путей сообщения  
(664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)

#### Главный редактор

А.П. Хоменко, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

#### Заместители главного редактора

Д.В. Буторин, к.т.н., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

#### Редакционный совет

А.И. Артюнин, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

И.В. Бычков, академик РАН, Иркутский государственный университет (Иркутск, Российская Федерация)

И.И. Галиев, д.т.н., проф., Омский государственный университет путей сообщения (Омск, Российская Федерация)

А.В. Лившиц, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

А.В. Крюков, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

М.И. Кузьмин, академик, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (Иркутск, Российская Федерация)

Н.А. Махутов, д.т.н., проф., член-корреспондент РАН, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, Российская Федерация)

В.В. Москвичев, д.т.н., проф., Институт вычислительных технологий СО РАН (Красноярск, Российская Федерация)

В.Е. Гозбенко, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

А.В. Мурыгин, д.т.н., проф., Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва (Красноярск, Российская Федерация)

С.И. Носков, д.т.н., проф., Иркутский государственный университет путей сообщения (Иркутск, Российская Федерация)

С.М. Овчаренко, д.т.н., доц., Омский государственный университет путей сообщения (Омск, Российская Федерация)

П.М. Огар, д.т.н., проф., Братский государственный университет (Братск, Российская Федерация)

Та Зуи Фыонг, к.ф.-м.н., доц., Ханойский институт математики (Вьетнам)

Р. Энхбат, д.ф.-м.н., проф., Монгольский национальный университет (Монголия)

Здислав Якиевич, д.т.н., проф., Университет штата Аризона (США)

А.С. Янюшкин, д.т.н., проф., Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова (Чебоксары, Российская Федерация)

Адрес редакции: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15

Телефон: +7(3952) 63-83-74

Сайт: <https://ojs.irgups.ru/index.php/stsam>

e-mail: [stsam@irgups.ru](mailto:stsam@irgups.ru)

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-66109 от 20 июня 2016 г.

Подписной индекс в каталоге «Урал-Пресс» – 64556.

Включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ); Ulrich's Periodicals Directory; ВИНТИ РАН.

Входит в перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный экспертными советами Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования РФ по группам научных специальностей: машиностроение; транспортные системы.

# Modern technologies System analysis Modeling

ISSN 1813-9108 (Print)

2023  
No. 2 (78)

Founded in 2004

Published quarterly

## Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie

### Aims and Scope

- transfer of knowledge and experience gained by the world community and schools of thought of the university;
- development of new knowledge in the field of mechanics; mechanical engineering; computer science; transport to solve topical problems of modern technology;

- acquaint the readers with the world's best practices in the implementation of scientific developments in technical sciences.
- provide scientists with an opportunity to publish the results of their researches;
- attract attention to the most relevant and promising areas of research on the subject of the journal;
- exchange of opinions between researchers from different regions and states.

### Founder and publisher

Irkutsk State Transport University  
(15, Str. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, Russian Federation)

### Editor-in-Chief

A.P. Khomenko, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

### Deputy Editor-in-Chief

D.V. Butorin, Ph.D. in Engineering Science, Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

### Editorial council

A.I. Artyunin, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

I.V. Bychkov, Member of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk State University (Irkutsk, Russian Federation)

I.I. Galiev, D.Sc. in Engineering, Prof., Omsk State Transport University (Omsk, Russian Federation)

A.V. Livshits, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

A.V. Kryukov, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

M.I. Kuzmin, Academician, Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russian Federation)

N.A. Makhutov, D.Sc. in Engineering, Prof., Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

V.V. Moskvichyov, D.Sc. in Engineering, Prof., Institute of Computational Technologies, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (Krasnoyarsk, Russian Federation)

V.E. Gozbenko, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

A.V. Murygin, D.Sc. in Engineering, Prof., Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies (Krasnoyarsk, Russian Federation)

S.I. Noskov, D.Sc. in Engineering, Prof., Irkutsk State Transport University (Irkutsk, Russian Federation)

S.M. Ovcharenko, D.Sc. in Engineering, Assoc. Prof., Omsk State Transport University (Omsk, Russian Federation)

P.M. Ogar, D.Sc. in Engineering, Prof., Bratsk State University (Bratsk, Russian Federation)

Ta Zui Fuong, Ph.D. in Physics and Mathematics, Assoc. Prof., Hanoi Institute of Mathematics (Vietnam)

R. Enkhbat, D.Sc. in Physics and Mathematics, Prof., Mathematics of National University of Mongolia (Mongolia)

Zdislav Yakievich, D.Sc. in Engineering, Prof., Arizona State University (USA)

A.S. Yanyushkin, D.Sc. in Engineering, Prof., Ulyanov Chuvash State University (Cheboksary, Russian Federation)

**Адрес редакции:** 15, Str. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664074, Russia

**Tel.:** +7(3952) 63-83-74

**Web-Site:** <https://ojs.irgups.ru/index.php/stsam>

**e-mail:** [stsam@irgups.ru](mailto:stsam@irgups.ru)

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications. Registration Certificate ПИ № ФС77-66109 от June 20, 2016

The subscription index in the Russian catalogue «Ural-Press» is 64556.

Has been included in the Russian Science Citation Index (RSCI); Ulrich's Periodicals Directory.

The journal is included in the list of leading scholarly journals

and editions in which the main results of dissertations for the scientific degree of a doctor and candidate of sciences, approved by the expert councils of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for groups of scientific specialties:

- Mechanical engineering;
- Transport systems.

## СОДЕРЖАНИЕ

**Машиностроение и машиноведение**

<b>Ларченко А.Г.</b> Проблемы и погрешности при измерении толщины обода колеса колесных пар грузового вагона .....	10
--	----

**Транспорт**

<b>Руш Е.А., Власова Н.В.</b> Перспективные мероприятия, направленные на экологическую защиту при работе с углем на производственных участках терминально-складского комплекса .....	20
--	----

<b>Знаенко В.Н., Мельниченко О.В., Портной А.Ю., Линьков А.О.</b> Влияние индуктивности на входе выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов электровоза переменного тока на работоспособность его плеч при параллельном соединении ветвей .....	33
---	----

<b>Иванкова Л.Н., Иванков А.Н., Четчуев М.В., Буракова А.В.</b> Перспективные конструкции горочных горловин .....	42
---	----

<b>Пузина Е.Ю.</b> Оценка эффективности применения вольтодобавочных трансформаторов в системе электроснабжения Кругобайкальской железной дороги .....	51
---	----

<b>Ковтун П.В., Дубровская Т.А.</b> Проектирование реконструкции продольного профиля с обоснованием уклонов продольного профиля .....	61
---	----

<b>Димов А.В., Оленцевич В.А.</b> Совершенствование качества обслуживания пассажиров и посетителей вокзального комплекса станции Иркутск-Пассажирский с применением методов имитационного моделирования .....	72
---	----

<b>Гончарова Н.Ю., Ермоленко И.Ю., Черняева Т.Н., Асташков Н.П.</b> Разработка блок-схемы алгоритма расчета норм закрепления подвижного состава с учетом профиля станционного пути .....	82
--	----

<b>Ковенькин Д.А., Живин Р.И.</b> Оценка эффективности применения шпал рельсовой колеи 1526 мм в кривых малых радиусов .....	93
--	----

<b>Гантимурова Ю.О., Гозбенко В.Е., Ермолина В.С.</b> Методология оценки транспортных связей субъектов Российской Федерации .....	105
---	-----

<b>Лукьянов А.В., Каимов Е.В.</b> Повышение надежности вспомогательных машин электровозов на основе использования данных вибродиагностики .....	115
---	-----

<b>Дульский Е.Ю., Иванов П.Ю., Ромашов А.В., Емельянов Д.О.</b> Исследование влияния контролируемых утечек воздуха на тормозную магистраль грузового поезда .....	127
---	-----

<b>Краковский Ю.М., Кудряшов И.П., Начигин В.А.</b> Исследование показателей эффективности перевозки грузов железнодорожным транспортом вероятностным анализом безубыточности .....	139
---	-----

<b>Арефьева К.В., Мартыненко Л.В.</b> Оценка влияния ходовой части грузового вагона на рельсошпальную решетку в процессе эксплуатации с помощью тензометрических датчиков .....	145
---	-----

<b>Куприянов И.С.</b> Экспериментальные исследования напряженности магнитного поля на электрическом подвижном составе в задачах диагностики и безопасности .....	156
--	-----

### **Информационные технологии, управление и обработка**

<b>Асламова В.С., Умудова И.А.</b> Анализ культуры безопасности ОАО «Российские железные дороги» .....	166
--	-----

<b>Мухутдинов А.Р., Ефимов М.Г., Яковлева Ю.В.</b> Нейросетевое моделирование и оптимизация эксплуатационных параметров теплового воздействия на битуминозный пласт .....	176
---	-----

<b>Филиппенко Н.Г., Петрякова Е.А.</b> Автоматизированное устройство экспресс анализа омасления и набухания полимерных материалов .....	185
---	-----

### **Персоналии**

Д.э.н., профессор Сольская И.Ю. ....	195
--------------------------------------	-----

## CONTENTS

**Machine Building and Theoretical Engineering**

<b>Larchenko A.G.</b> Problems and errors in measuring the wheel rim thickness of freight wagon wheelsets .....	10
---	----

**Transport**

<b>Rush E.A., Vlasova N.V.</b> Promising measures aimed at environmental protection when working with coal at the production sites of the terminal and storage complex .....	20
--	----

<b>Znaenok V.N., Mel'nichenko O.V., Portnoi A.I., Lin'kov A.O.</b> The effect of inductance at the input of the rectifier-purpose converter on the basis of the IGBT transistor of the alternating current electric locomotive on the performance of its shoulders with a parallel connection of branches .....	33
---	----

<b>Ivankova L.N., Ivankov A.N., Chetchuev M.V., Burakova A.V.</b> Perspective construction of hump necks .....	42
--	----

<b>Puzina E.Yu.</b> Efficiency evaluation of the use of volt-additive transformers in the power supply system of the Circum-Baikal Railway .....	51
--	----

<b>Kovtun P.V., Dubrovskaya T.A.</b> Design of longitudinal profile reconstruction with justification of longitudinal slopes .....	61
--	----

<b>Dimov A.V., Olentsevich V.A.</b> Improving the quality of passenger and visitor service at the Irkutsk-Passenger station complex using simulation methods .....	72
--	----

<b>Goncharova N.Yu., Ermolenko I.Yu., Chernyaeva T.N., Astashkov N.P.</b> Development of a flow diagram for the calculation of rolling stock anchoring rates algorithm taking into account the station track profile .....	82
--	----

<b>Koven'kin D.A., Zhivin R.I.</b> Assessment of the efficiency of 1 526 mm rail gauge sleepers in curves of small radii .....	93
--	----

<b>Gantimurova Yu.O., Gozbenko V.E., Ermolina V.S.</b> Methodology for assessing transport links of the constituent entities of the Russian Federation .....	105
--	-----

<b>Luk'yanov A.V., Kaimov E.V.</b> Improving the reliability of auxiliary machines of electric locomotives based on the use of vibration diagnostics data .....	115
---	-----

<b>Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Romashov A.V., Emel'yanov D.O.</b> Investigation of the effect of controlled air leaks on the brake line of a freight train .....	127
--	-----

<b>Krakovskii Yu.M., Kudryashov I.P., Nachigin V.A.</b> Research of the efficiency indicators of railway cargo transportation by probabilistic break-even analysis .....	139
--	-----

<b>Aref'eva K.V., Martynenko L.V.</b> Assessment of the impact of a freight wagon undercarriage on the rail-sleeper grid during operation using strain gauges .....	145
---	-----

<b>Kupriyanov I.S.</b> Experimental studies of the magnetic field strength on electric rolling stock in problems of diagnostics and safety .....	156
--	-----

### **Information technology, management and processing**

<b>Aslamova V.S., Umudova I.A.</b> Analysis of the safety culture of the JSC «Russian Railways» .....	166
---	-----

<b>Mukhutdinov A.R., Efimov M.G., Yakovleva Yu.V.</b> Neural network modeling and optimization of operational parameters for thermal impact on a bituminous reservoir .....	176
---	-----

<b>Filippenko N.G., Petryakova E.A.</b> Automated device for express analysis of oiling and swelling of polymeric materials .....	185
---	-----

### **Personalities**

Doctor of Economic Science, Full Professor I.Yu. Solskaya .....	195
---	-----

**Требования к статьям, принимаемым к публикации**

Рукописи статей представляются в электронном и распечатанном виде.

Рекомендуемый объем статей **9-12 стр.**

1. К статье прилагается:

- акт экспертизы;
- заявка на опубликование (от каждого автора).

2. Статья включает в себя:

- индекс УДК;
- сведения об авторах: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, полное название учреждения (кафедры), контактный телефон и E-mail;
- аннотация (реферат) к статье должна быть (на русском и английском языках): информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); компактной (укладываться в объем от 180 до 250 слов).
- ключевые слова (5-10 ключевых слов на русском и английском языках);
- библиографический список (необходимо упоминание не менее 18 источников, в том числе 25% на зарубежные источники). Библиографический список к статье оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Текст статьи предоставляется в виде файла с расширением \*.doc – документа, построенного средствами Microsoft Word, и распечаткой на стандартных листах формата А4 (210x297 мм) в две колонки, заверенной подписью авторов.

Статья должна быть **структурирована** (введение, 2 и более пункта разделов, заключение).

3. При наборе статьи в Microsoft Word с учетом формата издания рекомендуются следующие установки:

- параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2,5 см; слева и справа – 1,75 см; табуляция – 1 см; ориентация – книжная;
- шрифт – Times New Roman, размер – 11, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- текст статьи разбивается в две колонки с помощью команды "Форматирование -> Колонки" со следующими параметрами: ширина колонки: 8,5 см, промежуток: 0,5 см.

При вставке формул использовать только Microsoft Equation 3 с параметрами:

- элементы формулы для греческих букв и символов шрифт Symbol, для остальных элементов – шрифт Times New Roman (использование букв русского алфавита в формуле нежелательно);
- размер символов: обычный – 10 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 11 пт. Все экспликации элементов формул в тексте также необходимо выполнять в виде формул.

Рисунки, вставленные в текст статьи, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм, представлены в виде файла с расширением \*.jpg, \*.tif и распечаткой на стандартных листах формата А4, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров.

В журнал **не принимаются** статьи с таблицами, развернутыми по вертикали (альбомная ориентация), а также имеющими аббревиатуры в названии и аннотации. Если по тексту статьи не делаются ссылки на номера формул, то формулы не нумеруются.

Статьи, представляемые в журнал, проходят обязательное рецензирование.

Самоцитирование журнала в статьях **запрещено**.

Пример оформления статьи представлен на сайте журнала: [ojs.irgups.ru/index.php/stsam](http://ojs.irgups.ru/index.php/stsam)

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Редакция оставляет за собой право отклонить статью, не отвечающую указанным требованиям или не прошедшую обязательное рецензирование.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Иркутский государственный университет путей сообщения. Аудитория Г-304. Каимов Евгений Витальевич.

Телефон: 8( 3952) 63-83-74. E-mail: [stsam@irgups.ru](mailto:stsam@irgups.ru)

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**MACHINE BUILDING AND THEORETICAL  
ENGINEERING**

## Проблемы и погрешности при измерении толщины обода колеса колесных пар грузового вагона

А.Г. Ларченко✉

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉larchenkoa@inbox.ru

### Резюме

Научная статья посвящена изучению методики измерений толщины обода колесных пар грузового вагона при обслуживании и ремонте, анализу возможных погрешностей и расхождений. Актуальность выбранной темы сомнений не вызывает, так как техническое состояние колесных пар грузового вагона оказывает непосредственное влияние на безопасность движения поездов. В процессе эксплуатации происходит образование дефектов различного рода и происхождения, а также износ основных элементов колесных пар. Для измерения состояния элементов используются специальные средства и инструменты визуально-измерительного контроля. Одним из таких инструментов является толщиномер. Данный инструмент предназначен для измерения толщины обода колеса колесной пары грузовых вагонов, а также глубины ползуна и высоты «навара» на поверхности катания. На предприятиях проводят многоступенчатый контроль выпускаемой продукции, т. е. обод колеса контролируют многократно разными толщиномерами: при выпуске этот процесс осуществляется бригадиром, при приемке на инфраструктуру – дорожным инспектором. В производственных условиях зачастую возникают ситуации, связанные с расхождением результатов измерений при выпуске вагонов из ремонта, что в некоторых случаях приводит к их повторному ремонту. Для анализа причин несоответствий измерений было принято решение произвести контроль в производственных условиях на базе ремонтного предприятия, изучить конструкцию толщиномера, определить происхождение погрешностей и поставить задачи дальнейших исследований, связанных с изменением конструкции шаблона. В работе представлен литературно-патентный обзор, рассмотрены современные средства контроля.

### Ключевые слова

колесная пара, толщиномер, обод колеса, визуальный контроль, шаблоны, грузовой вагон, дефекты, дефектоскопия, шаблон

### Для цитирования

Ларченко А.Г. Проблемы и погрешности при измерении толщины обода колеса колесных пар грузового вагона // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 10–18. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).10-18.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 20.02.2023 г.; поступила после рецензирования: 21.03.2023 г.; принята к публикации: 22.03.2023 г.

## Problems and errors in measuring the wheel rim thickness of freight wagon wheelsets

A.G. Larchenko✉

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

✉larchenkoa@inbox.ru

### Abstract

The article is devoted to the study of the method of measuring the thickness of the rim of the wheelsets of a freight wagon during maintenance and repair, as well as the analysis of possible errors and discrepancies. The relevance of the chosen topic is beyond doubt, since the technical condition of the wheelsets of a freight wagon has a direct impact on the safety of train traffic. During operation, the formation of defects of various kinds and origins, as well as the wear of the main elements of wheel sets take place. To measure the state of the elements, special means and instruments of visual-measuring control are used. One such tool is a thickness gauge. This tool is designed to measure the thickness of the wheel rim of freight wagons wheelset, as well as the depth of the slider and the height of the «fat» on the tread surface. The enterprises carry out multi-stage control of manufactured products, that is, the wheel rim is controlled many times with different thickness gauges: upon release – by a foreman, upon acceptance for infrastructure – by a road inspector. Under production conditions, there are often situations associated with a discrepancy in measurements when the wagons are released from repair, which in some cases leads to their repeated repair. After analyzing the causes of measurement inconsistencies, it was decided to carry out control under production conditions at the facilities of a repair enterprise, study the design of the thickness gauge, determine the causes of errors and set tasks for further research related to changing the design of the template. This work presents a literature and patent review, considers modern means of control.

### Keywords

wheelset, thickness gauge, rim of wheel, visual inspection, templates, freight wagon, defects, flaw detection, template

**For citation**

Larchenko A.G. Problemy i pogreshnosti pri izmerenii tolshchiny oboda koleasa kolesnykh par грузового вагона [Problems and errors in measuring the wheel rim thickness of freight wagon wheelsets]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 10–18. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).10-18.

**Article Info**

Received: February 20, 2023; Revised: March 21, 2023; Accepted: March 22, 2023.

**Введение**

Важным узлом, требующим особого внимания при техническом обслуживании и ремонте грузовых вагонов, является колесная пара – один из основных элементов ходовых частей, от состояния и качества которого существенно зависит надежность работы подвижного состава и безопасность движения. Ввиду высоких требований по прочности и надежности, предъявляемых к колесным парам, разработаны инструкции по их эксплуатации и ремонту, строго нормирующие весь технологический процесс [1–5].

Визуально-измерительный контроль обода колеса является неотъемлемой процедурой при техническом обслуживании и ремонте, которая позволяет выявлять возможные неисправности и дефекты.

К неисправностям, связанными с усталостью металла при циклическом нагружении, относят изломы (рис. 1, *a*) и трещины (рис. 1, *b*).

*a**b***Рис. 1.** Неисправности колесных пар:

*a* – изломы; *b* – трещина

**Fig. 1.** Malfunctions of wheelsets:

*a* – breaks; *b* – crack

Прокат колес, ползуны (рис. 2, *a*) на поверхности катания, износ гребней (рис. 2, *b*) образуются в результате высокотемпературного трения.

*a**b***Рис. 2.** Неисправности колесных пар:

*a* – ползун на поверхности катания; *b* – износ гребней

**Fig. 2.** Malfunctions of wheelsets:

*a* – slider on the tread surface; *b* – wear of the ridges

В процессе эксплуатации и при обточке поверхности катания при выполнении ремонтных работ уменьшается толщина обода колеса. Толщину обода измеряют по кругу катания специальным железнодорожным шаблоном – толщиномером (рис. 3). Данный инструмент предназначен также для измерения глубины ползуна (см. рис. 2) и высоты «навара» на поверхности катания.

Толщина обода колеса измеряется в плоскости круга катания, поэтому измерительная ножка толщиномера *l* устанавливается на

расстоянии 70 мм от штанги 2 (см. рис. 3). Для этого риска на планке измерительной ножки должна совпадать с отметкой «70» на линейке 3. При измерении штанга 2 плотно прижимается к внутренней грани колеса, а выступ на штанге к внутренней поверхности обода. Затем измерительная ножка подводится до соприкосновения с поверхностью катания. По делениям шкалы штанги определяется размер толщины обода цельнокатаного колеса [3]. Шаблон предназначен для использования как в помещении, так и на открытом воздухе.

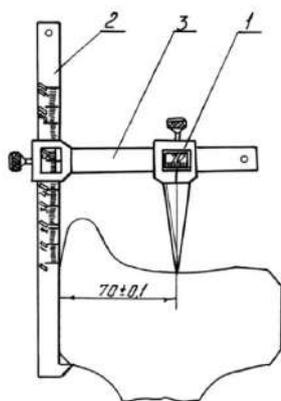


Рис. 3. Измерение толщины обода колеса:

1 – измерительная ножка; 2 – штанга; 3 – линейка

Fig. 3. Measuring the thickness of the wheel rim:

1 – measuring leg; 2 – rod; 3 – ruler

Данным измерительным инструментом производят замеры на всех предприятиях железнодорожного профиля, связанных с ремонтом и эксплуатацией вагонов.

Запрещается эксплуатация колесной пары при толщине обода колеса по кругу катания

менее 22 мм у грузовых вагонов, менее 30 мм у пассажирских вагонов, менее 35 мм в поездах, следующих со скоростью свыше 120 км/ч, но не более 140 км/ч [6–8].

### Постановка проблемы

На предприятиях проводят многоступенчатый контроль выпускаемой продукции разными шаблонами однотипного исполнения, соответственно обод колеса контролируют многократно: при поступлении в ремонт и выпуске это делает бригадир, при обточке поверхности катания – токарь, при приемке на инфраструктуру – дорожный инспектор. В пути следования колесные пары подвергаются контролю автоматическими комплексами, а также осмотрами вагонов на станциях [9–12]. В производственных условиях возникают ситуации, связанные с расхождением измерений при выпуске вагонов из ремонта. Так, согласно отчету по допуску на инфраструктуру грузовых вагонов из деповского и капитального ремонтов на Восточно-Сибирской железной дороге за 2021 г., не допущено в эксплуатацию более 350 вагонов по причине неисправности колесных пар, в том числе из-за несоответствия толщины обода требованиям руководящего документа по ремонту. Допускаемые размеры колесных пар и их элементов при выпуске грузовых вагонов из всех видов ремонта представлены в табл. 1.

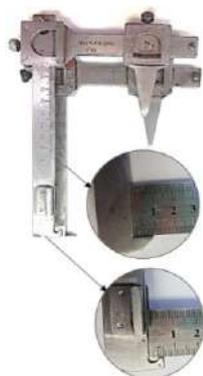
При анализе причин несоответствий измерений было принято решение произвести контроль в производственных условиях на безремонтного предприятия. Более 50 колесных

Таблица 1. Допускаемые размеры колесных пар

Table 1. Permissible dimensions of wheel sets

Измеряемые параметры Measured parameters	Вид ремонта вагона Type of wagon repair		
	Капитальный Major	Деповской Depot	Текущий отцепочный Current uncoupling
	Значения, мм Values, mm		
Толщина обода колеса не менее: для вагонов с установленным межремонтным нормативом 110,0 тыс. км (или 1 и 2 года) Wheel rim thickness not less than: for wagons with set overhaul standard of 110,0 thousand km (or 1 and 2 years)	30	27	24
для вагонов с установленным межремонтным нормативом 160,0 и 210,0 тыс. км (или 2 и 3 года) for wagons with set overhaul standard of 160,0 and 210,0 thousand km (or 2 and 3 years)	40	35	24

пар были подвержены измерению. В процессе измерений толщины обода колесных пар было использовано два поверенных толщиномера, переданных работниками предприятия. В целом они схожи, за исключением одной детали – разницы длины выступа на штанге (рис. 4).



**Рис. 4.** Толщинометры, используемые при визуально-измерительном контроле  
**Fig. 4.** Thickness gauges used in visual inspection

В ходе проведения контроля было выявлено, что показания двух толщиномеров в некоторых случаях разнятся до 1,5–2 мм при

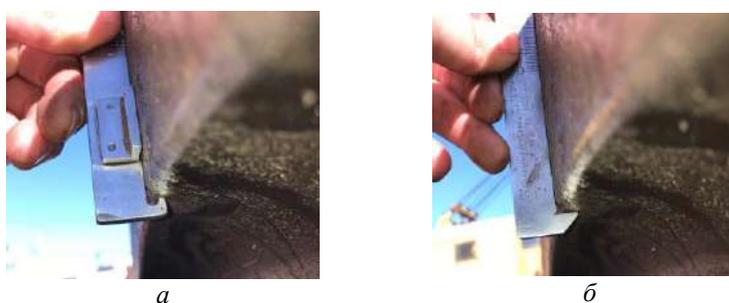
измерении в одном и том же месте. Определено, что разница в показаниях возможна по следующим двум причинам: разность длины выступа на штанге толщиномеров и разность величины фасок перехода от внутренней стороны обода к диску колеса. В качестве примера результаты измерений девяти колесных пар сведены в табл. 2.

Согласно полученным данным, колесная пара под № 5 при измерении шаблоном № 85 не соответствует допускаемым размерам при выпуске вагона из деповского ремонта, а при измерении толщиномером № 180у толщина обода соответствует нормам, что является наглядным подтверждением существования проблемы.

На рис. 5 отчетливо видно, что толщиномер № 85 и толщиномер № 180у при измерении толщины обода колеса прилегают к фаске перехода внутренней поверхности к диску в разных местах, вследствие чего их нулевые отметки измерительной шкалы на штанге имеют разные положения по высоте. Что и приводит к различию конечных показаний измерительных приборов.

**Таблица 2.** Измерение толщины колесных пар толщиномером  
**Table 2.** Measurement of wheel set thickness with a thickness gauge

№ п/п No	№ колесной пары Number of wheelset	Толщиномер № 85 Thickness gauge No 85		Толщиномер № 180у Thickness gauge No 180u	
		Левое колесо Left wheel	Правое колесо Right wheel	Левое колесо Left wheel	Правое колесо Right wheel
1	0039-23241-85	73	74	74,5	75
2	119-1398-05	40	41,5	40,5	41,5
3	0039-49861-05	73	74	74,5	75
4	005-211682-12	68	67	69	67,5
5	<b>0060-3458-05</b>	<b>25,5</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>27,5</b>
6	0029-215519-88	26,5	27,5	27	27
7	0029-294372-88	25,5	26,5	25,5	26,5
8	672-92165-73	31	28,5	31,5	29
9	0029-843016-90	27,5	28	28	28,5



**Рис. 5.** Поверхность касания ножки толщиномера:  
*a* – толщиномер № 85; *б* – толщиномер 180у  
**Fig. 5.** Touch surface of the thickness gauge leg:  
*a* – thickness gauge No 85; *b* – thickness gauge No 180u

На разных колесах в зависимости от производителя и года изготовления, переход от внутренней грани обода колеса к диску выполнен в разных исполнениях: от практически перпендикулярного до размера 10 мм в фаске или в радиусе.

Данные шаблоны не имеют возможности перенастройки в соответствии с геометрией объекта контроля и изменениями требований к конечной продукции. С учетом сказанного предлагается внести изменения в конструкцию измерительного инструмента. При модернизации необходимо учитывать, что точность измерений тесно связана с действиями оператора (насколько правильно используются шаблоны, щупы и средства визуального контроля). Поэтому предлагаемый шаблон должен быть прост в исполнении и удобен в использовании. Еще один показатель, который необходимо учитывать, – это время контроля инструментом. На сегодняшний день, чтобы полностью промерить все параметры колесной пары, соблюдая требования руководящей документации, оператору требуется около 20–30 мин. Этот фактор существенно тормозит весь процесс обслуживания и производства [19–32].

### Литературно-патентный обзор

Таким образом, первой задачей при выполнении работ по модернизации измеритель-

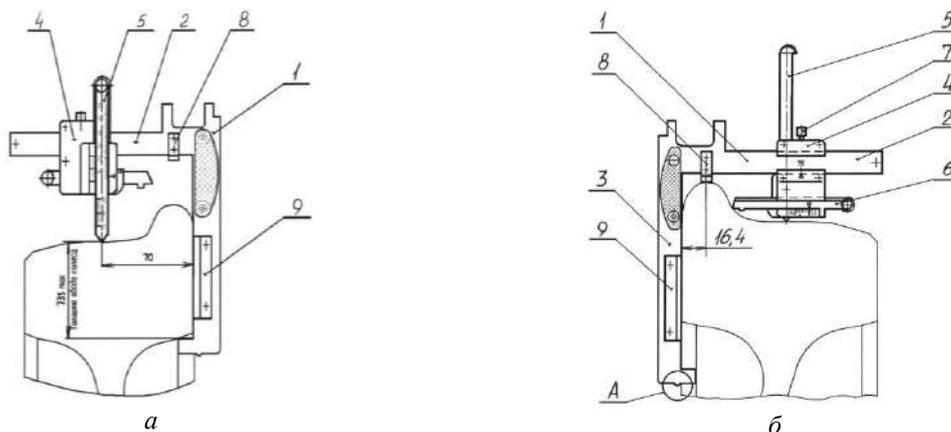
ного инструмента является литературно-патентный обзор [20–35] с поиском прототипа и анализа современных средств измерений.

Известно средство измерения геометрических параметров железнодорожных колес [21], техническая задача которого заключается в упрощении конструкции, снижении материалоемкости и расширении функциональности (рис. 6).

Принцип измерения толщины обода железнодорожного колеса аналогичен с толщиномером № 85. Для точности измерения производят в трех местах, расположенных равномерно по кругу катания железнодорожного колеса. Шаблон, представленный на рис. 6, более универсален, позволяет контролировать толщину обода, глубину кольцевых выработок колес, размеры ползунов и выбоин и другие дефекты, но данный инструмент не решает описанных проблем, связанных погрешностями измерений, кроме этого, он сложен в изготовлении.

Известен способ измерения профиля железнодорожного колеса и устройство для его осуществления (рис. 7) [22].

Сущность заключается в сканировании профиля колеса. На месте контроля осуществляют калибровку и регистрируют угловые координаты. Полученную информацию обрабатывают с помощью электронно-вычислительных машин, а калибровку проводят путем измерения эталонной



**Рис. 6.** Средство измерения геометрических параметров железнодорожных колес:

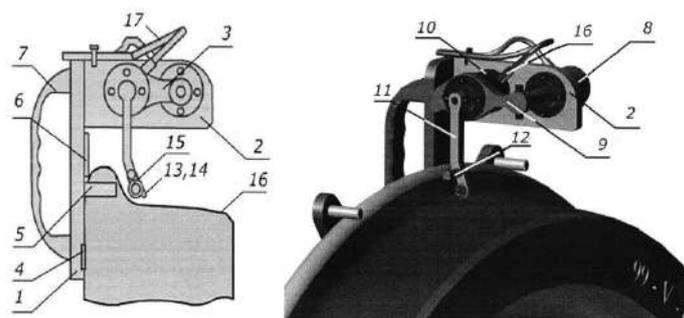
*a* – схема измерения толщины обода железнодорожного колеса при подготовке грузовых вагонов к перевозкам; *b* – общий вид средства измерения геометрических параметров железнодорожных колес:

(1 – основание Г-образной формы; 2 – горизонтальная часть; 3 – вертикальная часть; 4 – рамка с возможностью перемещения и фиксации положения; 5 – вертикальная линейка; 6 – горизонтальная линейка; 7 – зажим; 8 – упор; 9 – опора)

**Fig. 6.** Means for measuring the geometric parameters of railway wheels:

*a* – a scheme for measuring the thickness of the rim of a railway wheel when preparing freight wagons for transportation; *b* – general view of the means for measuring the geometric parameters of railway wheels:

(1 – L-shaped base; 2 – horizontal part; 3 – vertical part; 4 – frame with the possibility of moving and fixing the position; 5 – vertical ruler; 6 – horizontal ruler; 7 – clamp; 8 – pawl; 9 – support)



**Рис. 7.** Устройство измерения профиля железнодорожного колеса:

1 – стойка; 2 – кронштейн, 3 – подвижная сканирующая система; 4 – постоянные магниты; 5 – опорные элементы; 6 – плоскопараллельная мера; 7 – ручка для фиксации; 8, 10 – датчики угловых перемещений; 9 – рычаг; 11 – криволинейный рычаг; 12 – рукоятка; 13 – упругий элемент; 14 – тензорезистор; 15 – ролик, закрепленный с возможностью перемещения и контакта; 16 – колесная пара; 17 – линия передачи

**Fig. 7.** Railway wheel profile measuring device:

1 – rack; 2 – bracket; 3 – movable scanning system; 4 – permanent magnets; 5 – support elements; 6 – plane-parallel measure; 7 – handle for fixation; 8, 10 – sensors of angular displacements; 9 – lever; 11 – curvilinear lever; 12 – handle; 13 – elastic element; 14 – strain gauge; 15 – roller fixed with the possibility of movement and contact; 16 – wheelset; 17 – transmission line

плоскости для получения начальных углов, путем сопоставления мер с эталонными значениями отклонения профиля колеса. Недостатки указанного способа – трудоемкость в измерении, длительность контроля, что недопустимо в условиях массового производства.

В литературных источниках [20–25] рассматривают бесконтактные методы контроля. В качестве средств измерения предлагается использовать лазерные датчики-дальномеры, которые за одно сканирование снимают полностью профиль.

Измерительная аппаратура интегрируется в существующую производственную линию. С помощью устройства транспортировки колесо устанавливается на стенд для осуществления контроля.

Управление механической частью комплекса осуществляется при помощи контроллеров. Бесконтактный метод позволяет осуществить измерение геометрических параметров колеса менее чем за 50 с, имеет очень высокую механическую надежность, обладает высокой стоимостью, при техническом обслуживании использовать его невозможно.

На сети железных дорог активно применяются различные автоматизированные комплексы для контроля геометрических параметров колес-

ных пар [23]. Принцип действия системы основан на лазерном бесконтактном контроле геометрии движущихся объектов с помощью датчиков положения. Данные комплексы обладают рядом преимуществ, таких как точность, быстрота измерений, автоматизация. Комплексы устанавливаются на инфраструктуре ОАО РЖД и не могут быть использованы в условиях вагоноремонтных депо, колесно-роликового цеха и вагонно-колесных мастерских.

В условиях ремонтного процесса есть необходимость в использовании ручного, компактного контрольно-измерительного инструмента.

### Заключение

Проведенный анализ конструкции, литературно-патентный обзор и представленные измерения, выполненные на базе ремонтного предприятия, позволяют говорить о том, что существует проблема неполной выработки ресурса колесных пар, вследствие их преждевременной браковки по причине погрешности при измерении толщины обода колеса толщиномером. Существующие контрольно-измерительные инструменты требуют модернизации с учетом описанных факторов.

### Список литературы

1. РД ВНИИЖТ 27.05.01-2017. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества, протокол от 19–20 октября 2017 г. № 67 : приложение № 62. (в ред. 8.12.2022). Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.

2. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений // ФГИС «Аршин» : сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/344158> (Дата обращения 11.12.2022).
3. РД 32 ЦВ 058-2019. Методика выполнения измерений при техническом обслуживании и ремонте колесных пар грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 (1524 мм) : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества : протокол от 15–16.10.2019 N 71 : приложение № 19. Доступ из справ.-прав. системы «АС-ПИЖТ» в локальной сети.
4. Ларченко А.Г., Яковлев Д.А. Разработка методики диагностирования тормозных колодок подвижного состава из композиционных материалов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. № 9. С. 1–5.
5. Ларченко А.Г. Неразрушающий контроль и диагностика изделий из реактопластов (тормозные колодки) // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25. №3 (285). С. 46–51.
6. Венедиктов А.З., Демкин В.Н., Доков Д.С. Измерение параметров колесных пар подвижного состава в движении // Железные дороги мира. 2003. № 9. С. 33–36.
7. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-р. URL : <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577> (Дата обращения 11.12.2022).
8. Технология производства и ремонта вагонов / К.В. Мотовилов, В.С. Лукашук, В.Ф. Криворудченко и др. М. : Маршрут, 2003. 381 с.
9. Nauschild G. Автоматическая диагностика колесных пар с помощью системы ARGUSÄ // Glasers Annalen. 2001. №12. P. 615–625.
10. Morgan R. Оценка систем измерения колес // Railway Track & Structures. 2002. No 7. P. 13–15.
11. Инструменты и принадлежности осмотра-ремонтника вагонов // Вагонник. РФ : сайт. URL: [http://www.xn--80adeukqag.xn--p1ai/2016/01/blog-post\\_42.html](http://www.xn--80adeukqag.xn--p1ai/2016/01/blog-post_42.html) (Дата обращения 11.12.2022).
12. Реестр средств измерений, испытательного оборудования и методик измерений, применяемых в ОАО «РЖД» // Инновационный дайджест : сайт. URL: [http://www.rzd-expo.ru/innovation/the\\_system\\_of\\_technical\\_regulation/metrology/reestr\\_2023.pdf](http://www.rzd-expo.ru/innovation/the_system_of_technical_regulation/metrology/reestr_2023.pdf) (Дата обращения 6.02.2023).
13. Инновационные вагоны и проблемы их взаимодействия с элементами инфраструктуры / В.Н. Филиппов, А.В. Смольянинов, И.В. Козлов и др. // Безопасность движения поездов : материалы XVII науч.-практ. конф. М., 2016. С. 68–73.
14. Маджидов Ф.А. Оценка параметра безопасности грузового вагона и управление эффективностью его использования с учетом изменения параметров эксплуатационной среды // Безопасность движения поездов : материалы XVII науч.-практ. конф. М., 2016. С. 96–98.
15. Assessment of quality of products from polymer materials for machine-building purposes / D. Gramakov, A. Larchenko, N. Filippenko et al. // Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies : international Scientific Conference. 2019. DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012044.
16. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М. : Транспорт, 1986. 558 с.
17. Diagnostic operation of fabrications of rolling stock by high-frequency method / A.G. Larchenko, N.G. Filippenko, A.V. Livshits et al. // International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2019). 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012037.
18. Об утверждении руководства по текущему отцепочному ремонту (ТР-1) РД 32 ЦВ 094-2018 : распоряжение ОАО «РЖД» от 7.12.2018 № 2633/р. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
19. ГОСТ 10791–2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия. Введ. 2012–01–01. М. : Стандартинформ. 2011. 49 с.
20. Багаев К.А. Контроль геометрических параметров железнодорожного колеса // В мире неразрушающего контроля. 2007. № 3 (37). С. 71–73.
21. Пат. 190686 Рос. Федерация. Средство измерения геометрических параметров железнодорожных колес / Н.П. Бабак, А.К. Игитханян, И.Ю. Иевлева и др. № 2019110343 ; заявл. 08.04.2019 ; опубл. 09.07.2019, Бюл. № 19. 15 с.
22. Пат. 2740539 Рос. Федерация. Способ измерения профиля железнодорожного колеса и устройство для его осуществления / С.А. Бехер, Т.В. Игумнова, А.А. Большанов и др. № 2020120566 ; заявл. 15.06.2020 ; опубл. 15.01.2021, Бюл. № 2. 16 с.
23. Пат. 28348 Рос. Федерация. Комплекс диагностического контроля колесных пар подвижного состава / Ю.В. Чугуй, С.В. Плотников, В.И. Ладыгин и др. № 2002128203/20 ; заявл. 24.10.2002 ; опубл. 20.03.2003, Бюл. № 8. 8 с.
24. РД 32 ЦВ 136-2013. Методика измерений параметров колесных пар шаблоном, комбинированным № 2 при техническом обслуживании и текущем отцепочном ремонте вагонов : утв. Главным инженером Управления вагонного хозяйства Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД» 25.10.2013. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
25. Butorin D.V., Larchenko A.G., Aleksandrov A.A. Design of the tooling of a complex geometric shape for electrothermal processing of the polymer covering plate of the bogie friction wedge // International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2019). 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012011.
26. Larchenko A.G., Filippenko N.G., Livshits A.V. Mathematical modeling of the technological process of improving the quality of polymeric products of machine-building purposes // Siberian Journal of Science and Technology. 2019. Vol. 20. № 1. P. 106–111.
27. Contact method of volume control of temperature of a polymer sample at high-frequency heating / V. Bychkovsky, D. Bakanin, N. Filippenko et al. // Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies : international Scientific Conference, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012053.
28. Комиссаров А.Ф., Григорьев К.В. Автоматизированный диагностический комплекс для измерения геометрических параметров колесных пар // Вагоны и вагонное хозяйство. 2011. № 3. С. 14–15.
29. Панченко А.А. Тен Е.Е. Экспресс-диагностика дефектов колесных пар электроподвижного состава в движении // Вісн. Дніпропетров. нац. ун-ту залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2008. № 25. С. 50–52.

30. Павлюкова Л.С. Конструкция, техническое обслуживание грузовых вагонов. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2011. 223 с.
31. Кротов В.Н. Проблема определения времени, прошедшего от момента образования дефекта на поверхности катания железнодорожных колес // Транспорт-2013 : тр. междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2013. Т. 1. С. 294.
32. Ермоленко И.Ю., Железняк В.Н., Мартыненко Л.В. Раскрытие физической сущности образования дефектов на поверхности катания колеса в условиях его эксплуатации горного рельефа местности ВСЖД // Трансиб: на острие реформ : материалы междунар. науч.-практ. конф. Чита, 2016. Т. 2. С. 137–142.
33. Смолянинов А.В., Кармацкий В.Ф., Волков Д.В. О жизненном цикле колесной пары грузового вагона // Инновационный транспорт. 2022. № 2 (44). С. 35–41.
34. Вакуленко И.А., Грищенко Н.А. Структурные изменения в металле обода железнодорожного колеса при эксплуатации // Металлы. 2010. № 3. С. 45–49.
35. Викторов Н.А. О необходимости разработки ультразвукового толщиномера эксперта // Контроль. Диагностика. 2016. № 12. С. 40–42.

### References

1. RD VNIIZhT 27.05.01-2017. Rukovodyashchii dokument po remontu i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu kolesnykh par s buksovyimi uz-lami gruzovykh vagonov magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 (1524) mm: utv. Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv – uchastnikov Sodruzhestva, protokol ot 19–20 oktyabrya 2017 g. N 67 (Prilozhenie №62) (red. 8.12.2022) [RD VNIIZHT 27.05.01–2017 «Guidance document on repair and maintenance of wheel sets with axle boxes of freight wagons of mainline railways of 1520 (1524) mm gauge»: approved By the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol No 67 of October 19–20, 2017 (Appendix No. 62) (ed. December 8, 2022)].
2. Federal'nyi informatsionnyi fond po obespecheniyu edinstva izmerenii [Federal information fund for ensuring the uniformity of measurements]. Available at: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/344158> (Accessed December 11, 2022).
3. RD 32 TSV 058-2019. Metodika vypolneniya izmereniy pri tekhnicheskome obsluzhivani i remonte kolesnykh par gruzovykh vagonov zheleznykh dorog kolei 1520 (1524) mm: utv. Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv – uchastnikov Sodruzhestva, protokol ot 15–16.10.2019 N 71 (Prilozhenie №19) [RD 32 TsV 058-2019. Methodology for performing measurements during the maintenance and repair of wheel sets of freight wagons of railways with a gauge of 1520 (1524) mm): approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol No 71, dated October 15–16, 2019 (Appendix No 19)].
4. Larchenko A.G., Yakovlev D.A. Razrabotka metodiki diagnostirovaniya tormoznykh kolodok podvizhnogo sostava iz kompozitsionnykh materialov [Development of a method for diagnosing brake pads of a rolling stock made of composite materials]. *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika* [Instruments and systems. Management, control, diagnostics], 2022, no. 9, pp. 1–5.
5. Larchenko A.G. Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika izdelii iz reaktoplastov (tormoznye kolodki) [Non-destructive testing and diagnostics of thermoplastic products (brake pads)]. *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2022, vol. 25, no. 3 (285), pp. 46–51.
6. Venediktov A.Z., Demkin V.N., Dokov D.S. Izmerenie parametrov kolesnykh par podvizhnogo sostava v dvizhenii [Measurement of parameters of wheelsets of rolling stock in motion]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the World], 2003, no. 9, pp. 33–36.
7. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 №3363-r «Ob utverzhdenii Transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation No 3363-r dated November 27, 2021 «On the approval of the Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with a forecast for the period up to 2035»]. Available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577> (Accessed December 11, 2022).
8. Motovilov K.V., Lukashuk V.S., Krivorudchenko V.F., Petrov A.A. Tekhnologiya proizvodstva i remonta vagonov [Technology of production and repair of wagons]. Moscow: Marshrut Publ., 2003. 381 p.
9. Hauschild G. Avtomaticheskaya diagnostika kolesnykh par s pomoshch'yu sistemy ARGUSÁ [Automatic diagnosis of wheelsets using the ARGUSÁ system]. *Glaser's Annalen*, 2001, no. 12, pp. 615–625.
10. Morgan R. Otsenka sistem izmereniya koles [Evaluation of wheel measurement systems]. *Railway Track & Structures*, 2002, no. 7, pp. 13–15.
11. Instrumenty i prinadlezhnosti osmotrshchika-remontnika vagonov (Elektronnyi resurs) [Tools and accessories of the inspector-repairman of wagons (Electronic resource)]. Available at [http://www.xn--80adeukqag.xn--p1ai/2016/01/blog-post\\_42.html](http://www.xn--80adeukqag.xn--p1ai/2016/01/blog-post_42.html) (Accessed December 11, 2022).
12. Reestr sredstv izmerenii, ispytatel'nogo oborudovaniya i metodik izmerenii, primenyaemykh v OAO «RZhD» (Elektronnyi resurs) [Register of measuring instruments, test equipment and measurement methods used in JSC «Russian Railways» (Electronic resource)]. Available at: [http://www.rzd-expo.ru/innovation/the\\_system\\_of\\_technical\\_regulation/metrology/reestr\\_2023.pdf](http://www.rzd-expo.ru/innovation/the_system_of_technical_regulation/metrology/reestr_2023.pdf) (Accessed February 6, 2023).
13. Fillipov V.N., Smolyaninov A.V., Kozlov I.V., Podlesnikov Ya.D. Innovatsionnye vagony i problemy ikh vzaimodeistviya s elementami infrastruktury [Innovative cars and problems of their interaction with infrastructure elements]. *Materialy XVII Nauchno-prakticheskoi konferentsii «Bezopasnost' dvizheniya poezdov»* [Proceedings of the XVII Scientific and Practical Conference «Train Traffic Safety»]. Moscow, 2016, pp. 68–73.
14. Madzhidov F.A. Otsenka parametra bezopasnosti gruzovogo vagona i upravlenie effektivnost'yu ego ispol'zovaniya s uchetom izmeneniya parametrov ekspluatatsionnoi sredy [Estimation of the safety parameter of a freight car and management of the efficiency of its use, taking into account changes in the parameters of the operating environment]. *Materialy XVII Nauchno-prakticheskoi konferentsii «Bezopasnost' dvizheniya poezdov»* [Proceedings of the XVII Scientific and Practical Conference «Train Traffic Safety»]. Moscow, 2016, pp. 96–98.
15. Gramakov D., Larchenko A., Filippenko N., Livshits A., Bakanin D., Bychkovskii V., Butorin D. Assessment of quality

of products from polymer materials for machine-building purposes. *International Scientific Conference «Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies»*, 2019. DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012044.

16. Verigo M.F., Kogan A.Ya. Vzaimodeistvie puti i podvizhnogo sostava [Interaction of track and rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1986. 558 p.

17. Larchenko A.G., Filippenko N.G., Livshits A.V., Kargapol'tsev S.K. Diagnostic operation of fabrications of rolling stock by high-frequency method. *International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2019)*. 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012037.

18. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 7.12.2018 N 2633/r «Ob utverzhenii rukovodstva po tekushchemu ottsepochnomu remontu (TR-1) RD 32 TsV 094-2018» [Order of JSC «Russian Railways» dated December 7, 2018 N 2633/r «About the approval of the manual for the current uncoupling repair (TR-1) RD 32 TsV 094-2018»].

19. GOST 10791–2011. Kolesa tsel'nokatannye. Tekhnicheskie usloviya [State Standard 10791–2011. All-rolled wheels. Specifications]. Moscow: Standartinform, 2011. 49 p.

20. Bagaev K.A. Kontrol' geometricheskikh parametrov zheleznodorozhnogo kolesa [Control of the geometrical parameters of the railway wheel]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya* [In the world of non-destructive testing], 2007, no. 3 (37), pp. 71–73.

21. Babak N.P., Igitkhanian A.K., Ievleva I.Yu., Lebedev G.V., Myasnikov V.N. Patent RU 190686 U1, 09.07.2019.

22. Bekher S.A., Igumnova T.V., Bol'chanov A.A., Kochetkov A.S., Popkov A.A. Patent RU 2740539 C1, 15.01.2021.

23. Chugui Yu.V., Plotnikov S.V., Ladygin V.I., Yunoshev S.P., Kuchinskii K.I., Tukubaev N.T., Baibakov A.N., Sotnikov V.V., Gurenko V.M. Patent RU 28348 U1, 20.03.2003.

24. RD 32 TsV 136-2013. Metodika izmerenii parametrov kolesnykh par shablonom, kombinirovannym № 2 pri tekhnicheskoy obslu-zhivanii i tekushchem ottsepochnom remonte vagonov: utv. Glavnym inzhenerom Upravleniya vagonnogo khozyaistva Tsentral'noi di-rektsii infrastruktury – filiala OAO «RZhD» 25.10.2013 [RD 32 TsV 136-2013. The method of measuring the parameters of wheel pairs with a template, combined No. 2 during maintenance and current uncoupling repair of wagons: approved by Chief Engineer of the Wagon Management Department of the Central Infrastructure Directorate – branch of JSC «Russian Railways» dated October 25, 2013].

25. Butorin D.V., Larchenko A.G., Aleksandrov A.A. Design of the tooling of a complex geometric shape for electrothermal processing of the polymer covering plate of the bogie friction wedge. *International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2019)*. 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012011.

26. Larchenko A.G., Filippenko N.G., Livshits A.V. Mathematical modeling of the technological process of improving the quality of polymeric products of machine-building purposes. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2019, vol. 20, no. 1, pp. 106–111.

27. Bychkovsky V., Bakanin D., Filippenko N., Butorin D., Kuraitis A., Larchenko A. Contact method of volume control of temperature of a polymer sample at high-frequency heating. *International Scientific Conference «Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies»*, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012053.

28. Komissarov A.F., Grigor'ev K.V. Avtomatizirovannyi diagnosticheskii kompleks dlya izmereniya geometricheskikh parametrov kolesnykh par [Automated diagnostic complex for measuring the geometric parameters of wheel pairs]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo* [Wagons and wagon facilities], 2011, no. 3, pp. 14–15.

29. Panchenko A.A. Ten E.E. Ekspress-diagnostika defektov kolesnykh par elektropodvizhnogo sostava v dvizhenii [Express diagnostics of defects in wheel pairs of electric rolling stock in motion]. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta im. akademika V. Lazaryana* [Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academic V. Lazaryan], 2008, no. 25, pp. 50–52.

30. Pavlyukova L.S. Konstruktsiya, tekhnicheskoe obsluzhivanie gruzovykh vagonov [Design, maintenance of freight wagons]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2011. 223 p.

31. Krotov V.N. Problema opredeleniya vremeni, proshedshego ot momenta obrazovaniya defekta na poverkhnosti kataniya zheleznodorozhnykh koles [The problem of determining the time elapsed from the moment of formation of a defect on the rolling surface of railway wheels]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport-2013»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Transport-2013»]. Rostov on Don, 2013, vol. 1, pp. 294.

32. Ermolenko I.Yu., Zheleznyak V.N., Martynenko L.V. Raskrytie fizicheskoi sushchnosti obrazovaniya defektov na poverkhnosti kataniya kolesa v usloviyakh ego ekspluatatsii gornogo rel'efa mestnosti VSZHD [Disclosure of the physical essence of the formation of defects on the wheel tread surface in the conditions of its operation of the mountainous terrain of the Eastern Railway]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transsib: na ostriie reform»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Transsib: at the forefront of reforms»]. Chita, 2016, vol. 2, pp. 137–142.

33. Smol'yaninov A.V., Karmatskii V.F., Volkov D.V. O zhiznennom tsikle kolesnoy pary gruzovogo vagona [On the life cycle of a wheel pair of a freight wagon]. *Innovatsionnyi transport* [Innovative transport], 2022, no. 2 (44), pp. 35–41.

34. Vakulenko I.A., Grishchenko N.A. Strukturnye izmeneniya v metalle oboda zheleznodorozhnogo kolesa pri ekspluatatsii [Structural changes in the metal of the rim of a railway wheel during operation]. *Metally* [Metals], 2010, no. 3, pp. 45–49.

35. Viktorov N.A. O neobkhodimosti razrabotki ul'trazvukovogo tolshchinomera eksperta [On the need to develop an expert's ultrasonic thickness gauge]. *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2016, no. 12, pp. 40–42.

### Информация об авторах

**Ларченко Анастасия Геннадьевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: Larchenkoa@inbox.ru.

### Information about the authors

**Anastasiya G. Larchenko**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: Larchenkoa@inbox.ru.

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ТРАНСПОРТ**

**TRANSPORT**

## Перспективные мероприятия, направленные на экологическую защиту при работе с углем на производственных участках терминально-складского комплекса

Е.А. Руш, Н.В. Власова✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉natalya.vlasova.76@list.ru

### Резюме

В научной статье рассмотрены вопросы, связанные с условиями организации перевозок, а также переработкой угольных грузов. Приведены результаты анализа переработки грузов различной номенклатуры за 2021–2022 гг. по железнодорожным перевозкам в Российской Федерации. В связи с одобрением Президентом РФ в 2022 г. квот на экспорт угля из Хакасии в объеме 9 млн т и из Бурятии в размере 9,1 млн т через Восточный полигон, в перспективе появляется вероятность значительного увеличения уровня негативного воздействия на окружающую среду, что вызывает необходимость разработки и внедрения перспективных и эффективных природоохранных методов, в частности по предотвращению распространения угольной пыли в атмосферном воздухе. Рост объемов добычи, транспортировки и переработки угольной продукции имеет как положительные, так и отрицательные стороны, в частности он потребует непрерывного мониторинга и решения различных задач, среди которых особое место занимает соблюдение требований экологической безопасности на объектах железнодорожного транспорта. Угольная пыль образуется на всех этапах: от процесса добычи и заканчивая выдачей груза грузополучателю. Повышенная концентрация угольной пыли в атмосферном воздухе очень опасна для здоровья человека, снижает видимость, может привести к возникновению различных аварийных ситуаций. На сегодняшний день первоочередным рычагом транспортно-логистической отрасли ОАО «РЖД» является терминально-складской комплекс, он принимает самое активное участие в системе преобразования каналов распределения груза от производителей сырья до поставки конечному потребителю. В представленных материалах рассмотрены перспективные методы и технологические подходы к минимизации распространения угольной пыли на производственных участках Восточно-Сибирской дирекции по управлению терминально-складским комплексом. Проведены комплексные экологические исследования, включающие в себя результаты работы по установлению нормативов предельно допустимых выбросов для производственного участка Саянтуй (угольный склад).

### Ключевые слова

угольная продукция, терминально-складской комплекс, угольная пыль, предельно допустимые выбросы, экологическая безопасность, экологические исследования

### Для цитирования

Руш Е.А. Перспективные мероприятия, направленные на экологическую защиту при работе с углем на производственных участках терминально-складского комплекса / Руш Е.А., Н.В. Власова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 20–32. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).20-32.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 22.12.2022 г.; поступила после рецензирования: 09.06.2023 г.; принята к публикации: 13.06.2023 г.

## Promising measures aimed at environmental protection when working with coal at the production sites of the terminal and storage complex

E.A. Rush, N.V. Vlasova✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉natalya.vlasova.76@list.ru

### Abstract

The scientific article deals with the issues of the conditions for the organization of transportation, as well as the processing of coal cargo. An analysis is given of rail transportation cargo processing for various nomenclature in the Russian Federation for the period 2021–2022. In connection with the approval by President of Russian Federation in 2022 of quotas for the export of coal from Khakassia in the amount of 9 million tons and from Buryatia 9,1 million tons through the Eastern landfill, in the future there is a possibility of a significant increase in the level of negative impact on the environment, causing the need to develop and implement promising and effective environmental protection methods, to prevent in particular the spread of coal dust in the atmospheric air. With an increase in the volume of mining, transportation and processing of coal products, both positive and negative sides are indicated, namely, continuous monitoring and solving various problems will be required, among which special attention is focused on compliance with environmental safety requirements at railway transport facilities. Coal dust is formed at all stages, from the mining process to

the delivery of cargo to the consignee. An increased concentration of coal dust in the atmospheric air is very dangerous for human health, reduces visibility, and can cause an emergency. Today, the primary lever of the transport and logistics industry of JSC «Russian Railways» is the terminal and storage complex, which is taking an active part in the system of transforming cargo distribution channels from producers of raw materials before delivery to the final consumer. The presented materials consider promising methods and technological approaches to minimizing the process of spreading coal dust at the production sites of the East Siberian Directorate for the management of terminal and storage complex. Comprehensive environmental studies have been carried out, which include the results of work on setting standards for maximum allowable emissions for the Sayantui production site (coal storage).

### Keywords

coal products, terminal and storage complex, coal dust, maximum allowable emissions, environmental safety, environmental research

### For citation

Rush E.A., Vlasova N.V. Perspektivnye meropriyatiya, napravlennye na ekologicheskuyu zashchitu pri rabote s uglem na proizvodstvennykh uchastkakh terminal'no-skladskogo kompleksa [Promising measures aimed at environmental protection when working with coal at the production sites of the terminal and storage complex]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 20–32. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).20-32.

### Article Info

Received: December 22, 2022; Revised: June 9, 2023; Accepted: June 13, 2023.

### Анализ погрузки и перевозки грузов на сети ОАО «РЖД»

Россия занимает лидирующие позиции по промышленной добыче угля. На территории РФ залегают треть запасов угля в мировом масштабе и четверть исследованных запасов, что составляет 203,6 млрд т.

Основной номенклатурой в общем объеме грузовых железнодорожных перевозок в Российской Федерации был и остается каменный уголь. Предполагается, что в ближайшие десятилетия России не угрожает кризис в угледобывающей промышленности, спрос и предложение на рынке будут сохраняться.

В Иркутской области вдоль Саянских гор и до озера Байкал протянулся Иркутский угольный бассейн, он сосредоточил в себе запасы плотной залежи угольных пластов различной мощности и составляет около 7,5 млрд т.

На сети ОАО «РЖД» продолжают расти грузовые перевозки: с начала ноября грузооборот увеличился на 1,9 % по сравнению с тем же периодом 2021 г. Таким образом, показатель в очередной раз побил исторический рекорд.

Большую часть дает погрузка во внутреннем сообщении (+5,2 %), из них черных металлов (+26,3 %), минеральных удобрений (+41,1 %), коксующегося угля и антрацита (+18,9 %), железной руды (+13,7 %). В настоящее время увеличилось число заявок на перевозки грузов в Восточном направлении. И это не только уголь, но и нефтепродукты, металлы, удобрения, зерно.

Следует отметить, что уголь, как один из

важнейших видов ископаемого сырья, не теряет своей ценности на протяжении уже многих лет. Уголь является навалочным грузом и широко используется в качестве теплотворного агента при выработке электроэнергии, а также исходным материалом в процессах получения ряда ценных продуктов [1–4].

По БАМу и Транссибирской магистрали за 18 дней декабря перевозка угля в контейнерах типа «Open top» выросла на 24,3 %. В целях увеличения пропускной способности контейнерных поездов их объединяют, с начала месяца уже отправлено 35 таких длинных составов. Это втрое больше, чем за аналогичный период прошлого года. В целом по сети железных дорог РФ контейнерные перевозки прирастают на 9,1 % по сравнению с 2021 г. в том числе транзит – на 8,0 % [1]. Кроме того, увеличена среднесуточная выгрузка вагонов благодаря адресной работе с грузополучателями. Сейчас этот параметр достиг максимальных значений с 2008 г. В связи с занятостью инфраструктуры в продвижении груженых вагонов с начала декабря число задержанных поездов в целом по сети железных дорог снизилось на 10 %, в юго-западном направлении – на 15 %. На протяжении 11 мес. приоритетным драйвером повышающих объемов перевозок остается уголь. С учетом перераспределения на рынки Турции и Индии участники транспортно-логистической отрасли прогнозируют положительные тенденции с перераспределением груженых вагонопотоков, а также существенные улучшения в непрерывном росте в данном сегменте [5, 6].

По данным официального сайта ОАО «РЖД», с начала 2022 г. погрузка на сети железных дорог в адрес портов Азово-Черноморского бассейна выросла на 0,7 % по сравнению с аналогичным периодом прошлого года. С начала 2022 г. отгрузка угольной продукции в южные направления в адрес портов выросла на 26,8 %, что составило 26 млн т. Уже в ноябре 2022 г. в том же направлении отправлено 2,9 млн т угля, что на 21 % выше аналогичного периода прошлого года. В порт Тамань направилось свыше 65 % грузов угольной промышленности. В свою очередь в порты Туапсе и Азов наблюдается менее существенный объем отгрузки угольной продукции – 8 и 4 % соответственно. Как было указано, практически весь объем угольной продукции перераспределен в Турцию и Индию – около 80 % от всего грузопотока угля. В настоящее время Турция является одним из крупнейших потребителей, например, в сентябре РФ направила в эту страну свыше 49 % угольной продукции [7].

В связи с выпадением поставок в Европу и изменением транспортно-логистического подхода к переориентации отгрузки каменного угля логистические компании вынуждены искать новые рынки сбыта угольной продукции. Для отправки и отгрузки угольной продукции преимущественно в направлении Турции и Индии у угольной отрасли появилось дополнительное «окно» – задействование Черного моря. Не наблюдается никаких сбоев с поставкой угольной продукции через порты Азово-Черноморского бассейна. Кроме этого, отправки угля через северо-запада порты также возрастают. Например, в ноябре 2022 г. по сравнению с аналогичным периодом прошлого года

отправки в Турцию выросли в 7,3 раза и составили порядка 1,9 млн т, в Индию поставки увеличились в 1,9 раза – до 0,7 млн т [6, 8].

### Переработка навалочных грузов на производственных участках Восточно-Сибирской дирекции по управлению терминально-складским комплексом

При увеличении объема таких грузовых перевозок, как навалочные грузы объектам окружающей среды наносится значительный вред. Это связано с выветриванием груза при перевозке, а также при выполнении погрузо-разгрузочных работ и работы дробильного комплекса при приведении отдельных кусков груза к одной калибровке, что приводит к распространению угольной пыли на значительные расстояния. Поэтому возникает острая необходимость проведения природоохранных мероприятий, направленных на предотвращение распространения угольной пыли [9, 10]. На производственных участках Восточно-Сибирской дирекции по управлению терминально-складским комплексом (далее – Дирекция) угольная пыль образуется в основном при механическом воздействии на штабель с углем, т.е. в процессе выполнения погрузо-перегрузочных операций.

На территории транспортно-складского комплекса существует три наиболее крупных источника угольной пыли, где происходят различные операции с углем: при выгрузке его из автомобилей, погрузке в вагоны или в контейнеры, складировании угля на площадке.

Грузовые дворы Дирекции, на которых происходит переработка навалочных грузов, расположены в трех регионах: Улан-Удэнском, Иркутском и Северобайкальском. В состав Ди-



Рис. 1. Доходы от подсобно-вспомогательной деятельности за 2019–2022 гг.

Fig. 1. Income from ancillary activities for 2019–2022

рекции входит 24 производственных участка. Основными задачами Дирекции являются:

- оказание услуг и выполнение работ на объектах терминально-складского комплекса (ТСК);
- погрузочно-выгрузочные работы;
- хранение и складская обработка грузов;
- подготовка вагонов к перевозке;
- оказание экспедиционных услуг.

Большая часть перерабатываемых грузов приходится на грузы в контейнерах и навалочные. Доходы от подсобно-вспомогательной деятельности, в том числе от погрузки, выгрузки навалочных грузов, приведены на рис. 1 [2].

### Достоверные расчеты загрязнения приземного слоя воздуха

В связи с запланированным Дирекцией на 2023–2025 гг. увеличением объема грузопереработки на производственном участке ст. Саянтуй авторами проведены комплексные экологические исследования, которые включают в себя результаты работы по установлению нормативов предельно допустимых выбросов (ПДВ) для производственного участка Саянтуй (угольный склад) (рис. 2).

Данный участок поставлен на государственный учет объектов негативного воздействия на окружающую среду с присвоением второй категории.

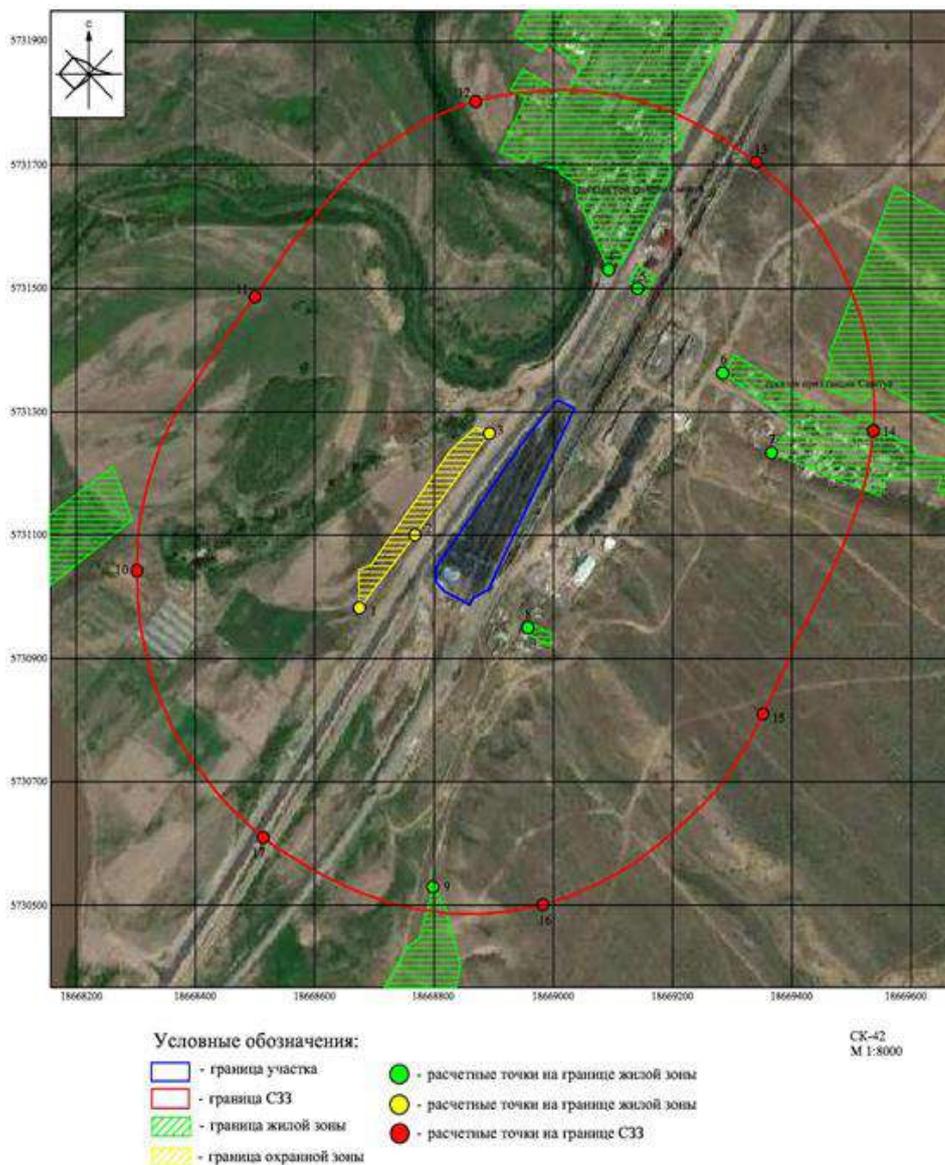


Рис. 2. Ситуационный план расположения производственного участка Саянтуй (угольный склад)

Fig. 2. Situational plan for the location of the Sayantui production site (coal storage)

Производственный участок Саянтуй (угольный склад) расположен на производственной площадке в Республике Бурятия. В настоящее время на территории данного участка имеется три неорганизованных источника и один постоянный источник выбросов в атмосферу негативных загрязняющих веществ. В атмосферу от этих источников загрязнения поступают девять загрязняющих веществ, в том числе семь – газообразных и жидких и два – твердых, из них третьего класса опасности – азота диоксид, азота оксид, углерод (является канцерогенным), серы диоксид, диметилбензол (ксилол), пыль каменного угля; четвертого класса опасности – углерода оксид; для керосина и уайт-спирита класс опасности не определен. Данные вещества образуют первую группу суммации.

В соответствии с распоряжением Правительства РФ «Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды» от 8 июля 2015 г. № 1316-р, углерод (сажа), железа оксид не включены в перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды [11, 12].

Таким образом, количество выбрасываемых загрязняющих веществ в атмосферный воздух, в отношении которых применяются меры государственного регулирования, составило: 0,12847 т в год, в том числе 0,088891 т в год – газообразных и жидких, и 0,039579 т в год – твердых. Приблизительный размер санитарно-защитной зоны для этого участка согласно СанПиН 2.2.1/2.2.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» (редакция 2014 г.) принят равным 500 м [13].

Все расчеты загрязнения атмосферы выполнялись с помощью стандартизированной программы УПРЗА «Эколог» (версия 4.60.4.0), согласованной к применению в установленном порядке (рег. номер 01-01-6683, № электронного ключа 20894).

Находящихся на границах ориентировочной санитарно-защитной зоны, жилой и охранной зоны вместе с расчетами полей максимальных приземных концентраций проводились расчеты в контрольных точках, данные исследования производились в прямоугольной обла-

сти, которая охватывает местность ориентировочной санитарно-защитной зоны (СЗЗ), точки располагались в узлах прямоугольной сетки с шагом 50 м [14, 15].

В каждой расчетной точке вычислялась концентрация примеси максимальная по величине скорости и направлению ветра. По алгоритму уточненного перебора скоростей ветра, заложенному в программу «Эколог», при данном обследовании выполнялся перебор направлений и скоростей ветра, шаг по углу перебора направлений ветра был принят равным 10.

Для исследования были выбраны восемь контрольных точек, расположенных на границе СЗЗ (р.т. на границе СЗЗ), шесть контрольных точек, расположенных на границе ближайшей жилой застройки (р.т. ЖЗ) и три контрольные точки, расположенные на границе охранной зоны.

При превышении приземных концентраций в точках на границе жилой зоны значения 0,1 предельно допустимой концентрации (ПДК) необходим учет фоновых концентраций. При проведении расчетов в контрольных точках жилой зоны выявлены превышения приземных концентраций более 0,1 доли ПДК для ксилола и пыли каменного угля.

Расчет был произведен без учета фона пыли, так как значения фоновой концентрации пыли не используются при нормировании выбросов ввиду отсутствия критериев качества атмосферного воздуха суммарной концентрации пыли. Так как по ксилолу наблюдения не проводятся, расчет был произведен без учета фона данного вещества. В результате расчета рассеивания превышений гигиенических нормативов в контрольных точках не выявлено [16, 17].

Результаты вычислений загрязнения приземного слоя атмосферы в виде карт-схемы с изолиниями рассеивания веществ представлены на рис. 3–6. Все расчеты на производственном участке Саянтуй осуществлены 30 сентября 2022 г. на высоте 2 м, насыщенность вредного вещества определена в долях ПДК. Перечень источников, дающих наибольшие вклады в уровень загрязнения атмосферы, представлен в таблице. Результаты проведенных расчетов подтвердили соблюдение действующих гигиенических стандартов качества атмосферного воздуха по всем загрязняющим веществам, выбрасываемым источниками предприятия.

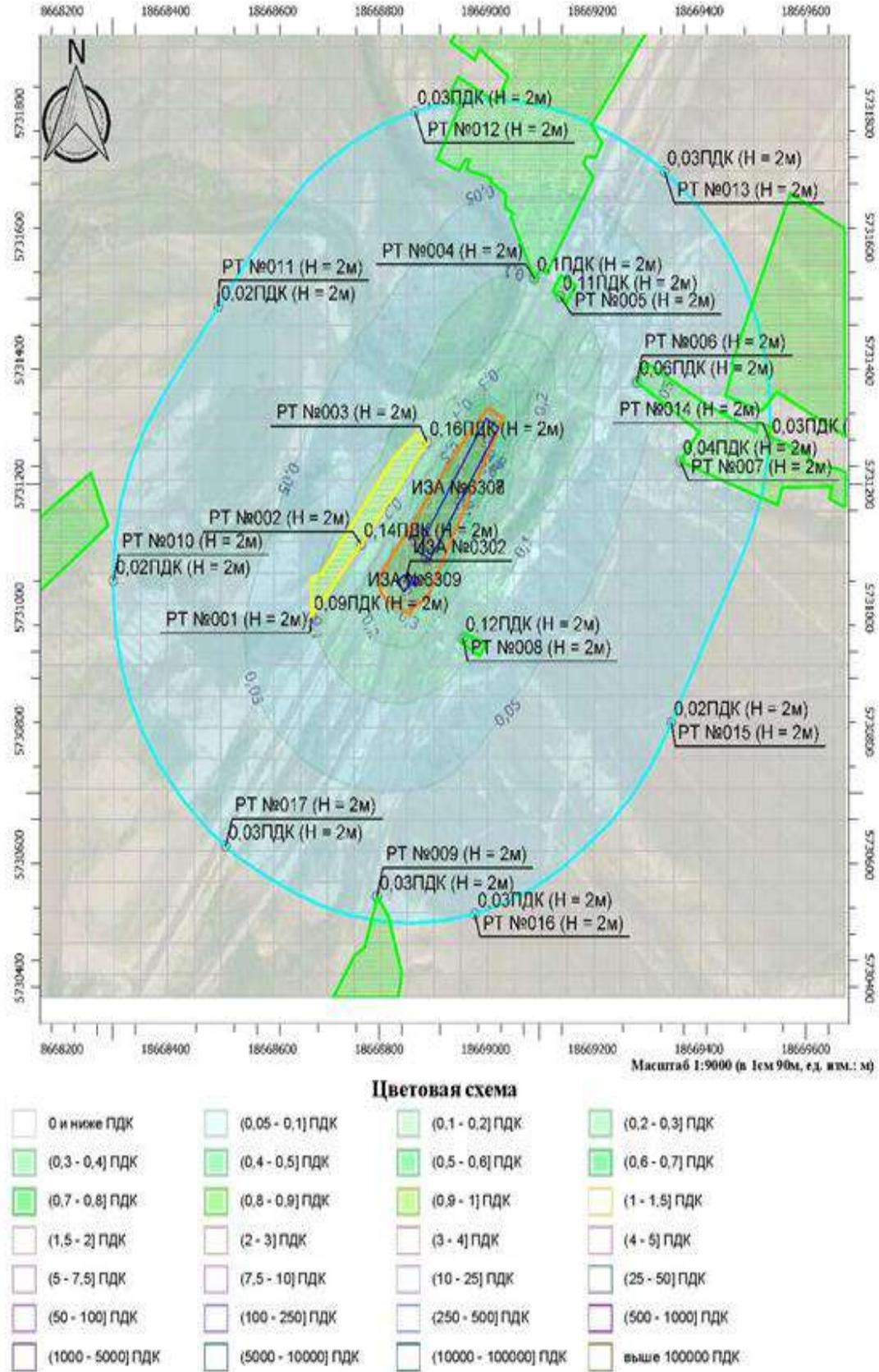


Рис. 3. Концентрация вещества, код расчета 3749 (пыль каменного угля)

Fig. 3. Substance concentration, calculation code 3749 (coal dust)

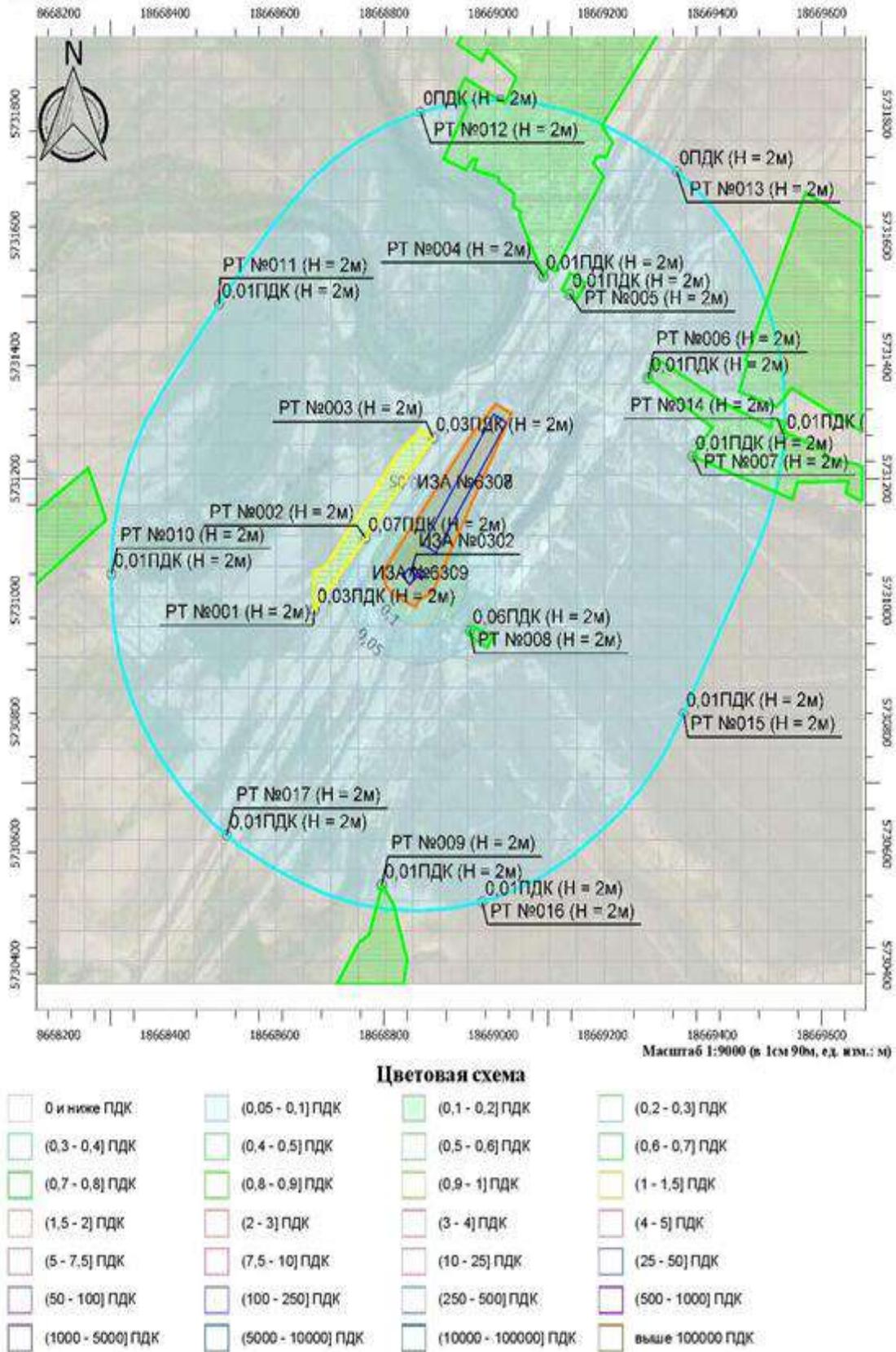
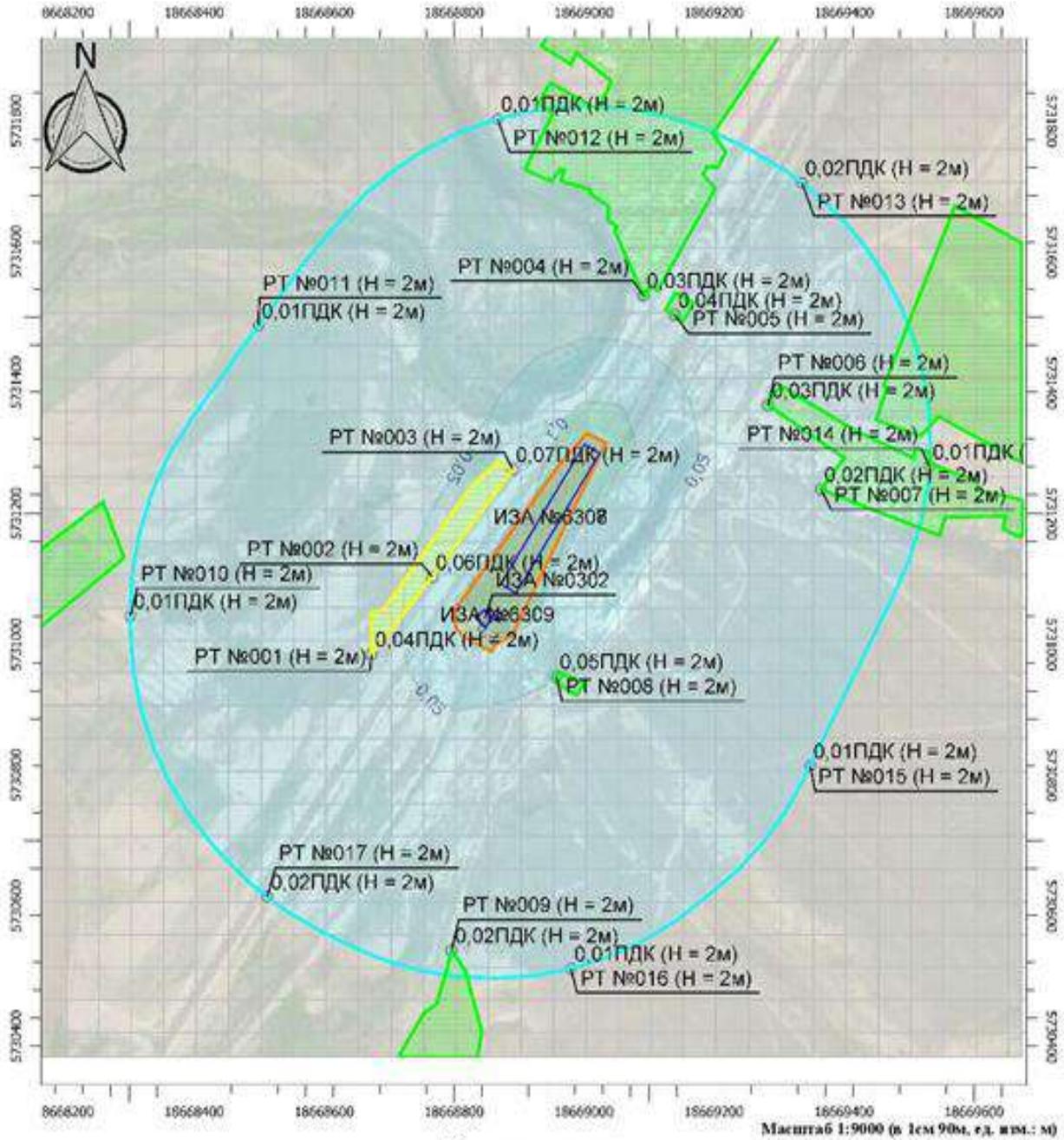


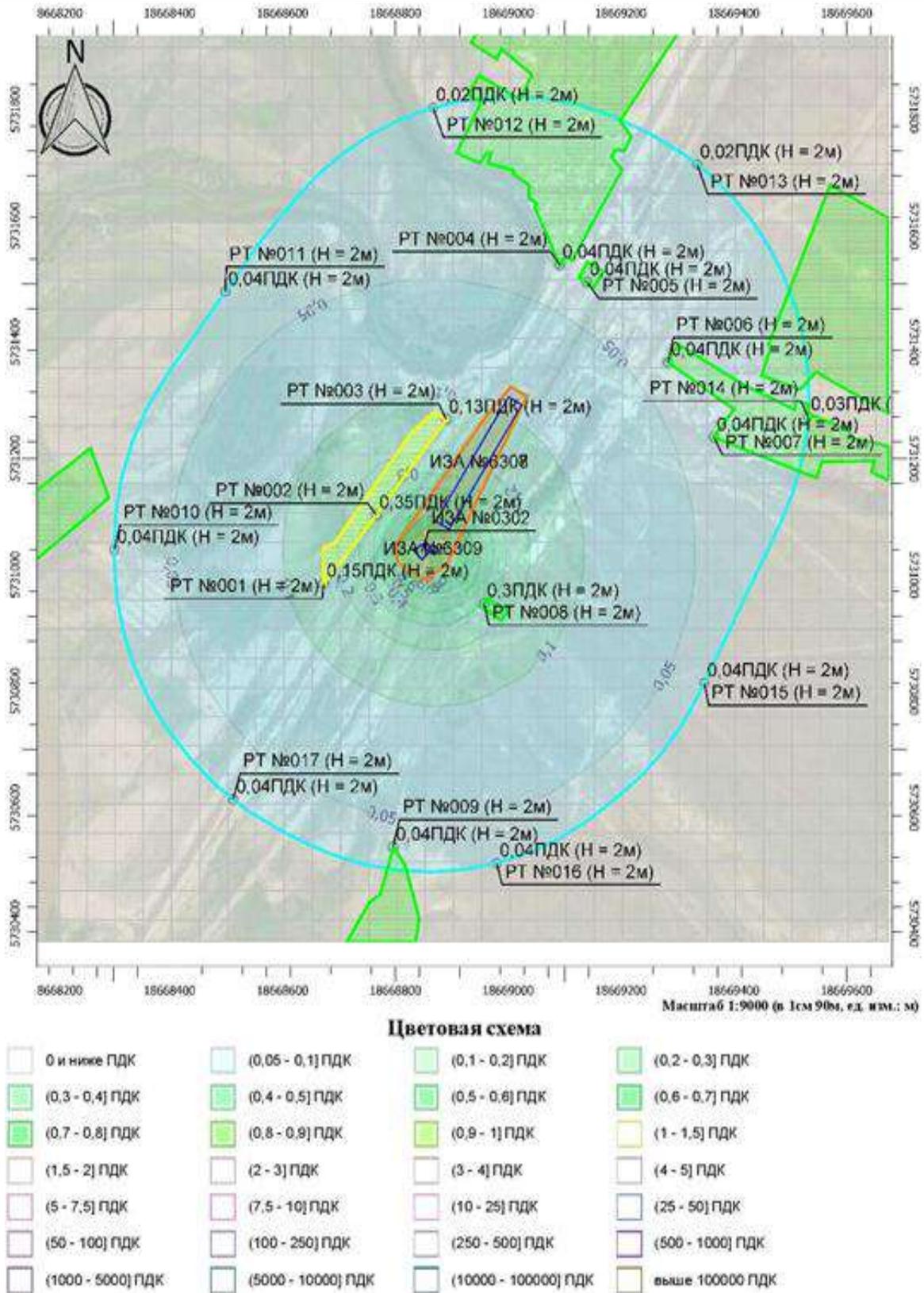
Рис. 4. Концентрация вещества, код расчета 2752 (уййт-спирит)  
 Fig. 4. Substance concentration, calculation code 2752 (white spirit)



**Цветовая схема**

0 и ниже ПДК	(0.05 - 0.1] ПДК	(0.1 - 0.2] ПДК	(0.2 - 0.3] ПДК
(0.3 - 0.4] ПДК	(0.4 - 0.5] ПДК	(0.5 - 0.6] ПДК	(0.6 - 0.7] ПДК
(0.7 - 0.8] ПДК	(0.8 - 0.9] ПДК	(0.9 - 1] ПДК	(1 - 1.5] ПДК
(1.5 - 2] ПДК	(2 - 3] ПДК	(3 - 4] ПДК	(4 - 5] ПДК
(5 - 7.5] ПДК	(7.5 - 10] ПДК	(10 - 25] ПДК	(25 - 50] ПДК
(50 - 100] ПДК	(100 - 250] ПДК	(250 - 500] ПДК	(500 - 1000] ПДК
(1000 - 5000] ПДК	(5000 - 10000] ПДК	(10000 - 100000] ПДК	выше 100000 ПДК

**Рис. 5.** Концентрация вещества, код расчета 0301 (азота диоксида)  
**Fig. 5.** Substance concentration, calculation code 0301 (nitrogen dioxide)



**Рис. 6.** Концентрация вещества, код расчета 0616 (деметилбензол (ксилол) (смесь мета-орто- и пара-изомеров))

**Fig. 6.** Substance concentration, calculation code 0616 (demethylbenzene (xylylene) (mixture of meta-ortho- and para-isomers))

Перечень источников, дающих наибольшие вклады в уровень загрязнения атмосферы  
List of sources with the largest contributions to the level of air pollution

Загрязняющее вещество Polluting substance		Номер контрольной точки Number of control point	Допустимый вклад Сд в долях предельно- допустимой концентрации Permissible contribution Sd in shares of the maximum allowable concentration	Расчетная максимальная приземная концентрация, в долях предельно- допустимой концентрации Estimated maximum surface concentration, in fractions of the maximum permissible concentration			Источники, дающие наибольший вклад Sources with largest contribu- tion	
Код Code	Наименование Denomination			Жилая зона Residential area	Охранная зона Protected zone	Граница санитарно- защитной зоны Boundary of sani- tary protection zone	№ источника на карте-схеме № of source on map- scheme	Вклад, % Contribution, %
0301	Азота диоксид nitrogen dioxide	17	0,0	–	–	0,0174	3.1.0302	5,99
0301	Азота диоксид nitrogen dioxide	8	0,0	0,0515	–	–	3.1.0302	0,13
0301	Азота диоксид nitrogen dioxide	2	0,0	–	0,0699	–	3.1.0302	0,67
0616	Диметилбензол (ксилол) (смесь мета-, орто- и па- раизомеров) Dimethylbenzene (xylene) (mixture of meta-, ortho- and para-isomers)	16	0,0	–	–	0,0412	3.1.6309	100,00
0616	Диметилбензол (ксилол) (смесь мета-, орто- и па- раизомеров) Dimethylbenzene (xylene) (mixture of meta-, ortho- and para-isomers)	8	0,0	0,2995	–	–	3.1.6309	100,00
0616	Диметилбензол (ксилол) (смесь мета-, орто- и па- раизомеров) Dimethylbenzene (xylene)	2	0,0	–	0,3468	–	3.1.6309	100,00
2752	Уайт-спирит white spirit	8	0,0	0,0599	–	–	3.1.6309	100,00
2752	Уайт-спирит white spirit	2	0,0	–	0,0694	–	3.1.6309	100,00
3749	Пыль каменного угля coal dust	13	0,0	–	–	0,0335	3.1.6307	79,85
3749	Пыль каменного угля coal dust	8	0,0	0,1175	–	–	3.1.6307	87,59
3749	Пыль каменного угля coal dust	3	0,0	–	0,1618	–	3.1.6307	76,90

Авторами предложены мероприятия по установлению нормативов ПДВ на 2020–2027 гг. для всех рассматриваемых источников и загрязняющих веществ. В период 2023–2025 гг. пла-

нируются изменения в объемах производства, что в целях соблюдения требований экологической безопасности на объектах железнодорожного транспорта определит необходимость при-

менения современных, эффективных технологий по борьбе с угольной пылью.

### **Мероприятия по борьбе с угольной пылью при увеличении объема перевозок на производственном участке станции Саянтуй**

В настоящее время на производственных участках Дирекции применяют несколько методов борьбы с угольной пылью. Рассмотрим сущность используемых технологий. Один из приоритетных методов связан с использованием технологии переработки угольной продукции так, чтобы механическое воздействие на груз было минимальным, что даст возможность меньше рассеивать угольную пыль.

Прикрытие механизированного оборудования, такого как дробильное оборудование, погрузо-выгрузочный фронт, конвейерная установка, или отдельных зон с интенсивным пылением угля, что позволит значительно сократить выделение угольной пыли в атмосферный воздух.

Эффективным и часто применяемым в разных странах методом является увлажнение угля. Он применяется в различные периоды времени года. В летний период такая технология позволяет достичь максимальной эффективности. В зимний период увлажнение производят с применением снежных пушек.

Представляется целесообразным применение различных химических составов. В промышленности для различных целей используют уголь определенных марок. Для предотвращения процесса пыления угля определенной марки подбирают химический состав с целью реактивной обработки, который при нанесении на

штабель создает пленку на поверхности угля, препятствуя его распылению.

Перспективным методом защиты от пыления является метод укрытия с учетом использования защитных или предохранительных экранов. Предохранительные экраны служат ограждающим барьером распространения на значительные расстояния угольной пыли, а именно пыли от угольных терминалов до зон жилой застройки, а перфорация позволяет сократить скорость ветра, пыль угля оседает, а площадь распространения пыли значительно снижается [18].

### **Заключение**

На территории Российской Федерации множество терминалов, которые приближены к городским территориям. В частности, на Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД) в Дирекции имеется четыре терминала, на которых происходит переработка угля, эти терминалы находятся на расстоянии не менее 200 м от жилых построек, поэтому необходимо проводить расчет нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу по каждому производственному участку, работающему с навалочными грузами в связи с увеличением потребности в угольной продукции. Использование перечисленных мероприятий на производственных участках ВСЖД прогнозирует значительное улучшение экологической обстановки, а также возможный рост доходов ТСК, так как будет снят ряд ограничений, связанных с погрузо-разгрузочной работой на железнодорожных станциях.

### **Список литературы**

1. Стратегия развития Холдинга «РЖД» на период до 2030 года // ОАО «РЖД»: сайт. URL : <https://volgograd-terkom34.ru/wp-content/uploads/2017/05/Стратегия-развития-ОАО-РЖД-до-2030-года.pdf> (Дата обращения 10.12.2022).
2. Российские железные дороги // ОАО «РЖД»: сайт. URL: <http://www.rzd.ru> (Дата обращения 25.11.2022).
3. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. URL: <http://mintrans.gov.ru/documents/8/11577> (Дата обращения 28.11.2022).
4. Об утверждении Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.09.2018 г. № 2101-р. URL: <http://government.ru/docs/34297/> (Дата обращения 15.12.2022).
5. Власова Н.В., Игнатьева Е.И., Гордеев К.Е. Комплекс мероприятий по улучшению экологической обстановки на железнодорожной станции Касьяновка Восточно-Сибирской железной дороги // Молодая наука Сибири. 2021. № 3 (13). С. 126–133. URL:<http://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/192> (Дата обращения 28.11.2022).
6. Игнатьева Е.И., Гордеев К.Е., Власова Н.В. Комплексная технология экомониторинга воздуха и систем борьбы с пылью для улучшения экологической обстановки на железнодорожной станции Касьяновка Восточно-Сибирской железной дороги // Наука молодых – будущее России : сб. науч. ст. VI Междунар. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых. Курск, 2021. Т. 4. С. 256–260.

7. Данчина Д.А., Дегтярева А.Н., Пьянова Е.С. Логистика доставки угля в дальневосточные порты // Логистика – евразийский мост : материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск, 2022. Ч. 2. С. 90–94.
8. Ксенъченко И.В., Ермина М.В. Оценка влияния качества атмосферного воздуха промышленных городов на состояние здоровья населения // Успехи современного естествознания. 2011. № 8. С. 113.
9. Голохваст К.С. Профиль атмосферных взвесей в городах и его экологическое значение // Бюл. физиологии и патологии дыхания. 2013. № 49. С. 87–91.
10. Дмитриев В.Г. Оценка экологического риска. Аналитический обзор публикаций // Арктика и север. 2014. № 14. С. 126–147.
11. Суржиков Д.В., Осипов В.Д. Оценка воздействия канцерогенных загрязнителей окружающей среды на население промышленного города // Бюл. Вост.-Сиб. науч. центра Сиб. отделения Рос. акад. мед. наук. 2005. № 1 (39). С. 140–142.
12. Гранулометрический анализ атмосферных взвесей экологически благополучного и неблагополучного районов Владивостока / В.И. Янькова, Т.А. Гвозденко, К.С. Голохваст и др. // Здоровье. Медицинская экология. Наука. 2014. № 2 (56). С. 62–66.
13. О введении в действие новой редакции санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» : постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 25.09.2007 г. № 74 // Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс».
14. Ефимова Н.В. Оценка медико-социального и экологического ущерба, связанного с техногенным загрязнением атмосферного воздуха // Гигиена и санитария. 2006. № 5. С. 20–22.
15. Колнет И.В. Гигиеническая оценка загрязнения окружающей среды комплексом тяжелых металлов : автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 2000. 23 с.
16. Гигиеническая оценка опасности канцерогенных факторов атмосферного воздуха / О.Н. Литвиченко, И.А. Черниченко, Т.В. Коваленко и др. // Гигиена и санитария. 2007. № 1. С. 14–17.
17. Рахманин Ю.А., Новиков С.М., Румянцев Г.И. Методологические аспекты оценки риска для здоровья населения при кратковременных и хронических воздействиях химических веществ, загрязняющих окружающую среду // Гигиена и санитария. 2002. № 6. С. 5–7.
18. Бузмаков С.А. Антропогенная трансформация природной среды // Географический вестник. 2012. № 4 (23). С. 46–50.

### References

1. Strategiya razvitiya Kholdinga «RZHD» na period do 2030 goda (Elektronnyi resurs) [Development strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2030 (Electronic resource)]. Available at: <https://volgograd-terkom34.ru/wp-content/uploads/2017/05/Стратегия-развития-ОАО-РЖД-до-2030-года.pdf> (Accessed December 10, 2022).
2. Rossiiskie zheleznye dorogi (Elektronnyi resurs) [Russian Railways (Electronic Resource)]: Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed November 25, 2022).
3. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 g. № 3363-r «Ob utverzhdenii Transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation No 3363-r dated November 27, 2021]. Available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577> (Accessed November 28, 2022).
4. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 30.09.2018 g. № 2101-r «Ob utverzhdenii Kompleksnogo plana modernizatsii i rasshireniya magistral'noi infrastruktury na period do 2024 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation no 2101-r dated September 30, 2018 «On approval of the Comprehensive Plan for Modernization and Expansion of the trunk infrastructure for the period up to 2024»]. Available at: URL: <http://government.ru/docs/34297/> (Accessed December 15, 2022).
5. Vlasova N.V., Ignat'eva E.I., Gordeev K.E. Kompleks meropriyatiy po uluchsheniyu ekologicheskoi obstanovki na zheleznodorozhnoi stantsii Kas'yanovka Vostochno-Sibirskoi zheleznoi dorogi [A set of measures to improve the environmental situation at the Kasyanovka railway station of the East Siberian Railway]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no. 3 (13), pp. 126–133.
6. Ignat'eva E.I., Gordeev K.E., Vlasova N.V. Kompleksnaya tekhnologiya ekonomonitoringa vozdukha i sistem bor'by s pyl'yu dlya uluchsheniya ekologicheskoi obstanovki na zheleznodorozhnoi stantsii Kas'yanovka Vostochno-Sibirskoi zheleznoi dorogi [Integrated technology of environmental monitoring of air and dust control systems to improve the environmental situation at the Kasyanovka railway station of the East Siberian Railway]. *Sbornik nauchnykh statei VI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchennykh «Nauka molodykh – budushchee Rossii»* [Proceedings of the VI International scientific conference of promising developments of young scientists «Science of the Young – the Future of Russia»]. Kursk, 2021, vol. 4, pp. 256–260.
7. Danchina D.A., Degtyareva A.N., P'yanova E.S. Logistika dostavki uglya v dal'nevostochnye porty [Logistics of coal delivery to the Far Eastern ports]. *Materialy XVII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Logistika – evraziiskii most»* [Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference «Logistics – the Eurasian bridge»]. Krasnoyarsk, 2022, part 2, pp. 90–94.
8. Ksen'chenko I.V., Ermina M.V. Otsenka vliyaniya kachestva atmosfernogo vozdukha promyshlennykh gorodov na sos-toyanie zdorov'ya naseleniya [Evaluation of the impact of atmospheric air quality in industrial cities on the health status of the population]. *Uspexi sovremennogo estestvoznaniya* [Successes of modern natural sciences], 2011, no. 8, pp. 113.
9. Golokhvast K.S. Profil' atmosferykh vzvesei v gorodakh i ego ekologicheskoe znachenie [Profile of atmospheric suspensions in cities and its ecological significance]. *Byulleten' fiziologii i patologii dykhaniya* [Bulletin of Physiology and Pathology of Respiration], 2013, no. 49, pp. 87–91.

10. Dmitriev V.G. Otsenka ekologicheskogo riska. Analiticheskiy obzor publikatsii [Environmental risk assessment. Analytical review of publications]. *Arktika i sever* [Arctic and North], 2014, no. 14, pp. 126–147.
11. Surzhikov D.V., Osipov V.D. Otsenka vozdeistviya kantserogennykh zagryaznitelei okruzhayushchei sredy na naselenie promyshlennogo goroda [Evaluation of the impact of carcinogenic environmental pollutants on the population of an industrial city]. *Byulleten' Vostochno-Sibirskogo nauchnogo tsentra Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk* [Bulletin of the East Siberian Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Medical Sciences], 2005, no. 1 (39), pp. 140–142.
12. Yan'kova V.I., Gvozdenko T.A., Golokhvast K.S., Chaika V.V., Gorodnyi V.A. Granulometricheskii analiz atmosferykh vzvesei ekologicheski blagopoluchnogo i neblagopoluchnogo raionov Vladivostoka [Granulometric analysis of atmospheric suspensions of ecologically safe and disadvantaged areas of Vladivostok]. *Zdorov'e. Meditsinskaya ekologiya. Nauka* [Health. Medical ecology. The science], 2014, no. 2 (56), pp. 62–66.
13. Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 25.09.2007 g. № 74 «O vvedenii v deistvie novoi redaktsii sanitarno-epidemiologicheskikh pravil i normativov SanPiN 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Sanitarno-zashchitnye zony i sanitarnaya klassifikatsiya predpriyatii, sooruzhenii i inykh ob'ektov» [Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation No 74 dated September 25, 2007 «On the introduction of a new edition of sanitary and epidemiological rules and regulations of the sanitary norms and rules 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Sanitary protection zones and sanitary classification of enterprises, structures and other objects»].
14. Efimova N.V. Otsenka mediko-sotsial'nogo i ekologicheskogo ushcherba, svyazannogo s tekhnogennym zagryazneniem atmosfernogo vozdukhа [Assessment of medical, social and environmental damage associated with technogenic pollution of atmospheric air]. *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and sanitation], 2006, no. 5, pp. 20–22.
15. Kolnet I.V. Gigienicheskaya otsenka zagryazneniya okruzhayushchei sredy kompleksom tyazhelykh metallov [Hygienic assessment of environmental pollution by a complex of heavy metals]. Ph.D.'s thesis. Moscow, 2000, 23 p.
16. Litvienko O.N., Chernichenko I.A., Kovalenko T.V., Zinchenko G.G. Gigienicheskaya otsenka opasnosti kantserogennykh faktorov atmosfernogo vozdukhа [Hygienic assessment of the danger of carcinogenic factors of atmospheric air]. *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and sanitation], 2007, no. 1, pp. 14–17.
17. Rakhmanin Yu.A., Novikov S.M., Rummyantsev G.I. Metodologicheskie aspekty otsenki riska dlya zdorov'ya naseleniya pri kratkovremennykh i khronicheskikh vozdeistviyakh khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh okruzhayushchuyu sredu [Methodological aspects of risk assessment for public health under short-term and chronic effects of chemicals polluting the environment]. *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and sanitation], 2002, no. 6, pp. 5–7.
19. Buzmakov S.A. Antropogennaya transformatsiya prirodnoi sredy [Anthropogenic transformation of the natural environment]. *Geograficheskiy vestnik* [Geographic Bulletin], 2012, no. 4 (23), pp. 46–50.

#### Информация об авторах

**Руш Елена Анатольевна**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой техносферной безопасности, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: lrush@mail.ru.

**Власова Наталья Васильевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: natalya.vlasova.76@list.ru.

#### Information about the authors

**Elena A. Rush**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Head of the Department of Technosphere Safety, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: lrush@mail.ru.

**Natal'ya V. Vlasova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: natalya.vlasova.76@list.ru.

## **Влияние индуктивности на входе выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов электровоза переменного тока на работоспособность его плеч при параллельном соединении ветвей**

**В.Н. Знаенко✉, О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, А.О. Линьков**

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉znaenock@yandex.ru

### **Резюме**

В текущих реалиях, когда железнодорожные магистрали Восточного полигона наращивают грузооборот, стоит острая необходимость в мощном тяговом подвижном составе, выполняющем тонно-километровую работу. Энергоэффективность электровозов переменного тока с коллекторным тяговым приводом долгое время остается на относительно низком уровне. В связи с чем актуальными являются разработки в области повышения коэффициента мощности электровозов переменного тока. К таким разработкам относится выпрямительно-инверторный преобразователь на базе IGBT-транзисторов, созданный и испытанный учеными Иркутского государственного университета путей сообщения. Работа такого преобразователя на электровозе способна повысить коэффициент его мощности не менее чем на 13 % в режиме тяги и на 46 % в режиме рекуперативного торможения. Плечи силового блока выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов, исходя из условия обеспечения запаса по току, имеют по четыре параллельные ветви, каждая ветвь содержит IGBT-транзистор, последовательно подключенный к силовому диоду. При их параллельном соединении необходимо учитывать множество особенностей, важнейшим из которых является влияние индуктивностей в цепях на работоспособность преобразователя. В данной статье рассмотрено влияние индуктивности со стороны входа преобразователя на распределение тока по параллельным ветвям плеча на базе IGBT-транзисторов с учетом индуктивности силовых шин, связывающих параллельные ветви. Для проведения исследования в программе, разработанной ООО «ЗВ Сервис» SimInTech смоделировано плечо преобразователя с параллельным соединением четырех IGBT-транзисторов. По результатам моделирования получены диаграммы распределения тока по параллельным ветвям в зависимости от величины индуктивности на входе преобразователя. Исследование позволяет сделать вывод о том, как изменение индуктивности на входе преобразователя влияет на работоспособность выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов.

### **Ключевые слова**

электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, параллельное соединение, IGBT-транзистор, работоспособность

### **Для цитирования**

Влияние индуктивности на входе выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов электровоза переменного тока на работоспособность его плеч при параллельном соединении ветвей / В.Н. Знаенко, О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, А.О. Линьков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 33–41. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).33-41.

### **Информация о статье**

поступила в редакцию: 07.03.2023 г.; поступила после рецензирования: 08.06.2023 г.; принята к публикации: 09.06.2023 г.

## **The effect of inductance at the input of the rectifier-purpose converter on the basis of the IGBT transistor of the alternating current electric locomotive on the performance of its shoulders with a parallel connection of branches**

**V.N. Znaenok✉, O.V. Mel'nichenko, A.I. Portnoi, A.O. Lin'kov**

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

✉znaenock@yandex.ru

### **Abstract**

In the current reality, with the railway lines of the Eastern Range increasing freight turnover, there is an urgent need for a powerful traction rolling stock that performs ton-kilometer work. The energy efficiency of AC electric locomotives with a collector traction drive has remained at a relatively low level for a long time. In this connection, developments in the field of increasing the

power factor of AC electric locomotives are relevant. Such developments include an IGBT based rectifier-inverter converter designed and tested by scientists of Irkutsk State Transport University. The operation of such a converter on an electric locomotive can increase its power factor by at least 13 % in traction mode and by 46% in regenerative braking mode. The arms of the power block of IGBT-based rectifier-inverter converter on condition of ensuring the current margin, have four parallel branches, each branch containing an IGBT connected in series with a power diode. When they are connected in parallel, it is necessary to take into account many features, one of the most important being the effect of inductances in circuits on the performance of the converter. Therefore, this article considers the influence of the inductance from the converter input on the current distribution along the parallel branches of the arm based on IGBT, taking into account the inductance of the power buses connecting the parallel branches. To conduct the research, in the program by SimInTech, a converter arm with a parallel connection of four IGBTs was modelled. Based on the simulation results, diagrams of current distribution along parallel branches were obtained depending on the value of the inductance at the converter input. The information obtained allows to draw conclusions about how a change in the inductance at the input of the converter affects the performance of the IGBT-based rectifier-inverter converter.

### Keywords

AC electric locomotive, rectifier-inverter converter, parallel connection, IGBT transistor, performance

### For citation

Znaenok V.N., Mel'nichenko O.V., Portnoi A.I., Lin'kov A.O. Vliyanie induktivnosti na vkhode vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya na baze IGBT-tranzistorov elektrovoza peremennogo toka na rabotosposobnost' y ego plech pri paralel'nom soedinenii vetvei [The effect of inductance at the input of the rectifier-purpose converter on the basis of the IGBT of the alternating current electric locomotive to the performance of its shoulders with a parallel connection of branches]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 33–41. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).33-41.

### Article info

Received: March 7, 2023; Revised: June 8, 2023; Accepted: June 9, 2023.

### Введение

На сегодняшний день магистрали Восточного полигона востребованы в тех объемах, которые холдинг ОАО «РЖД» ожидал достичь через несколько лет. Исторически вопросы повышения пропускной и провозной способностей участков железных дорог являются актуальными. В стремлении рационально использовать действующую инфраструктуру ОАО «РЖД» увеличивают количество тяжеловесных поездов. Так, для Восточного направления по итогам восьми месяцев 2021 г. было сформировано 1,06 тыс. тяжеловесных поездов, за этот же период 2022 г. – 2,35 тыс. поездов, что в 2,3 раза больше. На 46 % выросло и количество контейнерных поездов по итогам девяти месяцев работы 2022 г. по сравнению с аналогичным периодом 2021 г. [1, 2].

Для наращивания весовых норм и увеличения качественных показателей работы железной дороги необходимы локомотивы, обеспечивающие требуемые тяговые характеристики. На сегодняшний день основными представителями самого современного и мощного тягового подвижного состава для Восточного полигона являются электровозы серии «Ермак».

Данные локомотивы оснащены электродвигателями НБ-514Б либо НБ-514Е, которые попарно на тележку подключаются к одному выпрямительно-инверторному преобразовате-

лю (ВИП) [3]. Также с конца 2019 г. осуществляется поставка таких локомотивов с поосным регулированием силы тяги, когда на каждый двигатель приходится отдельный канал ВИП [4]. При организации тяжеловесного движения поездов возрастает сила тяги электровозов и потребляемый ток, часть которого не используется непосредственно на тягу поездов, а курсирует по цепи «тяговый трансформатор – контактная сеть – тяговая подстанция», что снижает пропускную способность тяговых участков.

Силовые преобразователи электровозов мало чем отличаются от созданных более 50 лет назад (для электровоза ВЛ80р). Современные электровозы работают с коэффициентом мощности на всех зонах регулирования в режиме тяги и рекуперативного торможения не превышающим значений 0,85 и 0,65 соответственно.

Работа тиристорного ВИП сопровождается коммутацией полупроводников, которая вызывает значительные просадки и искажение напряжения в контактной сети, загрузкой контактного провода реактивным током, малым количеством возврата электроэнергии в контактную сеть при рекуперативном торможении, а также рядом других факторов [5]. Это вызывает увеличение межпоездного интервала, снижение пропускной способности, уменьшение

участковой скорости, увеличение затрат на электроснабжение и рост отказов электрооборудования электровозов [6].

Сегодня имеется ряд предложений по повышению коэффициента мощности электровозов переменного тока. Это, например, применение разрядных плеч в силовой схеме ВИП, позволяющее использовать накопленную энергию в индуктивности цепи и уменьшать угол сдвига фаз [7, 8]. Известны также исследования, направленные на изменение алгоритма работы ВИП [9, 10], на изменение величины сопротивления блоков балластных резисторов в режиме рекуперации либо их исключение из силовой цепи [11, 12]. Один из современных вариантов повышения коэффициента мощности – это замена полууправляемой тиристорной базы преобразователей электровоза на полностью управляемые полупроводники [13]. Наиболее перспективным на сегодняшний день является ВИП на базе IGBT-транзисторов, энергоэффективность которого доказана по результатам математического моделирования [14] и в ходе стендовых испытаний на базе сервисного локомотивного депо Боготол-Сибирский ЛокоТех Сервис.

Работа такого преобразователя на электровозе способна повысить его коэффициент мощности не менее чем на 13 % в режиме тяги и на 46 % в режиме рекуперативного торможения.

### Особенности конструкции выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов

Алгоритмы управления ВИП на базе IGBT-транзисторов позволяют работать электровозам переменного тока с коэффициентом мощности в режимах тяги и рекуперативного торможения равным 0,95, что снижает просадки и искажение напряжения в контактной сети [6]. Стоит также отметить, что драйверы управления IGBT-транзисторами дают возможность осуществлять алгоритмические защиты силовых цепей и прерывать развитие аварийных процессов. Исходя из сказанного, исследование работоспособности ВИП на базе IGBT-транзисторов представляет интерес для современных отечественных электровозов серии «Ермак». Упрощенная функциональная схема тележки электровоза с ВИП на базе IGBT-транзисторов представлена на рис. 1.

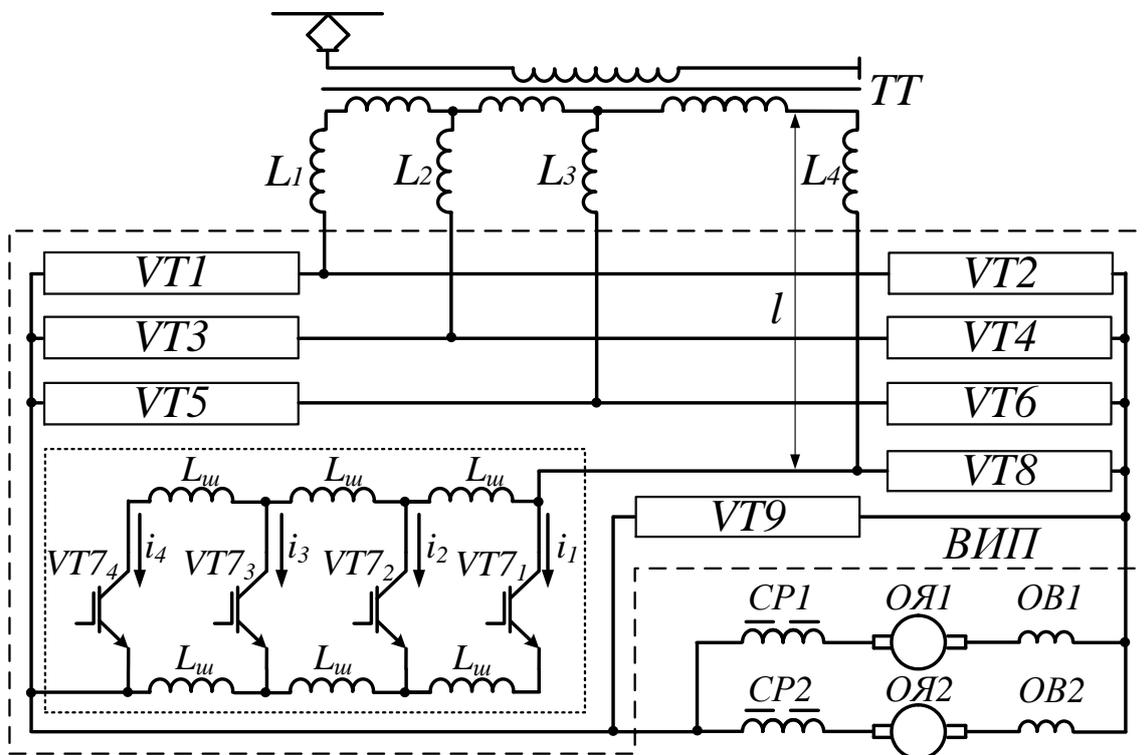


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема тележки электровоза с выпрямительно-инверторным преобразователем на базе IGBT-транзисторов

Fig. 1. Simplified functional diagram of an electric locomotive trolley with a rectifier-inverter converter based on IGBT

Блок силовой ВИП состоит из девяти плеч ( $VT1-VT9$ ). Для обеспечения необходимого запаса мощности плеча по току крайние плечи содержат в себе по четыре параллельные ветви ( $VT7_1-VT7_4$ ), в состав которых входят диодно-транзисторная сборка и снабберные цепи. Параллельное соединение IGBT-транзисторов высокой мощности обладает рядом особенностей, сказывающихся на работоспособности преобразователя. При проектировании учитываются условия охлаждения, параметры цепей управления, характеристики IGBT-транзисторов, снабберные цепи и др. [15–17]. Важным также является выбор способа расположения силовых шин.

Индуктивность коллекторных и эмиттерных шин  $L_{ш}$ , соединяющих параллельные ветви, оказывает значительное влияние на распределение токов по параллельно включенным ветвям. Так, при диагональном подключении шин переменного и постоянного токов к плечу ВИП (см. рис. 1) в момент открытия IGBT-транзисторов токи  $i_1-i_4$  по параллельным ветвям отличаются по величине. Крайние транзисторы плеча ( $VT7_4, VT7_1$ ), расположенные наиболее близко к точкам подключения шин переменного и постоянного токов, принимают основную нагрузку при включении и проводят больший ток. Внутренние же ветви ( $VT7_2, VT7_3$ ), где по сравнению с крайними токовые цепи более удалены от силовых шин постоянного и переменного токов, нагружены меньше [18].

Одним из важных вопросов при параллельном соединении ветвей является наличие индуктивности  $L_1-L_4$  на входе преобразователя, изменение которой приводит к изменению диаграмм протекания тока по параллельным ветвям в плече, и сказывается на работоспособности преобразователя. Этот вопрос предлагается рассмотреть в данной статье.

На электровозе ВИП соединяется с тяговым трансформатором (ТТ) электровоза, индуктивность которого неизменна. Однако при стендовых и последующих испытаниях непосредственно на электровозе возможны изменения условий подключения, связанные с различным удалением испытываемого ВИП от источника переменного напряжения за счет разной длины силовых кабелей его подключения. Связь индуктивности с длиной кабеля при допущении исключения изгибов может выражаться следующей зависимостью:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \cdot \left( \ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4} \right), \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $r$  – радиус поперечного сечения кабеля, м;  $l$  – длина кабеля, м.

Например, при радиусе поперечного сечения кабеля 5 мм, задавая различную длину кабеля подключения и получив его соответствующую индуктивность, можем проследить, как изменяется распределение тока по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов, от изменения индуктивности со стороны переменного напряжения. Для проведения исследования предлагается рассмотреть электромагнитные процессы в ветвях преобразователя посредством математического моделирования в программе SimInTech.

### **Моделирование работы четырехтранзисторного плеча выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов в программе SimInTech**

SimInTech – среда динамического моделирования технических систем, предназначенная для расчетной проверки работы систем управления сложными техническими объектами. SimInTech осуществляет моделирование технологических процессов, протекающих в различных объектах, с одновременным моделированием системы управления, и позволяет повысить качество проектирования систем управления за счет проверки принимаемых решений на любой стадии проекта. Программное обеспечение содержит набор специализированных библиотек, обеспечивающих моделирование электрических схем и электропривода [20]. Для расчета мгновенных значений параметров сетей переменного тока предусмотрена библиотека блоков «Электроцепи динамика», которая использована при проведении данного исследования.

Для моделирования IGBT-транзистора с учетом принятых допущений выбран блок, реализующий спрямленные статические вольтамперные характеристики с параллельно включенным обратным диодом. Общая структура модели полупроводникового элемента представлена на рис. 2.

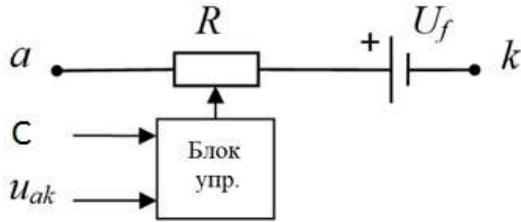


Рис. 2. Структура модели IGBT-транзистора в программе SimInTech:

$u_{ak}$  – значение напряжения на элементе, В;  $C$  – значение управляющего сигнала;  $R$  – сопротивление элемента, Ом;  $U_f$  – заданное в свойствах блока падение напряжения в прямом направлении, В

Fig. 2. Structure of the IGBT model in the SimInTech program:

$u_{ak}$  – the voltage value on the element, V;  $C$  – the value of the control signal;  $R$  – the resistance of the element, Ohms;  $U_f$  – the forward voltage drop specified in the block properties, V

По условиям моделирования приняты допущения:

- сигнал управления подается одновременно на все ветви плеча от одного драйвера;
- помехи в цепях управления отсутствуют;
- все транзисторы и диоды, включенные в параллельные ветви, имеют идентичные характеристики.

Для анализа распределения токов принят

момент включения и выключения силовых транзисторов. Время проводящего состояния ветвей соответствует существующим алгоритмам управления ВИП на IGBT-транзисторах для 3,5 зоны регулирования в режиме тяги.

На основании штатных схемотехнических решений подключения силовых шин, применяемым снабберным цепям, индуктивности силовых шин, соединяющих параллельные ветви и принятых допущениях в программе SimInTech построена модель четырехтранзисторного плеча ВИП электровоза (рис. 3).

### Анализ распределения тока по ветвям плеча выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов

Полученные в результате моделирования диаграммы протекания тока по параллельным ветвям плеча ВИП при подключении преобразователя к источнику переменного напряжения медным кабелем длиной 1 м и расчетной индуктивностью согласно (1), представлены на рис. 4.

Анализ рис. 4 показал, что в момент открытия транзисторов имеется значительный разброс по величине их тока включения. Ток по транзистору  $VT_4$  на 226 А больше чем, например, ток по транзистору  $VT_3$ , и практически

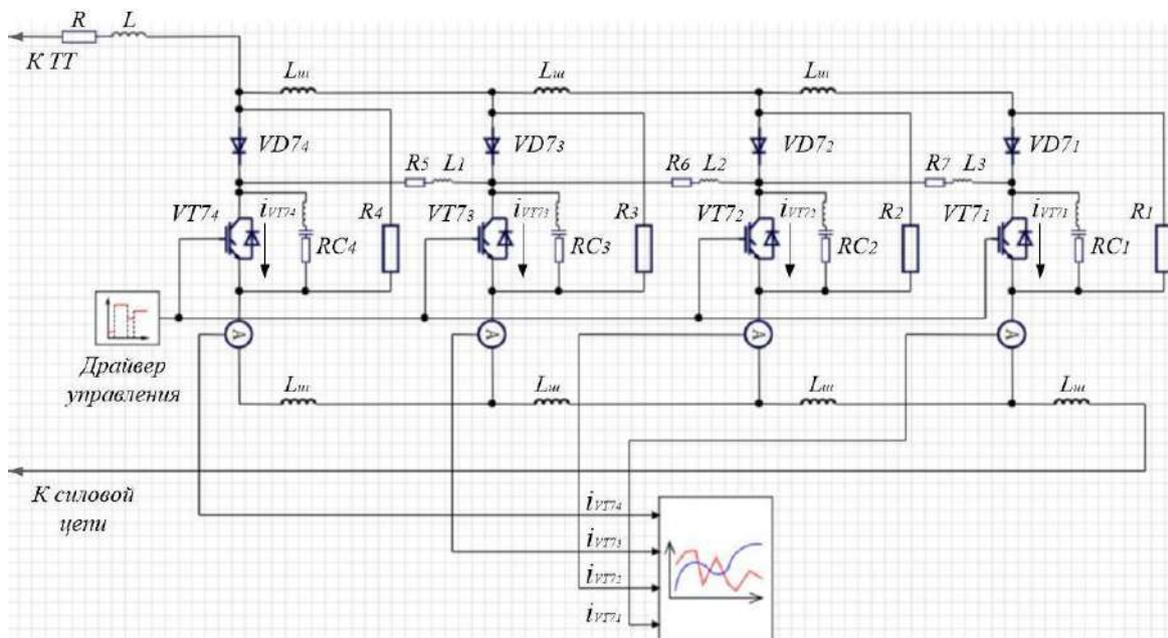


Рис. 3. Модель плеча выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов в программе SimInTech

Fig. 3. Arm model of an IGBT-based rectifier-inverter converter in the SimInTech program

составляет двойной номинальный ток ветви при текущих условиях работы. Для реального преобразователя электровоза такой режим недопустим, так как приведет к перегреву перегруженного транзистора  $VT7_4$  с последующим его прожогом и отказом плеча в целом.

Для исследования влияния значительно увеличим индуктивность на входе преобразователя, используем для примера длину провода 40 м. Тогда по результатам моделирования получим диаграммы протекания тока по параллельным ветвям плеча ВИП (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что при наличии значительной индуктивности на входе преобразователя, характерная точка включения транзисторов в явном виде прослеживается слабо и находится на уровне 100 А. Если сравнивать с предыдущим опытом (см. рис. 4) кривые тока

имеют идентичные формы, а для внутренних ветвей плеча  $VT7_2$  и  $VT7_3$  вовсе одинаковы, что является закономерным при выбранном способе подключения силовых шин. Такой вариант показывает достаточно удовлетворительный режим работы плеча преобразователя, обеспечивающий практически равномерное распределение тока по его ветвям.

Проведя ряд аналогичных опытов на модели в программе SimInTech при разной величине индуктивности на входе преобразователя, получены диаграммы распределения тока по параллельным ветвям плеча ВИП. Результаты моделирования представлены в таблице. При этом целесообразно учитывать значения тока включения только для двух ветвей, первая из которых принимается максимальной по току  $i_{\max}$  при включении, вторая – минимальной  $i_{\min}$ .

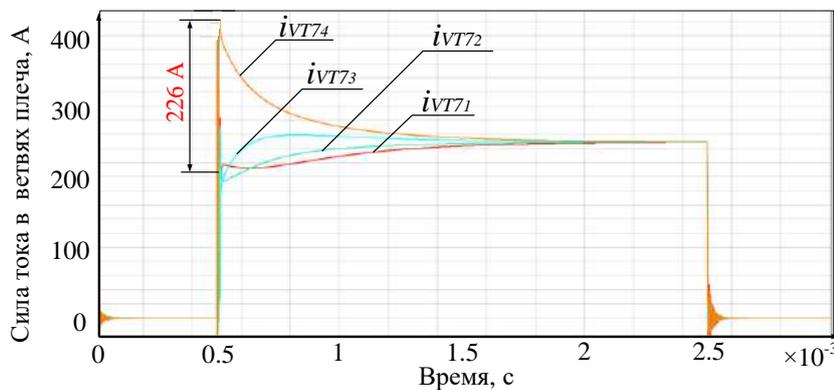


Рис. 4. Диаграммы протекания тока в параллельных ветвях плеча выпрямительно-инверторного преобразователя

на базе IGBT-транзисторов при длине провода подключения на входе преобразователя 1 м

Fig. 4. Diagrams of current flow in parallel branches of the arm of an IGBT-based rectifier-inverter converter with a connection wire length of 1 m at the input of the converter

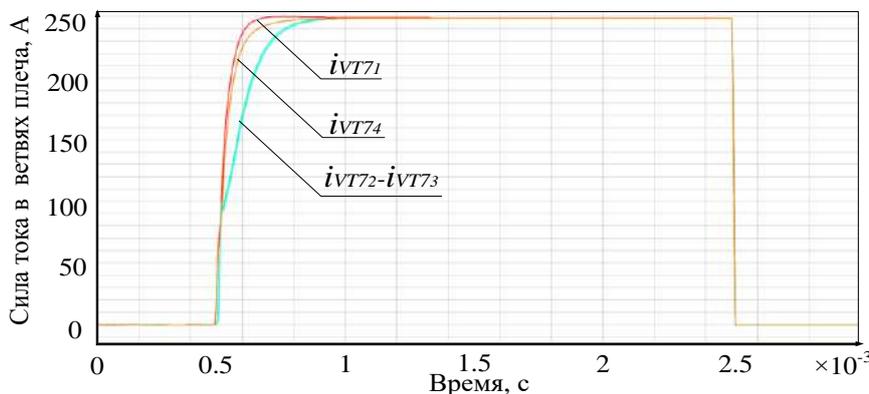


Рис. 5. Диаграммы протекания тока в параллельных ветвях плеча выпрямительно-инверторного преобразователя

на базе IGBT-транзисторов при длине провода подключения на входе преобразователя 40 м

Fig. 5. Diagrams of current flow in parallel branches of the arm of an IGBT-based rectifier-inverter converter with a connection wire length of 40 m at the input of the converter

Другая пара транзисторов имеет среднее значение тока включения, близкое к номинальному в течение всего периода.

По данным таблицы видно, что с увеличением длины кабеля подключения увеличивается и индуктивность. В соответствии с этим будет меняться и разница между токами по параллельным ветвям плеча ВИП. Так при моделировании ток в момент открытия транзисторов по ветвям может отличаться более чем в два раза. Для более наглядного представления построим зависимость отношения  $i_{\max} / i_{\min}$  от длины кабеля на входе преобразователя (рис. 6).

Результаты моделирования процесса открытия включенных параллельно IGBT-транзисторов плеча преобразователя показали, что при организации стендовых испытаний необходимо учитывать длину кабелей подключения преобразователя со стороны его входа и принимать практически идентичными, так как они будут установлены на реальном электровозе.

## Заключение

Исходя из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Индуктивность на входе преобразователя влияет на распределение тока по параллельным ветвям плеча ВИП на базе IGBT-транзисторов при встречном подключении шин.

2. Изменение величины индуктивности на входе преобразователя на базе IGBT-транзисторов может привести к увеличению разности тока в момент включения по ветвям плеча ВИП более чем в 2 раза.

3. При некорректном подборе вариантов подключения силовых шин сила тока в момент включения в наиболее нагруженной ветви может отличаться более чем на 220 А, что практически составляет номинальный ток отдельной ветви.

4. Оптимальное соединение шин для параллельного подключения IGBT-транзисторов должно подбираться под конкретные условия испытаний.

Результаты моделирования работы плеча выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов с четырехпараллельными ветвями  
Results of modeling the operation of the arm of an IGBT-based rectifier-inverter converter with four parallel branches

Радиус сечения кабеля, м Cable section radius, m	Длина кабеля, м Cable length, m	Индуктивность кабеля L, мкГн Cable inductance L, μH	Значение тока в момент включения IGBT-транзистора, А Current value at the moment of switching on the IGBT transistor, A		$i_{\max} - i_{\min}$	$i_{\max}/i_{\min}$
			В цепи наиболее нагруженного транзистора ( $i_{\max}$ ) In the circuit of the most loaded transistor ( $i_{\max}$ )	В цепи транзистора с наименьшей нагрузкой ( $i_{\min}$ ) In the circuit of the least loaded transistor ( $i_{\min}$ )		
0,005	1	1,05	420	194	226	2,16
	5	6,85	369	193	176	1,91
	10	15,09	356	191	165	1,86
	15	23,85	290	190	100	1,53
	20	32,95	283	210	73	1,35
	40	71,44	250	210	40	1,19



Рис. 6. Диаграмма зависимости отношения  $i_{\max} / i_{\min}$  от длины кабеля подключения на входе преобразователя

Fig. 6. Diagram of the dependence of the  $i_{\max} / i_{\min}$  ratio on the length of the connection cable from the AC voltage side

## Список литературы

1. Рационализировать перевозки // Гудок. 2022. № 168. сент. : электрон. газ. URL : <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1614134> (дата обращения 14.02.2023).
2. «PRO//Движение. Сибирь». Запрос на умную логистику и тяжеловесные поезда // Гудок. 2022. сент. : электрон. газ. URL: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1614107/> (дата обращения 14.02.2023).
3. Книга 5. Описание и работа. Электронное оборудование. Преобразователи // Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. ИДМБ.661142.009РЭ (ЗТС.001.012РЭ). Новочеркасск : ВЭЛНИИ, 2005. 125 с.
4. Задорожный В.Л. Особенности электровозов серии «Ермак» с поосным регулированием силы тяги // Локомотив. 2019. № 10 (754). С. 11–16.
5. Знаенко В.Н., Линьков А.О., Мельниченко О.В. Выпрямительно-инверторный преобразователь электровоза на базе IGBT-транзисторов как способ повышения пропускной способности участков железной дороги // Изв. Транссиба. 2021. № 1 (45). С. 66–75.
6. Макашева С. И., Пинчуков П.С., Мельниченко О.В. Оценка потерь напряжения в тяговой сети при работе электровозов с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе тиристорных и IGBT-транзисторов // Изв. Транссиба. 2022. № 3 (51). С. 112–125.
7. Власевский С.В., Скорик В.Г., Буяева Е.В., Фокин Д.С. Повышение коэффициента мощности выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения // Электроника и электрооборудование транспорта. 2011. № 1. С. 2–5.
8. Иванов В.С., Баринов И.А. Дiodно-транзисторная база моторвагонного подвижного состава переменного тока // Молодая наука Сибири. 2018. № 1. С. 49–57.
9. Газизов Ю.В. Новый алгоритм управления полупроводниковыми преобразователями электровоза // Наука. Технологии Инновации : материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых. Новосибирск, 2008. Т. 3. С. 88–90.
10. Тихменев Б.Н., Кучумов В.А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. М. : Транспорт, 1988. 310 с.
11. Шрамко С.Г. Повышение эффективности эксплуатации электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения // Вестн. Иркутск. гос. техн. ун-та. 2016. № 4 (111). С. 192–199.
12. Томилов В.С. Влияние блока балластных резисторов на КПД электрической цепи электровоза переменного тока // Вестн. Урал. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 3 (55). С. 138–144.
13. Линьков А.О. Совершенствование выпрямительной установки возбуждения тяговых двигателей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения : дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2015. 177 с.
14. Яговкин Д.А. Совершенствование выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока и принципа его управления в режиме тяги : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск. 2016. 178 с.
15. Проблемы параллельного и последовательного соединения IGBT. Ч. 1. Параллельная работа IGBT / А. Винтрих, У. Николаи, В. Турски и др. // Силовая электроника. 2013. Т. 4. № 43. С. 67–74.
16. Хофштоттер Н., Ламп И., Колпаков А. Параллельная работа IGBT при различных способах управления затворами // Силовая электроника. 2017. Т. 4. № 67. С. 12–23.
17. Колпаков А. Особенности параллельного соединения модулей IGBT // Компоненты и технологии. 2005. № 8 (52). С. 134–139.
18. Знаенко В.Н., Мельниченко О.В., Линьков А.О. Влияние конструкции силовых шин на токовую симметрию в ветвях плеча выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах при их параллельном включении // Изв. Транссиба. 2022. № 2 (50). С. 74–85.
19. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Ленинград : Энергоатомиздат, 1986. 487 с.
20. Среда динамического моделирования SimInTech : программа // SimInTech : сайт. URL : <https://simintech.ru/> (Дата обращения 14.02.2023).

## References

1. Ratsionalizirovat' perevozki (Elektronnyi resurs) [Rationalize transportation (Electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1614134> (Accessed February 14, 2023).
2. «PRO // Dvizhenie. Sibir'». Zпрос na umnyu logistiku i tyazhelovesnye poyezda (Elektronnyi resurs) [«PRO // Motion. Siberia». Request for smart logistics and heavy trains (Electronic resource)]. Available at: <https://gudok.ru/content/freighttrans/1614107/> (Accessed February 14, 2023)
3. Elektrovoz magistral'nyi 2ES5K (3ES5K): Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kniga 5. Opisanie i rabota. Elektronnoe oborudovanie. Preobrazovateli. IDMB.661142.009.RE5. [Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K): Operation manual. Book 5. Description and work. Electronic equipment. Converters. IDMB.661142.009.RE5]. NovoCherkassk ; VELNII Publ., 2005. 125 p.
4. Zadorozhnyi V.L. Osobennosti elektrovozov serii «Ermak» s poosnym regulirovaniem sily tyagi [Features of electric locomotives of the «Ermak» series with axial control of traction force].  *Lokomotiv [Locomotive]*, 2019, no. 10 (754), pp. 11–16.
5. Znaenok V.N., Lin'kov A.O., Mel'nichenko O.V. Vypryamitel'no-invertornyi preobrazovatel' elektrovoza na baze IGBT-tranzistorov kak sposob povysheniya propusknosti sposobnosti uchastkov zheleznoi dorogi [Rectifier-inverter converter of an electric locomotive based on IGBT as a way to increase the capacity of railway sections]. *Izvestiya Transsiba [Bulletins of the Transsib]*, 2021, no. 1 (45), pp. 66–75.
6. Makasheva S.I., Pinchukov P.S., Mel'nichenko O.V. Otsenka poter' napryazheniya v tyagovoi seti pri rabote elektrovozov s vypryamitel'no-invertornymi preobrazovatelyami na baze tiristorov i IGBT-tranzistorov [Estimation of voltage losses in traction network when operating electric locomotives with rectifier-inverter converters based on thyristors and IGBT-transistors].

losses in the traction network during operation of electric locomotives with rectifier-inverter converters based on thyristors and IGBT]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of the Transsib], 2022, no. 3 (51), pp. 112–125.

7. Vlasevskii S.V., Skorik V.G., Bunyaeva E.V., Fokin D.S. Povyshenie koeffitsienta moshchnosti vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya elektrovoza peremennogo toka v rezhimakh tyagi i rekuperativnogo tormozheniya [Increasing the power factor of the rectifier-inverter converter of an alternating current electric locomotive in traction and regenerative braking modes]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], 2011, no. 1, pp. 2–5.

8. Ivanov V.S., Barinov I.A. Diodno-tranzistornaya baza motorvagonnogo podvizhnogo sostava peremennogo toka [Diode-transistor base of AC rolling stock]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia], 2018, no. 1, pp. 1–9.

9. Gazizov Yu.V. Novyi algoritm upravleniya poluprovodnikovymi preobrazovatelyami elektrovoza [New control algorithm for electric locomotive semiconductor converters]. *Materialy Vserossiyskoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh «Nauka. Tekhnologii Innovatsii»* [Proceedings of the All-Russian Scientific Conference of young scientists «The science. Technologies Innovations»]. Novosibirsk, 2008, vol. 3, pp. 88–90.

10. Tikhmenev B.N., Kuchumov V.A. Elektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami [AC electric locomotives with thyristor converters]. Moscow: Transport Publ., 1988. 310 p.

11. Shramko S.G. Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii elektrovozov peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya [Improving the efficiency of operation of AC electric locomotives in the regenerative braking mode]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2016, no. 4 (111), pp. 192–199.

12. Tomilov V.S. Vliyaniye bloka ballastnykh rezistorov na KPD elektricheskoi tsepi elektrovoza peremennogo toka [Influence of a block of ballast resistors on the efficiency of the electric circuit of an alternating current electric locomotive]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State Transport University], 2022, no. 3 (55), pp. 138–144.

13. Lin'kov A.O. Sovershenstvovanie vypryamitel'noi ustanovki vozbuzhdeniya tyagovykh dvigatelei elektrovoza peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya [Improvement of the rectifier system for excitation of traction motors of an alternating current electric locomotive in the mode of regenerative braking]. Ph.D.'s thesis. Irkutsk, 2015. 177 p.

14. Yagovkin D.A. Sovershenstvovanie vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya elektrovoza peremennogo toka i printsipa ego upravleniya v rezhime tyagi [Improvement of the rectifier-inverter converter of an alternating current electric locomotive and the principle of its control in the traction mode]. Ph.D.'s thesis. Irkutsk, 2016. 178 p.

15. Wintrich A., Nicolai U., Turski W., Reimann T. Problemy parallel'nogo i posledovatel'nogo soyedineniya IGBT. Chast' 1. Parallel'naya rabota IGBT [Problems of IGBT parallel and series connection. Part 1. Parallel operation of IGBT]. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2013, vol. 4, no. 43, pp. 67–74.

16. Hofstotter N., Lamp J., Kolpakov A. Parallel'naya rabota IGBT pri razlichnykh sposobakh upravleniya zatvorami [Parallel operation of IGBTs with various gate control methods]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics], 2017, vol. 4, no. 67, pp. 12–23.

17. Kolpakov A. Osobennosti parallel'nogo soyedineniya modulei IGBT [Features of parallel connection of IGBT modules]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2005, no. 8 (52), pp. 134–139.

18. Znaenok V.N., Mel'nichenko O.V., Lin'kov A.O. Vliyaniye konstruksii silovykh shin na tokovuyu simmetriyu v vetvyakh plecha vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya na IGBT-tranzistorakh pri ikh parallel'nom vklyuchenii [Influence of the design of power buses on the current symmetry in the branches of the arm of the rectifier-inverter converter on IGBT when they are connected in parallel]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of the Transsib], 2022, no. 2 (50), pp. 74–85.

19. Kalantarov P.L., Zeitlin L.A. Raschet induktivnostei [Calculation of inductances:]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p.

20. Sreda dinamicheskogo modelirovaniya SimInTech (Elektronnyi resurs) [SimInTech Dynamic Simulation Environment (Electronic resource)]. Available at: <https://simintech.ru/> (Accessed February 14, 2023).

### Информация об авторах

**Знаенко Вячеслав Николаевич**, аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: znaenock@yandex.ru.

**Мельниченко Олег Валерьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: olegmelnval@mail.ru.

**Портной Александр Юрьевич**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: portnoy\_alexander@mail.ru.

**Линьков Алексей Олегович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: linkovalex@mail.ru.

### Information about the authors

**Vyacheslav N. Znaenok**, Ph.D. Student of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: znaenock@yandex.ru.

**Oleg V. Mel'nichenko**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Head of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olegmelnval@mail.ru.

**Alexander Yu. Portnoi**, Doctor of Physical and Mathematical Science, Associate Professor, Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrument Engineering, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: portnoy\_alexander@mail.ru.

**Aleksei O. Lin'kov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: linkovalex@mail.ru.

## Перспективные конструкции горочных горловин

Л.Н. Иванкова<sup>1</sup>✉, А.Н. Иванков<sup>2</sup>, М.В. Четчуев<sup>3</sup>, А.В. Буракова<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Российский университет транспорта, г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>ООО «ПСК ТехПроект», г. Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>4</sup>Филиал Ростовского государственного университета путей сообщения, г. Воронеж, Российская Федерация

✉ivankovaln@yandex.ru

### Резюме

В статье анализируются проблемы, с которыми сталкиваются проектировщики при разработке горочных горловин при большом числе сортировочных путей. Для крайних путей очень сложно вписать кривые радиусом 200 м и более. Приходится применять обратные кривые, что создает дополнительное сопротивление движению вагонов при скатывании с сортировочной горки. Были предложены новые конструкции горочных горловин с десятипутными пучками, что позволит без затруднений вписывать кривые радиусом 200 м и более. Кроме того, предлагаемые горочные горловины обеспечивают требуемую ширину междупутий. Конструкция горочной горловины влияет и на продольный профиль спускной части. В силу того, что участок стрелочной зоны получается более длинным по сравнению с классическими восьмипутными пучками, скоростной участок получается более коротким. Это дает возможность проектировать скоростные участки более крутыми, что приводит к скорейшему разделению отцепов на стрелочных переводах и замедлителях. В работе сделан вывод, что основные параметры сортировочной горки при шести- и четырехпучковой горловине различаются незначительно. Длины расчетных путей практически одинаковы. Количество стрелочных переводов по маршруту скатывания остается неизменным. К некоторым недостаткам можно отнести то, что угол поворота кривой крайнего пути незначительно увеличивается по сравнению с классическим вариантом. Однако потребное количество замедлителей на спускной части горки уменьшается. Это существенно снижает объем инвестиций при строительстве сортировочной горки.

### Ключевые слова

горочные горловины, кривые радиусом 200 м, вписывание кривых, десятипутные пучки, спускная часть горки, замедлители, стрелочные переводы

### Для цитирования

Перспективные конструкции горочных горловин / Л.Н. Иванкова, А.Н. Иванков, М.В. Четчуев, А.В. Буракова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 42–50. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).42-50.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 31.03.2023 г.; поступила после рецензирования: 09.06.2023 г.; принята к публикации: 13.06.2023 г.

## Perspective construction of hump necks

L.N. Ivankova<sup>1</sup>✉, A.N. Ivankov<sup>2</sup>, M.V. Chetchuev<sup>3</sup>, A.V. Burakova<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Russian University of Transport, Moscow, the Russian Federation

<sup>2</sup>LLC «PSK Techproekt», Moscow, the Russian Federation

<sup>3</sup>Saint Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I, Saint Petersburg, the Russian Federation

<sup>4</sup>Branch of the Rostov State Transport University, Voronezh, the Russian Federation

✉ivankovaln@yandex.ru

### Abstract

The article analyzes the problems faced by designers when developing hump necks with a large number of sorting paths. For last paths, it is very difficult to fit curves with a radius of 200 meters or more. It is necessary to use reverse curves, which creates additional resistance to the movement of wagons when rolling down the sorting hump. New designs of hump necks with ten-track bundles were proposed, allowing to easily enter curves with a radius of 200 meters or more. Besides, the proposed hump necks provide the required width of the interstices. The design of the hump neck also affects the longitudinal profile of the descent part. Due to the fact that the section of the switch area turns out to be longer compared to the classic eight-track beams, the high-speed section turns out to be shorter. This makes it possible to design the high-speed sections steeper, resulting in earlier separation of the detachments on the switches and retarders. The article concludes that the main parameters of the sorting hump with a six- and four-track bunches differ insignificantly. The lengths of the calculated paths are almost the same. The number of switches along the rolling route remains unchanged. The few disadvantages include the fact that the angle of rotation of the last path curve increases slightly as compared to the classic version. However, the required number of retarders on the descent part of the hump is reduced. This significantly reduces the amount of investment in the construction of a sorting hump.

**Keywords**

slide necks, curves with a radius of 200 m, inscribing curves, ten-pair bundles, the descent part of the slide, retarders, wire transfers

**For citation**

Ivankova L.N., Ivankov A.N., Chetchuev M.V., Burakova A.V. Perspektivnye konstruksii gorochnykh gorlovin [Perspective construction of hump necks]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 42–50. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).42-50.

**Article info**

Received: March 31, 2023; Revised: June 9, 2023; Accepted: June 13, 2023.

**Введение**

Горочные горловины сортировочных станций играют большую роль в организации успешного сортировочного процесса, влияют на перерабатывающую способность горки и безопасность роспуска с нее вагонов. К горочным горловинам предъявляются противоречивые требования: они должны обеспечивать скорейшее разделение отцепов по маршрутам скатывания, работа сил сопротивления на разных путях должна быть примерно одинакова, однако количество стрелочных переводов по возможности минимизируется. Необходимо обеспечить вписывание кривых радиусом 200 м [1] и выдержать минимальную ширину междупутья между соседними пучками.

В практике проектировщиков накопилось достаточно много оригинальных «находок», позволяющих предлагать разумные компромиссы при выполнении столь дифференцированных требований к проектированию горочной горловины. Задача конструирования горловины тем сложнее, чем большее количество путей необходимо объединить. При значительном числе путей угол поворота горловины относительно оси парка возрастает, и это приводит к уменьшению возможных радиусов для вписывания закрестовинных кривых. Однако, как было отмечено [2–4], доля длиннобазных вагонов постоянно растет, и сложность их вписывания в кривые малого радиуса в сортировочных пучках приводит к необходимости менять специализацию путей таким образом, чтобы длиннобазные вагоны поступали главным образом на средние пути сортировочного парка. Это не способствует рациональной специализации путей и, в конечном счете, влияет на перерабатывающую способность горки.

**Горловины с шести-, семипутными пучками**

Типовые схемы горочных горловин сортировочных парков базируются на восьмипутных пучках, которые при необходимости транс-

формируются в семипутные или шестипутные пучки [5, 6]. Вписывание кривых при радиусах 180 и 140 м [7] не представляло особой сложности. Ситуация осложнилась с введением обязательного требования применять в горочных горловинах кривые радиусом 200 м. Приходится использовать обратные кривые с минимальными прямыми вставками (или без них), чтобы обеспечить укладку кривых требуемого радиуса и необходимую ширину междупутья. Применение обратных кривых увеличивает суммарную работу сил сопротивления движению отцепов. Отсутствие прямой вставки не позволяет тележкам вагона своевременно занять положение параллельно оси пути, что влияет на скорость скатывания. Ряд авторов отмечает сложность вписывания круговых кривых на крайних путях, особенно при большом числе путей в сортировочном парке [8–13].

На рис. 1 представлена типовая горловина на 40 путей, запроектированная в соответствии с требованиями [1]. Горловина симметричная. Сортировочные пути объединены в шесть пучков, крайние из которых неполные (шестипутные). В горловине уложены 38 стрелочных переводов марки  $1/6^\circ$ , не считая головной разделительной стрелки и 18 замедлителей на спускной части горки.

**Горочные горловины с десятипутными пучками**

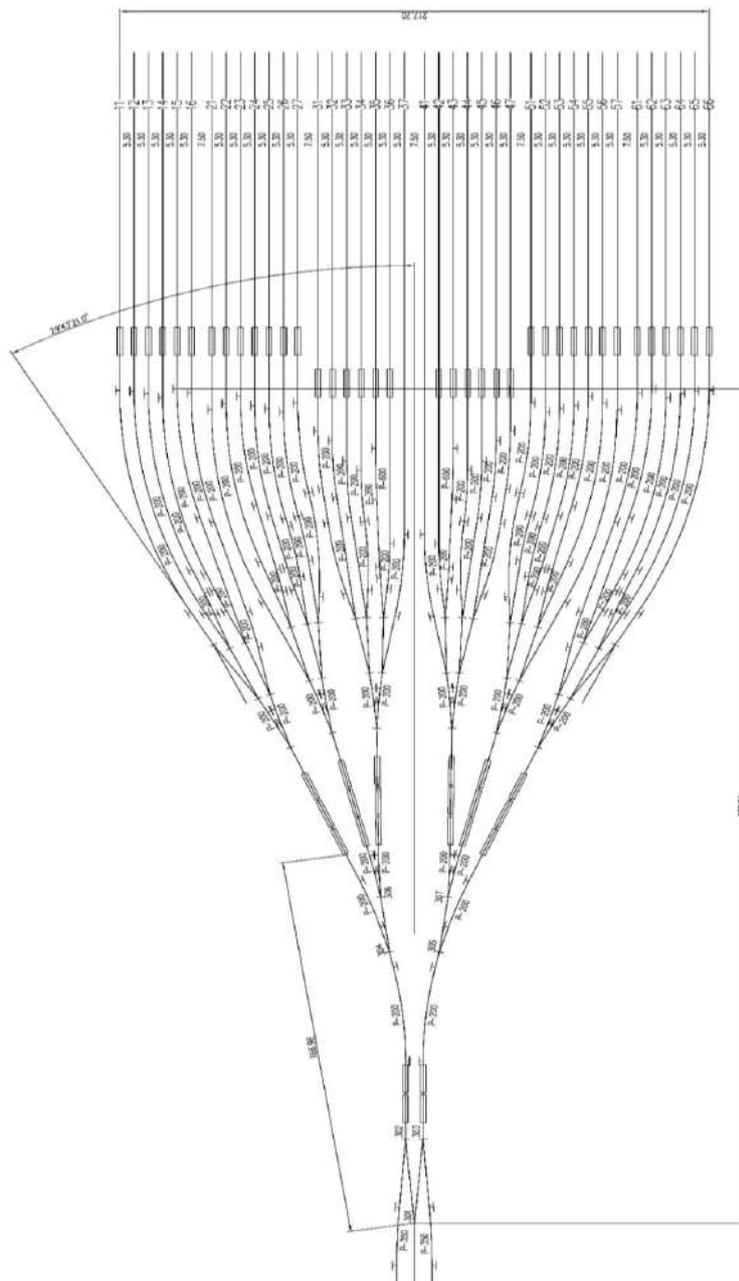
Авторами предложено использовать при проектировании горочных горловин с большим числом путей десятипутные пучки. Хотя подобная конструкция занимает несколько большую территорию по ширине (на 8–10 м), количество стрелочных переводов не меняется, не изменяется также длина расчетного пути, которая влияет на наличную высоту сортировочной горки. Основное преимущество таких горловин – уменьшение количества пучков и, следовательно, потребное количество пучковых замедлителей. Это су-

щественно снижает объем инвестиций при строительстве сортировочной горки.

На рис. 2 представлена рекомендуемая горловина на 40 путей, запроектированная в соответствии с требованиями [1]. Горловина симметричная. Сортировочные пути объединены в четыре пучка, все пучки полные (десятипутные). В горловине уложены 38 стрелочных переводов марки 1/6°, не считая головной разделительной стрелки и 12 замедлителей на спускной части горки. Проектируя эту горло-

вину, легче обеспечить минимальную ширину междупутий между смежными пучками. Здесь тоже пришлось применить обратные кривые, однако есть возможность уложить прямые вставки достаточной длины, что позволит тележкам вагонов быстрее принять положение, параллельное оси пути, по которому скатывается отцеп.

Сравнительные геометрические параметры стрелочных горловин на 40 путей показаны в табл.



**Рис. 1.** Схема горочной горловины на сорок путей с шести-, семипутными пучками

**Fig. 1.** The scheme of the hump neck for forty tracks with six-, seven-track bundles

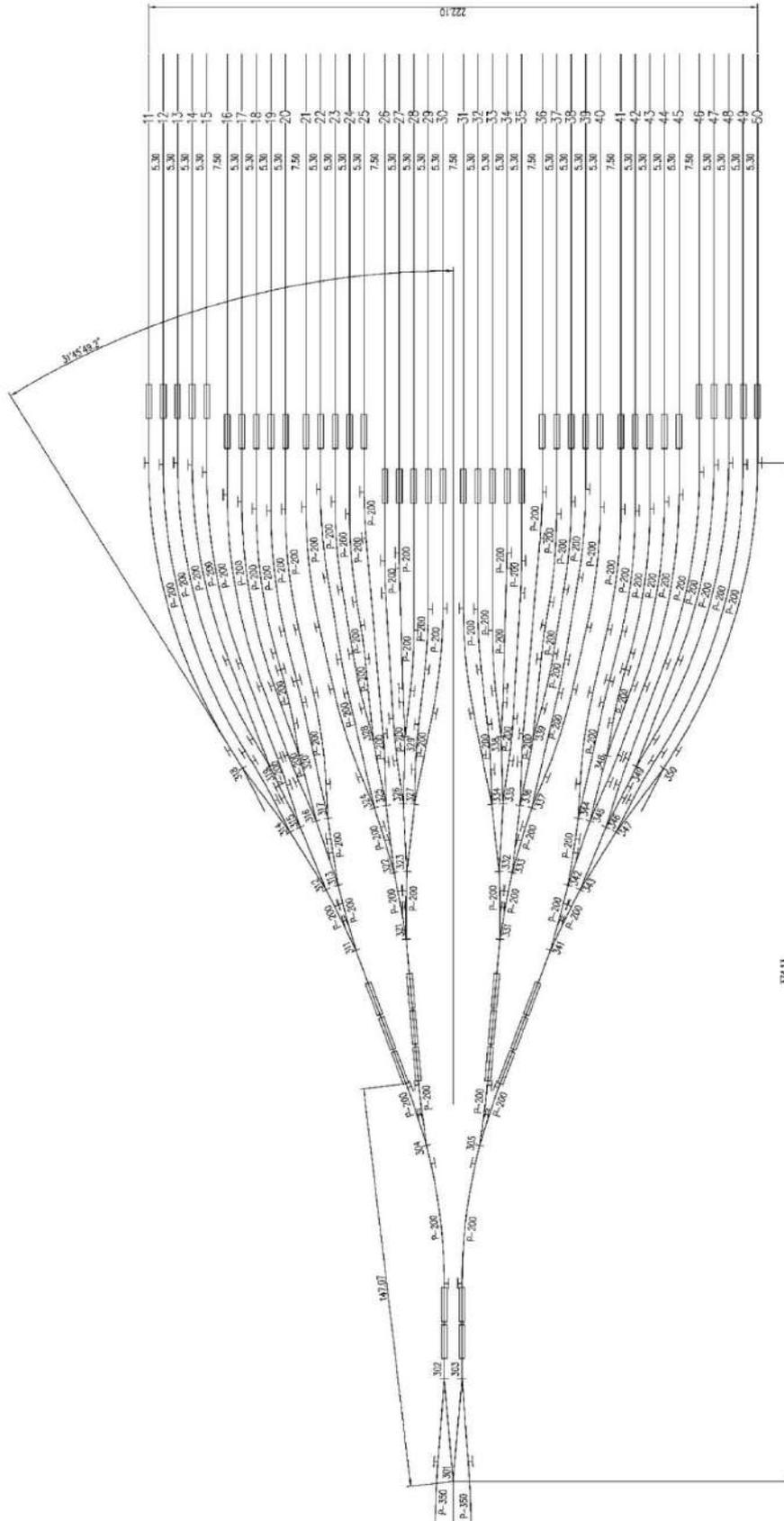


Рис. 2. Схема горочной горловины на сорок путей с десятипутными пучками  
 Fig. 2. The scheme of the hump neck for forty tracks with ten-track bundles

Геометрические параметры горловин на 40 путей  
Geometric parameters of necks for 40 tracks

Показатель Indicator	Горловина с шестью пучками Six bundle neck	Горловина с четырьмя пучками Four bundle neck
Количество замедлителей на пучковой тормозной позиции Number of retarders in bundle braking position	6×3 = 18	4 ×3 = 12
Проекция расчетного пути от центра стрелочного перевода первой разделительной стрелки до конца закрестовинной кривой Projection of the calculated path from the shunt turnout center of the first dividing switch to the end of the cross curve	373,59	374,13
Проекция от центра стрелочного перевода первой стрелки до начала пучковой тормозной позиции Projection from the shunt center of the first switch to the beginning of the bundle brake position	166,98	147,07
Сумма междупутей Sum of interpaths	217,70	222,10
Угол поворота закрестовинной кривой последнего пути Angle of rotation of the last path cross curve	29°43'21"	31°45'49,2"
Расчетная высота горки при скорости ветра 3,5 м/с и угле обдува 30°, м.э.в. Estimated height of the hump at a wind speed of 3,5 m/s and an airflow angle of 30°, m.e.w.	4,186	4,214

Таким образом, на основе таблицы можно сделать заключение, что основные параметры сортировочной горки при шести- и четырехпучковой горловине различаются незначительно. Длины расчетных путей практически одинаковы. Угол поворота закрестовинной кривой последнего пути в четырехпучковой горловине больше на 2°, чем в шестипучковой горловине. Однако несмотря на некоторое различие в длине расчетного пути и суммах углов поворотов, разница высот горок составляет всего 4,214 – 4,186 = 0,028 м.э.в., что не превышает 0,7 %.

Как было отмечено в [14–18], проектировать продольный профиль спускной части необходимо в комплексе с планом горочной горловины для более эффективной организации сортировочного процесса. Несмотря на незначительные отличия в общей длине расчетного пути, авторами были также исследованы длины отдельных участков спускного пути. Значительная разница в длине проекции от центра

первого по маршруту скатывания стрелочного перевода до начала пучковой тормозной позиции позволит иметь более длинный участок стрелочной зоны и более короткие скоростные участки в предлагаемой горловине и, следовательно, более крутые. Это приведет к быстрому набору скорости у отцепов и лучшему их разделению на стрелочных переводах и замедлителях. В конечном счете это будет способствовать увеличению перерабатывающей способности сортировочной горки.

Комплексная оценка сравниваемых вариантов может быть получена при помощи имитационной модели скатывания отцепов различной длины и весовых характеристик в различном сочетании. На рис. 3. приведены профили сортировочных горок с различным числом путей в пучках. На горке с десятипутными пучками реализуются более высокие скорости при занятии первых разделительных стрелок за счет более крутых скоростных уклонов.



В то же время горочные горловины с меньшим числом путей в пучке могут быть рекомендованы для расформирования составов груженных вагонов и смешанных групп (груженных и порожних). Стоит отметить, что удале-

ние пучковой тормозной позиции от вершины горки повышает эффективность торможения многовагонных отцепов.

На рис. 4. представлены горочные горловины с числом путей 20 и 30.

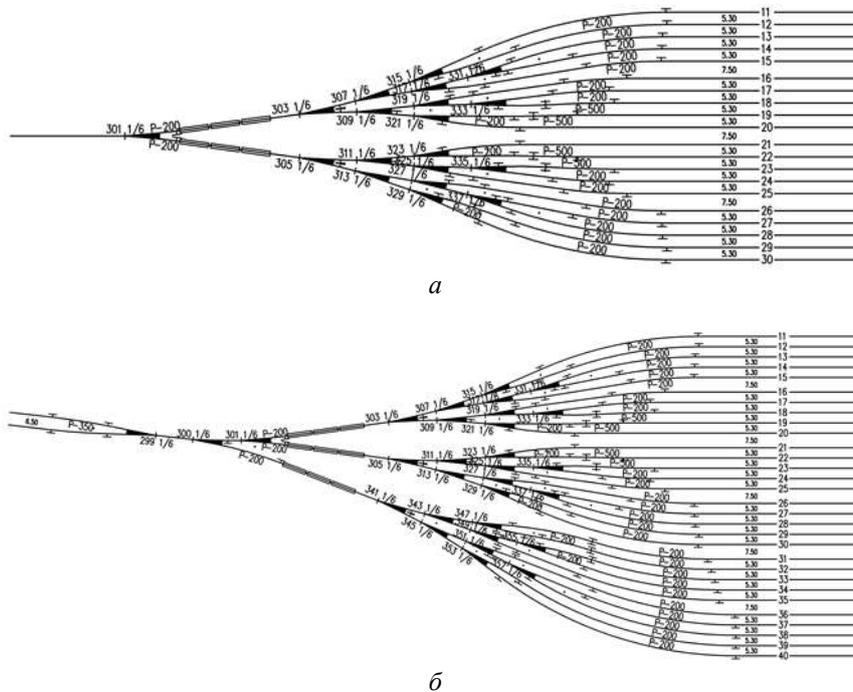


Рис. 4. Схема горочных горловин на 20 (а) и 30 путей (б) с десятипутными пучками  
Fig. 4. Scheme of hump necks for 20 (a) and 30 tracks (b) with ten-track bundles

Конструкция представленных стрелочных улиц убедительно доказывает возможность компоновки плана сортировочных горок при обеспечении компактности (минимальной длины горловины), эквивалентности маршрутов скатывания по количеству стрелочных переводов в маршруте и сумме углов поворота кривых, что исключает значительную дифференциацию путей одного пучка по суммарной работе сил сопротивления скатыванию отцепов. Это в конечном счете способствует энергоэффективности функционирования всего горочного комплекса.

### Заключение

Горочные горловины с десятипутными пучками хорошо вписываются в перечень требований, предъявляемых к их проектированию [1]. Они обеспечивают применение радиусов закрестовинных кривых 200 м и более, не увеличивают длину расчетного пути и, следовательно, высоту горки. Разделение отцепов на стрелочных переводах и замедлителях будет происходить быстрее и эффективнее. К недостаткам можно отнести

небольшое уширение суммы междупутий.

Основным преимуществом применения рекомендуемых горловин является уменьшение количества замедлителей на пучковой тормозной позиции, что существенно снижает требуемые инвестиции в сооружение сортировочного устройства.

Наибольшая эффективность по сокращению замедлителей на пучковых тормозных позициях будет отмечаться для горок с числом путей до 20–30. При росте количества путей в сортировочном парке эффект будет постепенно снижаться, так как общее количество замедлителей пучковых тормозных позиций будет расти (см. рис. 4).

Что касается горок малой мощности с числом путей до десяти, имеется возможность установки только одной тормозной позиции. Учитывая короткую длину горловины имеет смысл рассматривать вопрос об исключении парковой тормозной позиции с передачей функций прицельного торможения на единственную пучковую тормозную позицию.

Разработанные авторами статьи положения могут быть использованы при проектировании новых сортировочных устройств и реконструкции в связи с техническим перевооружением существующих сортировочных горок как на сети общего пользования, так и на промышленном железнодорожном транспорте.

### Список литературы

1. СП 225.1326000.2014. Станционные здания, сооружения и устройства : утв. приказом Минтранса РФ № 331 от 02.12.2014. Введ. : 2014–12–01. М. : Минтранс, 2014. 133 с.
2. Карасёв С.В. Обеспечение безопасности при применении упрощенных нормативов и условий роспуска вагонов с опасными грузами для автоматизированных сортировочных горок // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2018. Т. 1. С. 64–67.
3. Пожидаев С.А., Филатов Е.А. Проектирование плана горочных горловин сортировочных парков с учетом обеспечения безопасного взаимодействия длиннобазного подвижного состава // Вестн. Белорус. гос. ун-та трансп.: наука и транспорт. 2015. № 2 (31). С. 42–47.
4. Пожидаев С.А., Филатов Е.А., Иванов Е.Н. Автоматизированное проектирование плана горочной горловины с учетом обеспечения безопасного взаимодействия длиннобазного подвижного состава // Транспортные системы и технология перевозок. 2013. Вып. 6. С. 82–85.
5. Чернов В.И. Масштабные планы горочных горловин сортировочных парков. М. : Маршрут, 2006. 41 л.
6. Альбом горочных горловин сортировочных станций / В.И. Апатцев, В.Я. Болотный, А.Н. Сухопяткин и др. М. : РГОТУПС, 2008. 28 с.
7. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР. М. : Транспорт, 1992. 104 с.
8. Числов О.Н., Лебедева В.А., Хан В.В. Проектирование и расчет сортировочных горок. Ростов-на-Дону : РГУПС, 2017. 83 с.
9. Бобровский В.И., Колесник А.И., Дорош А.С. Совершенствование конструкции плана путевого развития горочных горловин // Транспортные системы и технология перевозок. 2011. Вып. 1. С. 27–33.
10. Бобровский В.И., Колесник А.И. Совершенствование метода расчета параметров плана горочных горловин // Транспортные системы и технология перевозок. 2011. Вып. 26. С. 40–47.
11. Проектирование сортировочных станций с автоматизированными горочными комплексами / В.Я. Негрей, В.А. Подкопаев, С.А. Пожидаев и др. Гомель : БелГУТ, 2015. 235 с.
12. Иванков А.Н., Четчуев М.В. О необходимости актуализации нормативно-правовой базы по проектированию железнодорожных станций, узлов и сортировочных устройств // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2021. Ч. 1. С. 60–65.
13. Иванкова Л.Н. Обеспечение комплексного проектирования плана и профиля сортировочной горки // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. 2018. № 14. С. 18–21.
14. Иванкова Л.Н., Иванков А.Н., Волкова С.Г. Некоторые аспекты проектирования плана горочной горловины // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта : межвуз. сб. научн. тр. М., 2021. С. 11–16.
15. Климов А.А. Влияние конструктивных параметров сортировочной горки на безопасность переработки вагонопотоков в современных условиях // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. Гомель, 2021. Ч. 1. С. 28–30.
16. Poltavskaya J., Lebedeva O., Gozbenko V. Automation of the solution to the problem of optimizing traffic in a multi-modal logistics system // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258. P. 255–261.
17. Increasing the efficiency of investigation methods for rail transport accidents / L. Martynenko, V. Gozbenko, I. Lebedev et al. // X International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2022. Novosibirsk, 2022, Vol. 63. P. 465–471.
18. Гозбенко В.Е., Оленевич В.А. Повышение безопасности работы железнодорожной транспортной системы на основе автоматизации технологии размещения и крепления груза в вагоне // Изв. Транссиба. 2013. № 1 (13). С. 110–116.

### References

1. SP 225.1326000.2014. Stantsionnye zdaniya, sooruzheniya i ustroistva [Set of rules 225.1326000.2014. Station buildings, structures and devices]. Moscow: Mintrans Publ., 2014. 133 p.
2. Karasev S.V. Obespechenie bezopasnosti pri primenenii uproshchennykh normativov i uslovii rospuska vagonov s opasnymi gruzami dlya avtomatizirovannykh sortirovochnykh gorok [Ensuring safety in the application of simplified standards and conditions for the dissolution of wagons with dangerous goods for automated sorting slides]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2018, vol. 1, pp. 64–67.
3. Pozhidaev S.A., Filatov E.A. Proektirovanie plana gorochnykh gorlovin sortirovochnykh parkov s uchedom obespecheniya bezopasnogo vzaimodeistviya dlinnobaznogo podvizhnogo sostava [Designing the plan of the hill necks of sorting parks taking into account the provision of safe interaction of long-wheelbase rolling stock]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport* [Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport], 2015, no. 2 (31), pp. 42–47.
4. Pozhidaev S.A., Filatov E.A., Ivanov E.N. Avtomatizirovannoe proektirovanie plana gorochnoi gorlovinny s uchedom obespecheniya bezopasnogo vzaimodeistviya dlinnobaznogo podvizhnogo sostava [Computer-aided design of the plan of the

mountain neck, taking into account the provision of safe interaction of long-wheelbase rolling stock]. *Transportnye sistemy i tekhnologiya perevozok* [Transport systems and technology of transportation], 2013, is. 6, pp. 82–85.

5. Chernov V.I. *Masshtabnye plany gorochnykh gorlovin sortirovochnykh parkov* [Large-scale plans of mountain necks of sorting parks]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 41 p.

6. Apattsev, V.I., Bolotnyi V.Ya., Sukhopyatkin A.N., Kol S.N. *Al'bom gorochnykh gorlovin sortirovochnykh stantsii* [Album of mountain necks of marshalling yards]. Moscow: RGOTUPS Publ., 2008. 28 p.

7. *Pravila i normy proektirovaniya sortirovochnykh ustroystv na zheleznykh dorogakh Soyuza SSR* [Rules and regulations for the design of sorting devices on the railways of the USSR]. Moscow: Transport Publ., 1992. 104 p.

8. Chislov O.N., Lebedeva V.A., Khan V.V. *Proektirovanie i raschet sortirovochnykh gorok* [Design and calculation of sorting slides]. Rostov-on-Don: RGUPS Publ., 2017. 83 p.

9. Bobrovskii V.I., Kolesnik A.I., Dorosh A.S. *Sovershenstvovanie konstruksii plana putevogo razvitiya gorochnykh gorlovin* [Improvement of the design of the plan for the track development of mountain necks]. *Transportnye sistemy i tekhnologiya perevozok* [Transport systems and technology of transportation], 2011, is. 1, pp. 27–33.

10. Bobrovskii V.I., Kolesnik A.I. *Sovershenstvovanie metoda rascheta parametrov plana gorochnykh gorlovin* [Improvement of the method of calculating the parameters of the plan of mountain necks]. *Transportnye sistemy i tekhnologiya perevozok* [Transport systems and technology of transportation], 2011, is. 26, pp. 40–47.

11. Negrei V.Ya., Podkopaev V.A., Pozhidaev S.A., Filatov E.A., Kirik N.V. *Proektirovanie sortirovochnykh stantsii s avtomatizirovannymi gorochnymi kompleksami* [Design of marshalling yards with automated hill complexes]. Gomel: BelGUT Publ., 2015. 235 p.

12. Ivankov A.N., Chetchuev M.V. *O neobkhodimosti aktualizatsii normativno-pravovoi bazy po proektirovaniyu zheleznodorozhnykh stantsii, uzlov i sortirovochnykh ustroystv* [On the need to update the regulatory framework for the design of railway stations, nodes and sorting devices]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Razvitie infrastruktury i logisticheskikh tekhnologii v transportnykh sistemakh»* [Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference «Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems»]. Saint-Petersburg, 2021, part 1, pp. 60–65.

13. Ivankova L.N. *Obespechenie kompleksnogo proektirovaniya plana i profilya sortirovochnoi gorki* [Ensuring integrated design of the plan and profile of the sorting slide]. *Sovremennye problemy sovershenstvovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta* [Modern problems of improving the work of railway transport], 2018, no. 14, pp. 18–21.

14. Ivankova L.N., Ivankov A.N., Volkova S.G. *Nekotorye aspekty proektirovaniya plana gorochnoi gorlovin* [Some aspects of designing the plan of the mountain neck]. *Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov «Sovremennye problemy sovershenstvovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta»* [Interuniversity proceedings «Modern problems of improving the work of railway transport»]. Moscow, 2021, pp. 11–16.

15. Klimov A.A. *Vliyanie konstruktivnykh parametrov sortirovochnoi gorki na bezopasnost' pererabotki vagonopotokov v sovremennykh usloviyakh* [The influence of the design parameters of the sorting slide on the safety of wagon traffic processing in modern conditions]. *Materialy XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy bezopasnosti na transporte»* [Proceeding of the XI International Scientific and Practical Conference «Problems of transport security»]. Gomel, 2021, part 1, pp. 28–30.

16. Poltavskaya J., Lebedeva O., Gozbenko V. *Automation of the solution to the problem of optimizing traffic in a multimodal logistics system*. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021, vol. 1258, pp. 255–261.

17. Martynenko L., Gozbenko V., Lebedev I., Voronova Yu. *Increasing the efficiency of investigation methods for rail transport accidents*. *X International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2022*. Novosibirsk, 2022, vol. 63, pp. 465–471.

18. Gozbenko V.E., Olentsevich V.A. *Povyshenie bezopasnosti raboty zheleznodorozhnoi transportnoi sistemy na osnove avtomatizatsii tekhnologii razmeshcheniya i krepleniya gruzov v vagon* [Improving the safety of the railway transport system based on automation of the technology of placing and securing cargo in the wagon]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of the Transsib], 2013, no. 1 (13), pp. 110–116.

### Информация об авторах

**Иванкова Людмила Николаевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления транспортными процессами, Российский университет транспорта, г. Москва; e-mail: ivankovaln@yandex.ru.

**Иванков Алексей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, главный инженер ООО «ПСК ТехПроект», г. Москва; e-mail: aivankov@yandex.ru.

**Четчуйев Максим Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железнодорожных станций и узлов, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург; e-mail: maxetion@mail.ru.

**Буракова Анжелика Васильевна**, старший преподаватель кафедры социально-гуманитарных, естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин, филиал Ростовского государственного университета путей сообщения, г. Воронеж; e-mail: avburakova@mail.ru.

### Information about the authors

**Lyudmila N. Ivankova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Department of Transport Process Management, Russian University of Transport, Moscow; e-mail: ivankovaln@yandex.ru.

**Alexei N. Ivankov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Chief Engineer of LLC «PSK TechProject», Moscow; e-mail: aivankov@yandex.ru.

**Maksim V. Chetchuev**, Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Department of Railway Stations and Junctions, Saint Petersburg Transport University of Emperor Alexander I, Saint Petersburg; e-mail: maxetion@mail.ru.

**Anzhelika V. Burakova**, Assistant Professor of the Department of Social and Humanitarian, Natural Sciences and General Professional Disciplines, Branch of the Rostov State Transport University, Voronezh; e-mail: avburakova@mail.ru.

## Оценка эффективности применения вольтодобавочных трансформаторов в системе электроснабжения Кругобайкальской железной дороги

Е.Ю. Пузина<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉lena-rus05@mail.ru

### Резюме

Одной из основных задач систем электроснабжения является доведение до потребителя электрической энергии не только в достаточном объеме, но и необходимого качества. Не всегда на малодеятельных участках железных дорог решению данной задачи уделяется нужное внимание. Так, на протяжении Кругобайкальской железной дороги, представляющей собой уникальный исторический архитектурный инженерный объект, находятся различные потребители железной дороги: население, туристические объекты, нетяговые железнодорожные потребители. В последнее время поступают жалобы на низкий уровень напряжения в точках подключения, особенно обостряется эта проблема в случаях вынужденного отключения одного из двух источников питания всей системы электроснабжения Кругобайкальской железной дороги. При ее протяженности в несколько десятков километров электроснабжение потребителей осуществляется от линии 6 кВ, т.е. при явно недостаточном уровне питающего напряжения при такой большой протяженности линии электропередачи. Соответственно, при одностороннем питании в вынужденном режиме просадка напряжения от середины длины линии возникает столь существенная, что электроприемники потребителей практически не в состоянии выполнять свои функции. Если учитывать данную ситуацию, а также перспективное развитие туристических проектов, то становится актуальной оценка возможности усиления системы электроснабжения Кругобайкальской железной дороги. Одним из эффективных способов усиления систем электроснабжения является включение вольтодобавочных трансформаторов в тех узлах, в которых проявляются недопустимые отклонения напряжения. При длинной линии электропередачи возможно применение такого трансформатора в том узле схемы, за которым выявлено значительное снижение уровня напряжения. В данной работе выполнено моделирование системы электроснабжения Кругобайкальской железной дороги без применения вольтодобавочного трансформатора и с его установкой. Полученные результаты подтвердили высокую эффективность такого способа усиления, поскольку и в нормальном, и в вынужденном режиме отклонение напряжения во всех точках подключения потребителей не превысило допустимых значений.

### Ключевые слова

качество электроэнергии, вольтодобавочные трансформаторы, вынужденные режимы, линии электропередачи

### Для цитирования

Пузина Е.Ю. Оценка эффективности применения вольтодобавочных трансформаторов в системе электроснабжения Кругобайкальской железной дороги / Е.Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 51–60. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).51-60.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 14.04.2023 г.; поступила после рецензирования: 30.05.2023 г.; принята к публикации: 31.05.2023 г.

## Efficiency evaluation of the use of volt-additive transformers in the power supply system of the Circum-Baikal Railway

Е.Yu. Puzina<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉lena-rus05@mail.ru

### Abstract

One of the main tasks of power supply systems is to supply electric energy to the consumer not only in sufficient volume, but also of the necessary quality. The necessary attention is not always paid to the solution of this problem on inactive sections of railways. Thus, throughout the Circum-Baikal Railway, which is a unique historical, architectural and engineering object, there are various consumers of the railway: the population, tourist facilities, non-traction railway consumers. Recently, complaints have been received about the low level of voltage at the connection points, the problem especially aggravating in cases of forced disconnection of one of the two power sources of the entire power supply system of the Circum-Baikal Railway. With its length

of several tens of kilometers, power supply to consumers is carried out from a 6 kV line, that is, with a clearly insufficient supply voltage level for such a large length of the power line. Accordingly, with one-way power supply in forced mode, the voltage drawdown from the middle of the line length is so significant that consumers' electric receivers are practically unable to perform their functions. Taking into account the situation as well as the promising development of tourist projects, assessing the possibility of strengthening the power supply system of the Circum-Baikal Railway becomes relevant. One of the effective ways to strengthen power supply systems is the inclusion of voltage-additive transformers in the nodes where unacceptable voltage deviations are manifested. With a long power transmission line, it is possible to use such a transformer in the node of the circuit behind which a significant decrease in the voltage level has been detected. In this paper, a simulation of the power supply system of the Circum-Baikal Railway is performed both with and without the use of an additional voltage transformer. The results obtained confirmed the high efficiency of this amplification method, since both in normal and forced mode, the voltage deviation at all points of connection of consumers did not exceed the permissible values.

### Keywords

quality of electricity, volt-additional transformers, forced modes, power transmission lines

### For citation

Puzina E.Yu. Otsenka effektivnosti primeneniya vol'todobavochnykh transformatorov v sisteme elektrosnabzheniya Kругобайкальской железной дороги [Evaluation of the effectiveness of the use of volt-additive transformers in the power supply system of the Circum-Baikal Railway]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 51–60. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).51-60.

### Article info

Received: April 14, 2023; Revised: May 30, 2023; Accepted: May 31, 2023.

### Введение

В настоящее время в условиях существующей степени изоляции российской экономики от Западно-Европейской и ряда других стран мира актуальной задачей является всемерное поддержание и дальнейшее развитие внутренней экономики нашей страны [1, 2]. Одна из отраслей экономики, которой уделяется повышенное внимание, – внутренний туризм.

В Восточной Сибири большой интерес у туристов вызывает Кругобайкальская железная дорога (КБЖД), относящаяся в данное время к категории уникальных инженерных сооружений, которое имеет в своем составе большое количество крайне разнообразных тоннелей, галерей, мостов, подпорок. Ежегодно достаточно большой поток туристов посещает дорогу, однако условий для их размещения и проживания в пределах КБЖД не так много, в частности это связано с трудностями подключения новых туристических объектов к системе электроснабжения КБЖД. Это, в свою очередь, объясняется и недостаточной мощностью источников питания системы электроснабжения (СЭС) данной дороги и тем, что для подведения электроэнергии к объектам, расположенным вдоль КБЖД, существует единственная линия электропередачи напряжением 6 кВ, связывающая эти источники. Если учесть протяженность линии (несколько десятков километров), то становится очевидным наличие проблемы развития туризма в названном регионе.

В связи с изложенным, достаточно актуальной задачей является оценка качества электроэнергии [3–10] в системе электроснабжения КБЖД, прежде всего анализ уровня напряжения, подводимого к подстанциям потребителей дороги. Реализовать указанную задачу удобно с применением программно-вычислительных комплексов, предназначенных для моделирования систем электроснабжения [11–13], поскольку нужно поставить не только задачу анализа параметров режима работы существующей СЭС, но и впоследствии выполнить оценку эффективности применения средств ее усиления, направленных не только на повышение пропускной способности этой системы [14], но и на повышение надежности работы всех устройств и узлов СЭС [15–17].

### Описание проблемной ситуации и постановка задачи

В данной работе выполнено моделирование СЭС КБЖД в программно-вычислительном комплексе (ПВК) Fazonord с целью анализа параметров нормального и вынужденных режимов ее работы.

В настоящее время КБЖД от Култук до порта Байкал протяженностью 89 км имеет станции: Култук, Маритуй, Уланово и Байкал, а также ряд туристических баз: Таёжная, Шумиха, Хвойная, Ретро, Серебряный ключ и др. На маршруте КБЖД размещены объекты особого назначения, такие как научно-

исследовательская экспериментальная база Центра сохранения историко-культурного наследия, подразделение Института ядерных исследований.

Уникальность КБЖД заключается в том, что она включает 38 тоннелей общей длиной 9 063 м (самый длинный из них – тоннель через мыс Половинный длиной 777 м); 15 каменных галерей общей длиной 295 м (сейчас используется только пять из них); три железобетонных галереи с отверстиями; 248 мостов и виадуков; 268 подпорных стенок.

Подача электроэнергии к потребителям КБЖД нормально осуществляется от подстанций Култук и порт Байкал с двух сторон. На линии КБЖД установлены комплектные трансформаторные подстанции (КТП) трехфазные в количестве 20 шт., которые используют для трансформации напряжения до 0,4 кВ, и 15 однофазных для питания устройств сигнализации.

В СЭС на КБЖД используют воздушную линию электропередачи с проводами АС-70, в труднодоступных местах применяют провод марки АС-50.

В последние годы стоит вопрос о дальнейшем развитии туризма в данном регионе, что приведет к росту нагрузок в СЭС КБЖД, поэтому актуальными задачами является оценка параметров режимов ее работы, особенно в

связи с имеющимися жалобами на качество электроэнергии со стороны уже подключенных потребителей, и на базе этого разработка технических решений по усилению СЭС и также рекомендаций по применению средств диагностики и мониторинга устройств электроснабжения с целью повышения надежности работы всей системы [18–23].

### Моделирование системы электроснабжения Кругобайкальской железной дороги и анализ уровня напряжения у потребителей

Для оценки параметров режимов работы СЭС КБЖД выполнено ее моделирование в ПСК Fazonord. Разработанная модель приведена на рис. 1, где подключенные КТП представлены в виде моделей силовых трансформаторов.

Выполнен расчет и анализ параметров режима работы СЭС КБЖД для двух вариантов электроснабжения:

- двустороннее питание с разделом СЭС между КТП-160 и КТП-32;
- одностороннее питание (вынужденный режим).

Уровни напряжений обмоток низкого напряжения силовых трансформаторов КТП сведены в табл. 1.

Как видно из результатов, представленных в табл. 1, даже при имеющихся, а не перспек-

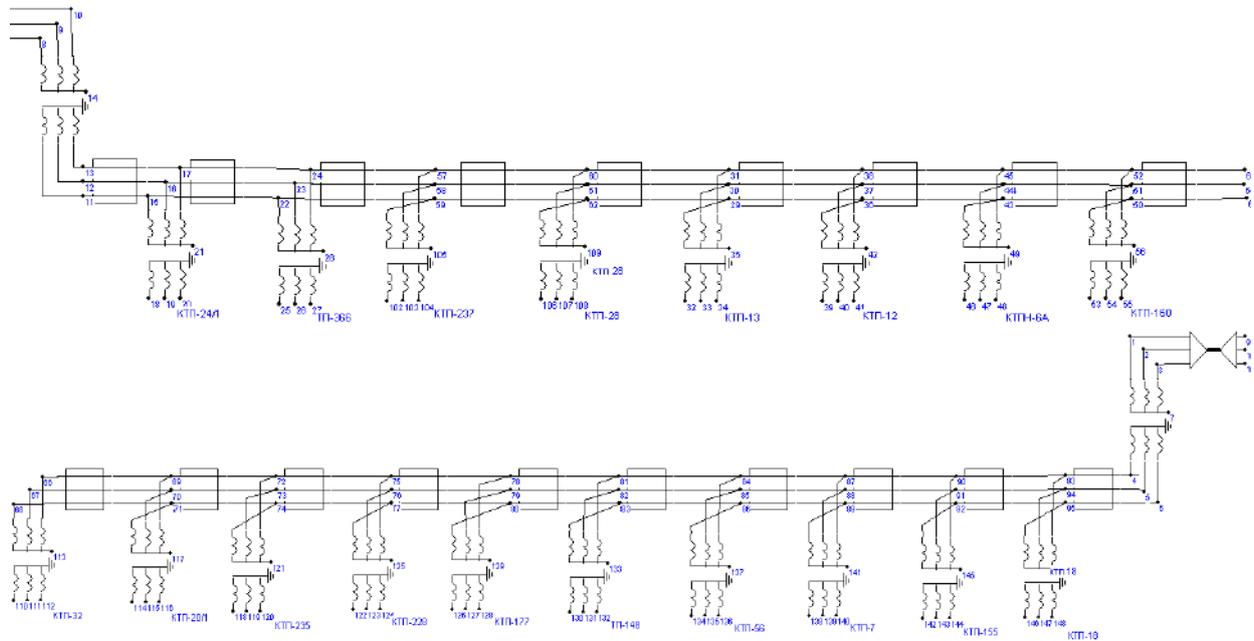


Рис. 1. Модель системы электроснабжения Кругобайкальской железной дороги в нормальном режиме работы

Fig. 1. Model of the power supply system of the Circum-Baikal Railway in normal operation mode

**Таблица 1.** Уровни напряжений обмоток низкого напряжения силовых трансформаторов комплектных трансформаторных подстанций

**Table 1.** Voltage levels of low voltage windings in power transformers of complete transformer substations

Номер комплектной трансформаторной подстанции Part number of complete transformer substations	Вариант 1 Variant 1		Вариант 2 Variant 2	
	Уровень напряжения, $U$ , кВ Voltage level $U$ , kV	Отклонение напряжения, $\Delta U$ , % Voltage deviation, $\Delta U$ , %	Уровень напряжения, $U$ , кВ Voltage level, $U$ , kV	Отклонение напряжения, $\Delta U$ , % Voltage deviation
КТП-24/1	0,227	3,18	0,212	-3,64
ТП-366	0,225	2,27	0,208	-5,45
КТП-237	0,215	-2,27	0,195	-11,36
КТП-28	0,201	-8,64	0,165	-25,00
КТП-13	0,201	-8,64	0,165	-25,00
КТП-12	0,201	-8,64	0,167	-24,09
КТПН-6А	0,203	-7,23	0,164	-25,45
КТП-160	0,203	-7,23	0,157	-28,64
КТПН-32	0,227	3,18	0,147	-33,18
КТП-20/1	0,227	3,18	0,147	-33,18
КТП-235	0,229	4,09	0,145	-34,09
КТП-228	0,221	0,45	0,139	-36,82
КТП-177	0,229	4,09	0,143	-35,00
ТП-148	0,228	3,64	0,140	-36,364
КТП-56	0,232	5,45	0,146	-33,64
КТП-7	0,234	6,36	0,143	-35,00
КТП-155	0,239	8,64	0,140	-36,36
КТП-144	0,242	10,00	0,141	-35,91
КТП-18	0,227	3,18	0,147	-33,18

тивных нагрузках, особенно при отключении одной из подстанций, происходят большие просадки напряжения в межподстанционных зонах (МПЗ), до уровня 139 В в отдельных узлах схемы, что совершенно недопустимо. Также необходимо отметить, что на подстанциях Култук и Байкал отсутствует резерв мощности силовых трансформаторов.

В результате приходим к выводу о необходимости повышения надежности электроснабжения потребителей КБЖД.

### **Разработка мероприятий по усилению системы электроснабжения Кругобайкальской железной дороги**

Проанализировав существующую ситуацию в СЭС КБЖД, можно с уверенностью сказать, что система электроснабжения нуждается в реконструкции. С целью реконструкции ис-

следуемой системы электроснабжения предлагается установка вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ) в МПЗ в точках потенциально недопустимого снижения напряжения.

На рис. 2 представлена электрическая схема ВДТ. На схеме обозначено:  $S$  – ввод ВДТ от источника;  $L$  – ввод вольтодобавочного трансформатора от нагрузки;  $SL$  – ввод ВДТ от общей точки.

Принцип действия ВДТ основан на следующем. При включении ВДТ в работу аппаратная часть шкафа управления (ШУ) измеряет уровень напряжения на вводе от нагрузки  $L$  и сравнивает его с пороговым напряжением. Если измеренное напряжение не равняется пороговому, то ШУ осуществляет управляющее воздействие на электродвигатель, который переключает ступени ВДТ для повышения либо понижения уровня напряжения в линии.

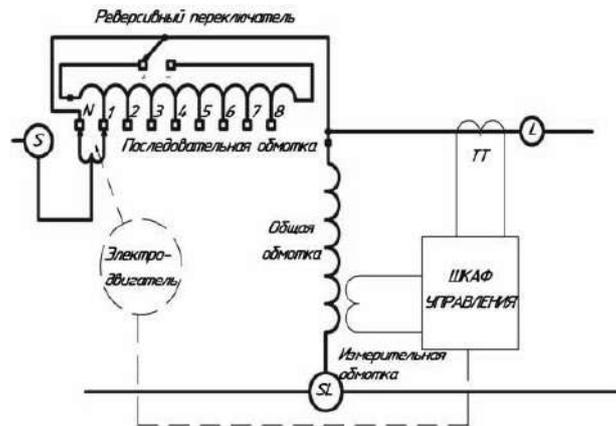


Рис. 2. Электрическая схема вольтодобавочного трансформатора  
Fig. 2. The electrical circuit of the booster transformer

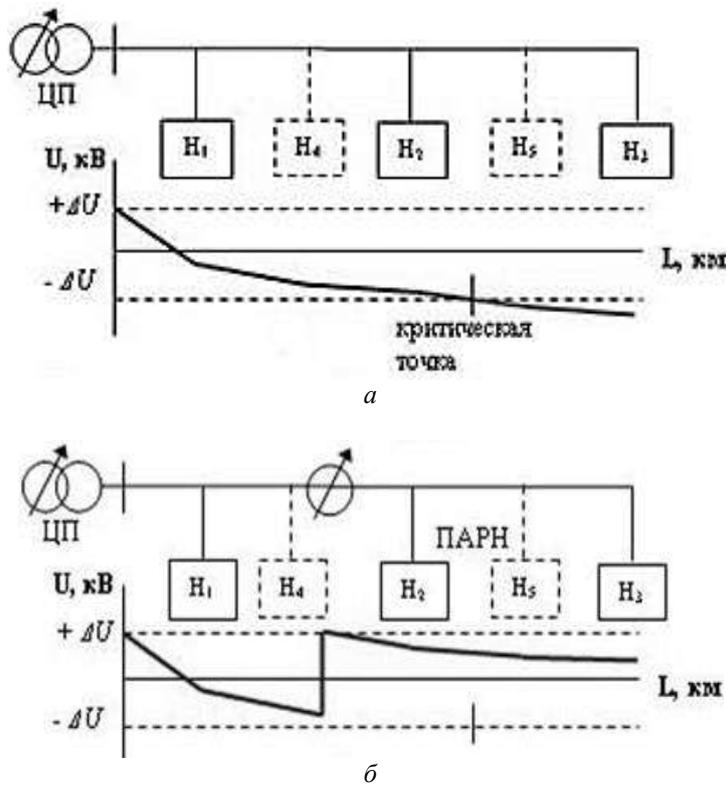


Рис. 3. Распределение напряжения вдоль воздушной линии при отсутствии (а) и установке (б) переключателя для автоматического регулирования напряжения  
Fig. 3. Voltage distribution along the overhead line in the absence (a) and with installation (b) of the automatic voltage regulation switch

Пример распределения напряжения вдоль высоковольтной линии в случаях отсутствия и установки ВДТ представлены на рис. 3.

На данном рисунке введены обозначения: ЦП – центр питания, Н1, Н2, Н3 – существующая нагрузка, Н4, Н5 – нагрузка дополнительного регулирования напряжения; ПАРН – переключатель для автоматического регулирования

напряжения.

Таким образом, хорошо видно, что благодаря установке ВДТ происходит существенное увеличение напряжения в точке его подключения, позволяющее и на дальнейшей части воздушной линии иметь требуемый уровень напряжения.

Поскольку, согласно ранее представленным результатам моделирования, в случае од-



КТП-235	0,229	4,09	0,228	3,64
КТП-228	0,221	0,45	0,218	-0,91
КТП-177	0,229	4,09	0,227	3,18
ТП-148	0,227	3,18	0,227	3,18
КТП-56	0,232	5,45	0,229	4,09
КТП-7	0,234	6,36	0,228	3,64
КТП-155	0,241	9,55	0,224	1,82
КТП-18	0,227	3,18	0,226	2,73

Результаты моделирования свидетельствуют о целесообразности использования ВТД на МПЗ между КТП-237 и КТП-28 (147 км), поскольку ни в одной точке подключения потребителей в вынужденном режиме в случае отключения одной из питающих подстанций Култук или порт Байкал отклонение напряжения не выходит за пределы допустимых значений. В нормальном режиме при двусторонней схеме питания имеется некоторый запас по уровню напряжения, который поможет обеспечить нормальные условия электроснабжения в случае увеличения нагрузок в СЭС КБЖД в связи с планируемым в перспективе развитием туризма.

### Заключение

В ходе проведенного в данной работе исследования выявлено, что при имеющихся нагрузках в СЭС КБЖД не обеспечивается требуемое качество электроэнергии для потребителей. Так, в нормальном режиме при двусторонней схеме питания участка отклонение напряжения достигает в отдельных узлах подключения КТП потребителей  $-8,64\%$  и  $+10\%$ , а при вынужденном режиме в случае одностороннего питания в отдельных точках МПЗ и вовсе достигает  $36,64\%$ . При таких отклонени-

ях напряжения работа электроприемников потребителей КБЖД невозможна. Тем более в этих условиях не может быть никакой речи об увеличении нагрузок за счет планируемого развития туризма в данном регионе.

Для нормализации качества электроэнергии, передаваемой потребителям КБЖД предлагается установка вольтодобавочных трансформаторов в критичных узлах схемы электроснабжения. Результаты моделирования в ПВК Fazongrd исследуемой системы электроснабжения с учетом ее усиления путем внедрения ВДТ на 147 км КБЖД доказали эффективность данного способа усиления. Уровни напряжения в узлах подключения потребителей стали существенно выше, и даже в вынужденном режиме не наблюдается отклонений напряжения выше допустимых значений.

Таким образом, благодаря внедрению вольтодобавочных трансформаторов решается задача обеспечения требуемого качества электрической энергии для имеющихся потребителей СЭС КБЖД и обеспечивается потенциальная возможность подключения дополнительных потребителей в связи с развитием туризма в данном регионе.

### Список литературы

1. Безопасность железнодорожного транспорта в условиях Сибири и Севера / В.А. Акимов, В.А. Алексеенко, Р.С. Ахметханов и др. М. : Знание, 2014. 856 с.
2. Каимов Е.В., Оленцевич В.А., Власова Н.В. Проблемы формирования, развития и реконструкции элементов инфраструктурного комплекса железных дорог // Образование – Наука – Производство : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Чита, 2022. Т. 1. С. 288–296.
3. Makasheva S., Pinchukov P., Szołtysek J. The power quality as a pretext for developing smart city concepts // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2020. P. 1–7. DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271462.
4. Shamanov V.I., Pulyakov A.V., Trofimov Y.A. Main electromagnetic jammer sources with impact on the railroad automation systems // International Conference on Information Technology in Business and Industry (ITBI 2020). Bristol. 2020. DOI 10.1088/1742-6596/1661/1/012012.
5. Kustov A., Zatsepin E., Zatsepina V. Analysis of the highest harmonic component in networks with isolated neutral in single-phase short circuit // 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk, 2021. P. 1113–1116. DOI 10.1109/SUMMA53307.2021.9632097.
6. Шевердин И.Н., Шаманов В.И., Трофимов Ю.А. Влияние тяжеловесных поездов на рельсовые цепи и АЛС // Автоматика, связь, информатика. 2004. № 8. С. 24.

7. Шаманов В.И., Трофимов Ю.А. Асимметрия тяговых токов под катушками АЛС // Автоматика, связь, информатика. 2008. № 11. С. 37–39.
8. Макашева С.И. Оценка синусоидальности кривых напряжения высоковольтной линии автоблокировки // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2019. № 4 (21). С. 88–91.
9. Куцкий А.П. Снижение несимметрии и несинусоидальности в линиях электропередач, питающих тяговые подстанции // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. 2018. Т. 1. С. 692–696.
10. Учет влияния устройств фильтрации и компенсации на показатели качества электрической энергии СТЭ при пропуске поездов повышенной массы / Е.А. Морозов, В.В. Фареньк, М.В. Востриков и др. // Молодая наука Сибири. 2022. № 4 (18). С. 94–108. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/933>. (дата обращения 01.02.2023).
11. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Степанов А.Д. Экспериментальная проверка математических моделей электрических систем, построенных на основе фазных координат // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2004. № 4 (20). С. 152–157.
12. Potapov V.V., Suslov K.V., Kostina K.V. Theoretical Bases of Electrical Engineering. Irkutsk : Irkutsk National Research Technical University, 2020. 158 p.
13. Соловской А.С., Решетко К.А. Реализация математической модели продольной винтовой прокатки в программном комплексе ANSYS // Электрофизические методы обработки в современной промышленности : материалы V Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. Пермь, 2022. С. 67–70.
14. Куцкий А.П., Овечкин И.С., Галков А.А. Повышение пропускной способности участка Якурим – Киренга для обеспечения графика движения поездов с максимальной массой 7 100 тонн // Молодая наука Сибири. 2022. № 2 (16). С. 166–174. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/777> (дата обращения 01.02.2023).
15. Пулятков А.В., Трофимов Ю.А., Скоробогатов М.Э. Комплексные решения по повышению устойчивости работы устройств автоматической локомотивной сигнализации на участках с электротягой переменного тока // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2015. Т. 1. С. 328–332.
16. К повышению надежности устройств контактной сети / А.С. Есауленко, В.П. Ступицкий, В.А. Тихомиров и др. // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 200–205. URL: <https://mnv.irgups.ru/k-povysheniyu-nadezhnosti-ustroystv-kontaktnoy-seti> (дата обращения 01.02.2023).
17. Электроснабжение децентрализованных потребителей с использованием возобновляемых источников энергии / Т.В. Сокольников, И.Н. Шушпанов, К.В. Суслов и др. // Техничко-экономические проблемы развития регионов : материалы науч.-практ. конф. Иркутск, 2011. Вып. 7. С. 79–82.
18. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized diagnostic parameter for condition assessment of power transformer windings insulation // International Russian Automation Conference. 2019. DOI 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867610.
19. Филиппов Д.М., Ступицкий В.П., Лобанов О.В. Проблемы диагностики параметров контактной сети // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 125–131. URL: <https://mnv.irgups.ru/problemey-diagnostiki-parametrov-kontaktnoy-seti> (дата обращения 01.02.2023).
20. Puzina E.Yu., Cherniga M.Yu., Khudonogov I.A. Strengthening the power supply system of electrified railways, taking into account the use of interval control devices // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. С. 9271385. DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271385.
21. Крюков А.В., Асташин С.М., Степанов А.Д. Системный анализ факторов, влияющих на эффективность тепловизионных обследований электрооборудования // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Межвуз. науч.-практ. конф. Иркутск, 2009. Т. 2. С. 67–71.
22. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Modeling turn insulation thermal aging process for traction substation transformer // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2020. DOI 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112021.
23. Пузина Е.Ю. Целесообразность применения системы мониторинга силовых трансформаторов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2013. Т. 2. С. 167–171.

## References

1. Akimov V.A., Alekseenko V.A., Akhmetkhanov R.S. et al. Bezopasnost' zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh Sibiri i Severa [Safety of railway transport in Siberia and the North]. Moscow: Znanie Publ., 2014. 856 p.
2. Kaimov E.V., Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Problemy formirovaniya, razvitiya i rekonstruktsii elementov infrastruktornogo kompleksa zheleznikh dorog [Problems of formation, development and reconstruction of elements of the railway infrastructure complex]. *Materialy VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo» (v 2-kh t.)* [Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation «Education – Science – Production» (in 2 vol.)]. Chita, 2022, vol. 1, pp. 288–296.
3. Makasheva S., Pinchukov P., Szołtysek J. The Power Quality as a Pretext for Developing Smart City Concepts // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok, 2020, pp. 1–7. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271462.
4. Shamanov V.I., Pulytkov A.V., Trofimov Y.A. Main electromagnetic jammer sources with impact on the railroad automation systems. 2020 *International Conference on Information Technology in Business and Industry (ITBI 2020)*. Bristol, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012012.

5. Kustov A., Zatspein E., Zatspeina V. Analysis of the Highest Harmonic Component in Networks with Isolated Neutral in Single-phase Short Circuit. *2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. Lipetsk, 2021, pp. 1113–1116. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632097.
6. Sheverdin I.N., Shamanov V.I., Trofimov Yu.A. Vliyaniye tyazhelovesnykh poezdov na rel'sovye tsepi i ALS [Influence of heavy trains on track circuits and ALS]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics], 2004, no. 8, pp. 24.
7. Shamanov V.I., Trofimov Yu.A. Asimetriya tyagovykh tokov pod katuskami ALS [Asymmetry of traction currents under coils of automatic locomotive signaling]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communications, computer science], 2008, no. 11, pp. 37–39.
8. Makasheva S.I. Otsenka sinusoidal'nosti krivykh napryazheniya vysokovol'tnoi linii avtoblokirovki [Evaluation of the sinusoidal voltage curves of the high-voltage auto-locking line]. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona* [Transport of the Asia-Pacific region], 2019, no. 4 (21), pp. 88–91.
9. Kutsyi A.P. Snizhenie nesimmetrii i nesinusoidal'nosti v liniyakh elektroperedach, pitayushchikh tyagovye podstantsii [Reduction of asymmetry and non-sinusoidality in power lines feeding traction substations]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2018, vol. 1, pp. 692–696.
10. Morozov E.A., Farenok V.V., Vostrikov M.V., Tikhomirov V.A. Uchet vliyaniya ustroystv fil'tratsii i kompensatsii na pokazateli kachestva elektricheskoi energii STE pri propuske poezdov povyshennoi massy [Taking into account the influence of filtration and compensation devices on the quality indicators of the electric energy of the traction power supply system when passing trains of increased mass]. *Molodaya nauka Sibiri* [The young science of Siberia], 2022, no. 4 (18), pp. 94–108.
11. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Stepanov A.D. Eksperimental'naya proverka matematicheskikh modelei elektricheskikh sistem, postroennykh na osnove faznykh koordinat [Experimental verification of mathematical models of electrical systems based on phase coordinates]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2004, no. 4(20), pp. 152–157.
12. Potapov V.V., Suslov K.V., Kostina K.V. Theoretical Bases of Electrical Engineering. Irkutsk : Irkutsk National Research Technical University, 2020. 158 p.
13. Solovskoi A.S., Reshetko K.A. Realizatsiya matematicheskoi modeli prodol'noi vintovoi prokatki v programmnom komplekse ANSYS [Implementation of a mathematical model of longitudinal screw rolling in the ANSYS software package]. *Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov «Elektrofizicheskie metody obrabotki v sovremennoi promyshlennosti»* [Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference of Young scientists, postgraduates and students «Electro-physical processing methods in modern industry»]. Perm', 2022. pp. 67–70.
14. Kutsyi A.P., Ovechkin I.S., Galkov A.A. Povyshenie propusknoi sposobnosti uchastka Yakurim – Kirenga dlya obespecheniya grafika dvizheniya poezdov s maksimal'noi massoi 7 100 tonn [Increasing the capacity of the Yakurim – Kirenga section to ensure the schedule of trains with a maximum weight of 7,100 tons]. *Molodaya nauka Sibiri* [The young science of Siberia], 2022, no. 2 (16), pp. 166–174.
15. Pul'tyakov A.V., Trofimov Yu.A., Skorobogatov M.E. Kompleksnye resheniya po povysheniyu ustoichivosti raboty ustroystv avtomaticheskoi lokomotivnoi signalizatsii na uchastkakh s elektroyagoi peremennogo toka [Integrated solutions to improve the stability of automatic locomotive signaling devices in areas with alternating current electric traction]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2015, vol. 1, pp. 328–332.
16. Esaulenko A.S., Stupitskii V.P., Tikhomirov V.A., Lobanov O.V. K povysheniyu nadezhnosti ustroystv kontaktnoi seti [To increase the reliability of contact network devices]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia]. 2021, no. 2 (12), pp. 200–205.
17. Sokol'nikova T.V., Shushpanov I.N., Suslov K.V., Potapov V.V. Elektrosnabzhenie detsentralizovannykh potrebitel'ei s ispol'zovaniem vozobnovlyаемых istochnikov energii [Power supply of decentralized consumers using renewable energy sources]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Tekhniko-ekonomicheskie problemy razvitiya regionov»* [Proceedings of the scientific and practical conference «Technical and economic problems of regional development»]. Irkutsk, 2011, is. 7, pp. 79–82.
18. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized Diagnostic Parameter for Condition Assessment of Power Transformer Windings Insulation. *International Russian Automation Conference*. 2019. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867610.
19. Filippov D.M., Stupitskii V.P., Lobanov O.V. Problemy diagnostiki parametrov kontaktnoi seti [Problems of diagnostics of contact network parameters]. *Molodaya nauka Sibiri* [The young science of Siberia], 2022, no. 2 (12), pp. 125–131.
20. Puzina E.Yu., Cherniga M.Yu., Khudonogov I.A. Strengthening the power supply system of electrified railways, taking into account the use of interval control devices. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020*. 9271385. DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271385.
21. Kryukov A.V., Astashin S.M., Stepanov A.D. Sistemnyi analiz faktorov, vliyayushchikh na effektivnost' teplovizionnykh obsledovaniy elektrooborudovaniya [System analysis of factors affecting the effectiveness of thermal imaging surveys of electrical equipment]. *Materialy Mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the Interuniversity scientific and practical conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2009, vol. 2, pp. 67–71.
22. Khudonogov I.A., Puzina, E.Yu., Tuigunova A.G. Modeling turn insulation thermal aging process for traction substation transformer. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2020. DOI:10.1109/ICIEAM48468.2020.9112021.

23. Puzina E.Yu. Tselesoobraznost' primeneniya sistemy monitoringa silovykh transformatorov [The expediency of using a monitoring system for power transformers]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskaya konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation «Improving the efficiency of energy production and use in Siberia»]. Irkutsk, 2013, vol. 2, pp. 167–171.

#### **Информация об авторах**

**Пузина Елена Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

#### **Information about the authors**

**Elena Yu. Puzina**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

## Проектирование реконструкции продольного профиля с обоснованием уклонов продольного профиля

П.В. Ковтун, Т.А. Дубровская ✉

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

✉rt-555@yandex.ru

### Резюме

При скоростном движении для обеспечения комфортабельности езды пассажиров предъявляются более жесткие требования к плану линии: кривым малых радиусов, длинам прямых вставок и переходных кривых, которые увеличиваются для стабилизации подвижного состава. Пересечения с автодорогами осуществляются на разных уровнях, заменяются стрелочные переводы, переустраиваются пассажирские платформы. Кроме того, модернизируются устройства системы центральной блокировки и связи, усиливаются контактная сеть и тяговые подстанции, принимаются меры по защите окружающей среды. Однако при обращении внимания на план линии, криволинейные участки, радиусы кривых, верхнее строение пути не всегда учитывается влияние уклонов существующего продольного профиля на реализацию скоростного движения. В процессе движения поезда по переломам продольного профиля в поезде, кроме тяговых и тормозных усилий, появляются дополнительные усилия, величина которых зависит от массы поезда, скорости его движения и алгебраической разности уклонов, образующих этот перелом  $\Delta i$ . При повышении скоростей движения поездов профиль существующего участка должен удовлетворять современным нормативным требованиям. Так, наибольший продольный уклон на скоростных линиях не должен превышать 18 ‰. Продольный профиль следует проектировать по возможности большей длины при наименьшей разности сопрягаемых уклонов смежных элементов. Наибольшая алгебраическая разность уклонов смежных элементов профиля  $[\Delta i]$  должна быть не более 6 ‰ для скоростного участка железной дороги. Все приведенные нормативные требования усложняют реализацию планов по введению скоростного движения поездов. Например, на направлении Гомель – Минск на протяжении всего направления (300 км) таких участков, где разность соседних уклонов больше 6 ‰, оказалось около 147 км или 49 ‰. Все эти участки требуют перепроектирования и приведения таких уклонов, чтобы разность стала  $\Delta i \leq 6 \text{ ‰}$ .

### Ключевые слова

железная дорога, продольный профиль, оптимизация, разность уклонов, скоростное движение

### Для цитирования

Ковтун П.В. Анализ влияния продольного профиля на скорость движения поездов / П.В. Ковтун, Т.А. Дубровская // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 61–71. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).61-71.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 18.04.2023 г.; поступила после рецензирования: 2.06.2023 г.; принята к публикации: 5.06.2023 г.

## Design of longitudinal profile reconstruction with justification of longitudinal slopes

P.V. Kovtun, T.A. Dubrovskaya ✉

Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

✉rt-555@yandex.ru

### Abstract

In high-speed traffic, to ensure passenger comfort, more stringent requirements are imposed on the line plan: curves of small radii, lengths of straight inserts and transition curves, which are increased to stabilize the rolling stock. Intersections with highways are carried out at different levels, turnouts are replaced, passenger platforms are rebuilt. In addition, the devices of the central blocking and communication system are being modernized, the contact network and traction substations are being strengthened, and measures are being taken to protect the environment. However, paying attention to the line plan, curved sections, curve radii and the superstructure of the track, the influence of the existing longitudinal profile slopes on the implementation of high-speed traffic is not always taken into account. When the train moves along the fractures of the longitudinal profile, additional forces appear in the train in addition to traction and braking forces, their magnitude depending on the mass of the train, the speed of its movement and the algebraic difference of the slopes forming this fracture  $\Delta i$ . With increasing of train speeds, the profile of the existing section must meet current regulatory requirements. Thus, the greatest longitudinal slope on high-speed lines should not exceed 18 ‰. The longitudinal profile should be designed as long as possible with the smallest possible difference in the mating slopes of adjacent elements. The greatest algebraic difference in the slopes of adjacent profile elements  $[\Delta i]$  should be no more than 6 ‰ for a high-speed section of the railway. All of the above regulatory requirements put the implementation of plans for the introduction of high-speed train traffic "at a standstill". For example, in the Gomel-Minsk direction (along

the entire direction of 300 km sections with the difference of neighboring slopes greater than 6 % turned out to be about 147 km or 49%). All these sections require redesigning and the use of slopes with the difference  $\Delta i \leq 6\%$ , which in turn constrains the increase in speed.

### Keywords

railway, longitudinal profile, optimization, slope difference, high-speed traffic

### For citation

Kovtun P.V., Dubrovskaya T.A. Proektirovanie rekonstruktsii prodol'nogo profilya s obosnovaniem uklonov prodol'nogo profilya [Design of longitudinal profile reconstruction with justification of longitudinal slopes]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2(78), pp. 61–71. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).61-71.

### Article info

Received: April 18, 2023; Revised: June 2, 2022; Accepted: June 5, 2023.

### Введение

Проблеме повышения скоростей движения поездов на железной дороге уделяется огромное внимание [1–3].

В странах Западной Европы и Японии наибольшую скорость движения – 200–350 км/ч – можно реализовать при организации высокоскоростного движения поездов на специализированных высокоскоростных магистралях (ВСМ). Однако строительство ВСМ и специализированного подвижного состава требует больших капиталовложений, исчисляемых миллиардами долларов. Инвестирование в таком объеме не всегда возможно. В этом случае как альтернативный вариант можно рассматривать организацию скоростного пассажирского движения на линиях с совмещенным движением грузовых и пассажирских поездов: до 140–160 км/ч после капитального ремонта пути и до 200 км/ч на реконструированных линиях [4].

Реконструктивные мероприятия для повышения скоростей движения на железной дороге должны планироваться так, чтобы были гарантированы безопасность и бесперебойность движения поездов, сократилось время пассажиров в пути при обеспечении потребных размеров перевозок и наименьших строительно-эксплуатационных затрат [5].

Значение скорости движения поездов в работе железнодорожного транспорта представляется всегда широкой панорамой влияния, с одной стороны, скорости на перевозочный процесс грузов и пассажиров, с другой стороны – подвижного состава, инфраструктуры и организации перевозок на скорость. Несмотря на, казалось бы, всю определенность скорости движения, история ее развития свидетельствует о большом диапазоне мнений и неочевидности

оценок. Взаимодействие скорости движения поездов со всеми составляющими перевозочного процесса описывается различными зависимостями [6].

При скоростном движении для обеспечения комфортабельности езды пассажиров предъявляются более жесткие требования к плану линии: длины прямых вставок и переходных кривых увеличиваются для стабилизации подвижного состава на концах круговых кривых, пересечения с автодорогами осуществляются на разных уровнях, заменяются стрелочные переводы, переустраиваются пассажирские платформы и др. Кроме того, модернизируются устройства системы центральной блокировки и связи, усиливаются контактная сеть и тяговые подстанции, принимаются меры по защите окружающей среды. Однако при обращении внимания на план линии [7], криволинейные участки [8], радиусы кривых [9], верхнее строение пути [10, 11] не всегда учитывается влияние уклонов существующего продольного профиля на реализацию скоростного движения.

Целью данной статьи является дальнейшее изучение влияния продольного профиля существующих железнодорожных линий на увеличение скоростей движения поездов.

### Основные требования норм проектирования

Условия проектирования продольного профиля в значительной мере зависят от длины его элементов. Вопрос о рациональной длине элемента профиля связан с необходимостью решения двух до некоторой степени противоречивых положений:

1. Со строительной точки зрения, чем короче элементы профиля, тем лучше проектная линия вписывается в очертание рельефа местно-

сти (особенно в холмистых и горных условиях) и тем меньше объемы работ по сооружению земляного полотна и возведению водопропускных сооружений.

2. Длина элементов профиля в значительной мере влияет на условия движения поезда. Очевидно, что чем короче элемент, тем больше под поездом одновременно может находиться переломов профиля. Каждый перелом под движущимся поездом вызывает необходимость изменения режима работы локомотива (включение тяги или отключение ее), а также изменение напряжений в межвагонных сцепных приборах (в силу изменения на переломе профиля величины дополнительного сопротивления от уклона), что приводит к нарушению плавности движения поезда. Поэтому для обеспечения более благоприятных условий эксплуатации короткие элементы продольного профиля нежелательны.

Однако существующие линии проектировались давно, когда проектная линия укладывалась максимально близко к земле для уменьшения объемов земляных работ при строительстве. Из-за этого уклоны иногда принимались очень большие, да и разность уклонов при этом нормировалась не для высоких скоростей.

При движении поезда по переломам продольного профиля в поезде кроме тяговых и тормозных усилий появляются дополнительные усилия, величина которых зависит от массы поезда, скорости его движения и алгебраической разности уклонов, образующих этот перелом  $\Delta i$  [12].

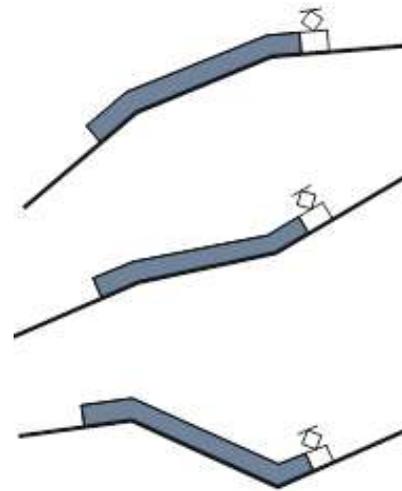


Рис. 1. Переломы профиля под поездом  
Fig. 1. Profile fractures under the train

Если под поездом одновременно находятся несколько точек перелома, усилия от переломов суммируются, вследствие волнового характера распространения усилий (рис. 1). Поэтому регламентируются нормы, касающиеся алгебраической разности сопрягаемых уклонов и длин разделительных площадок элементов переходных кривых.

На железных дорогах в режиме торможения можно выделить вредные ямы, вредные уступы и горбы у подножия вредных уступов (рис. 2).

Существуют участки профиля, по которым поезда движутся с высокими скоростями в режиме холостого хода или в режиме тяги, но

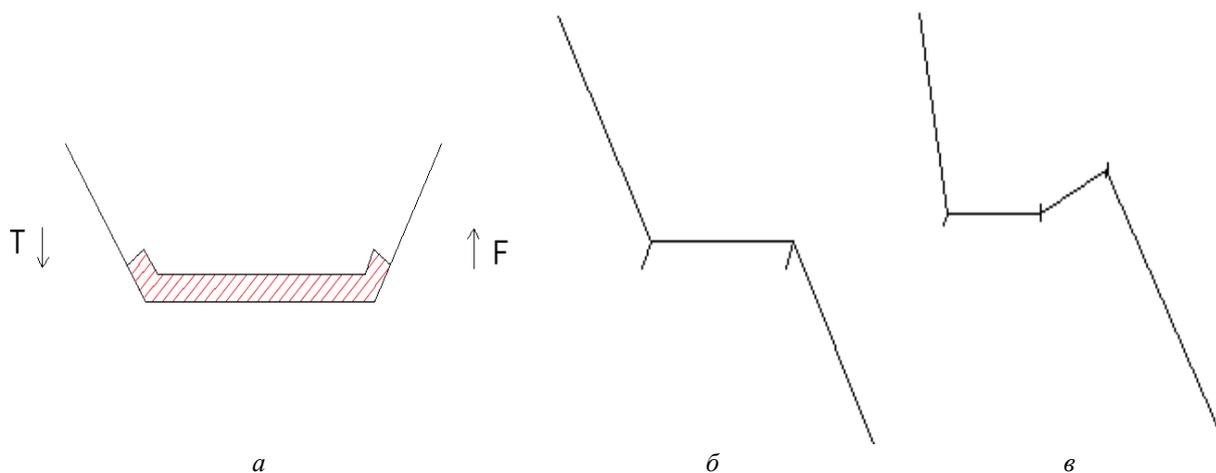


Рис. 2. Схемы участков в режиме торможения:  
*a* – вредной ямы; *б* – вредного уступа; *в* – горба у подножия вредного уступа

Fig. 2. Schemes of sections in braking mode:  
*a* – harmful pit; *b* – harmful ledge; *c* – hump at the foot of harmful ledges

при малых усилиях в растянутых цепных приборах или при больших тяговых усилиях, но малых скоростях движения (рис. 3).

С учетом этого Свод Правил 19.13330.2017 [13] устанавливает, что во вредных ямах, на вредных уступах и на горбах у подножия вредных уступов следует использовать только рекомендуемые нормы, т. е. большие по длине и меньшие по разности уклоны; во всех остальных случаях – в безвредных ямах, в безвредных уступах и на затяжных подъемах – можно использовать и допускаемые нормы, т. е. большие по разности уклоны и меньшие по длине разделительных площадок элементы переходных кривых.

При повышении скоростей движения поездов профиль существующего участка должен удовлетворять требованиям [14, 15].

Наибольший продольный уклон на скоростных линиях не должен превышать 18 ‰. Продольный профиль следует проектировать по

возможности большей длины при наименьшей разности сопрягаемых уклонов смежных элементов. Наибольшая алгебраическая разность уклонов смежных элементов профиля  $[\Delta i]$  должна быть не более 6 ‰ для скоростного участка железной дороги.

Наименьшая длина элемента продольного профиля  $[L]$  равна 250 м для скоростной магистрали. При большей разности уклонов ( $\Delta i > [\Delta i]$ ) смежные элементы следует сопрягать посредством разделительных площадок и (или) элементов переходной крутизны, длина которых должна быть не менее приведенных ранее значений  $[L]$  [16].

Для обеспечения плавного перехода поезда через переломы профиля со значительной алгебраической разностью уклонов производится сопряжение смежных элементов одним из следующих способов:

– круговой кривой в вертикальной плоскости (рис. 4);

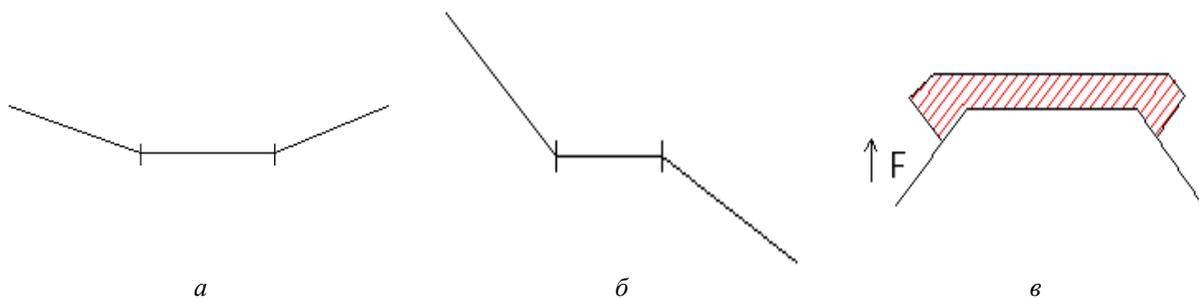


Рис. 3. Участки профиля с движением в режимах холостого хода или тяги:

*a* – безвредная яма; *b* – безвредный уступ; *c* – «горб»

Fig. 3. Sections of the profile with movement in idle or traction modes:

*a* – harmless pit; *b* – harmless ledge; *c* – «hump»

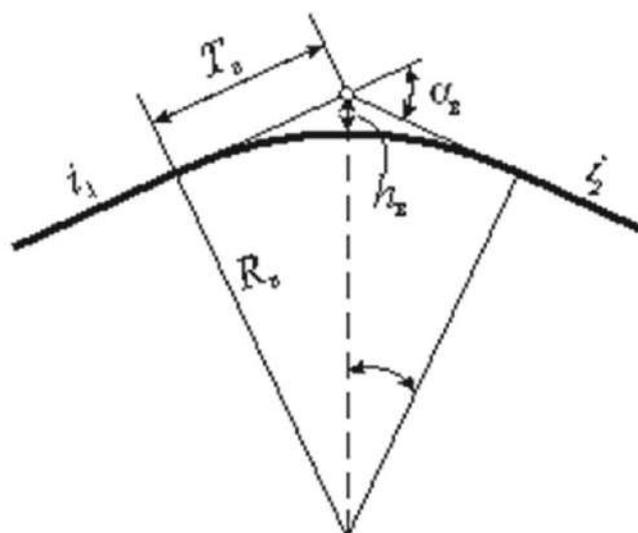


Рис. 4. Сопряжение элементов профиля круговой кривой

Fig. 4. Coupling of circular curve profile elements

– профилем криволинейного очертания «цепочный профиль» (рис. 5).

При первом способе смежные прямолинейные элементы профиля сопрягаются в вертикальной плоскости кривой радиусом  $R_b$ , м: 20 000 – на скоростных линиях, 15 000 – на линиях пассажирских I, II категории, 10 000 – на особо грузонапряженных линиях и линиях III категории, 5 000 – на линиях IV категории.

Смежные элементы продольного профиля следует сопрягать в вертикальной плоскости кривыми радиусами  $R_b$ . Их назначение – предотвратить саморасцеп автосцепок смежных вагонов поезда при прохождении их через перелом продольного профиля пути и обеспечить комфортные условия езды пассажиров.

На схематическом продольном профиле проектная линия показывается без учета сопрягающей кривой. Изменение отметок пути на переломах профиля в пределах вертикальных кривых достигается за счет досыпки земляного полотна. Наибольшая величина поправки  $h_b$  (рис. 4), соответствующая точке перелома профиля, вычисляется как эвольвента  $h_b = T_b^2/2R_b$ . При очень малых значениях алгебраической разности сопрягаемых уклонов (например,  $\Delta i < 2\%$ ) максимальная поправка не превышает 0,01 м. В этом случае устройство кривой в вертикальной плоскости не имеет смысла, так как, во-первых, кривую радиусом более 20 000 м очень трудно содержать, во-вторых, требуемая плавность движения поездов обеспечивается в достаточной мере и без нее.

В соответствии со сводом правил устройство сопрягающей кривой обязательно в тех случаях, когда разность уклонов более 2 ‰ на скоростных линиях; 2,3 ‰ – на линиях пассажирских I, II категории; 2,8 ‰ – на линиях III категории; 4 ‰ – на линиях IV категории. Пре-

имуществом этого способа сопряжения является относительная простота в разбивке и содержании пути.

Величина радиуса вертикальной кривой 1 500, 2 000 и 2 500 м установлена исходя из наибольших скоростей движения пассажирских поездов 160, 200 км/ч при значении вертикального ускорения  $a_b$ , равного  $0,2 \text{ м/с}^2$  [17]. Вертикальные кривые следует размещать вне переходных кривых, а также вне пролетных строений мостов и путепроводов с безбалластной проезжей частью.

Второй способ предусматривает сопряжение смежных уклонов короткими элементами плавно изменяющейся крутизны, сопрягающимися с примыкающими к ним по краям цепочки прямолинейными элементами профиля, благодаря чему участок сопряжения приобретает криволинейное очертание.

При таком сопряжении длина отрезков цепочки принимается, как правило, не менее 50 м и во всех случаях не менее 25 м (длина рельса), а алгебраическая разность уклонов смежных элементов определяется по формуле (1) в [17]. Общая длина «цепочного сопряжения» должна быть не менее минимально возможной приведенной длины соответствующего участка профиля, запроектированного прямолинейными элементами. Постоянная для данного способа сопряжения разность уклонов должна быть обеспечена не только на всех переломах внутри цепочки, но и в начале, и в ее конце.

Этот способ обеспечивает большую плавность движения поезда, чем при сопряжении вертикальными кривыми радиусами 20 000–5 000 м, однако из-за частого изменения уклона на небольшую величину он требует более мощного верхнего строения пути, при ко-

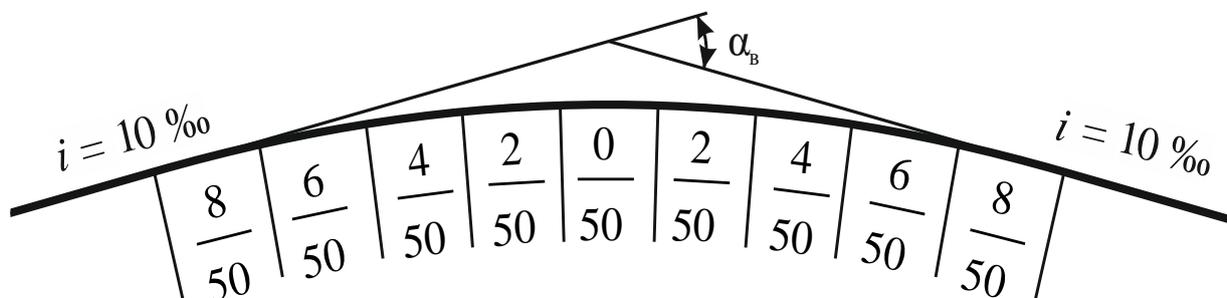


Рис. 5. Сопряжение элементов профилем криволинейного очертания  
Fig. 5. Coupling of elements by a curvilinear outline profile

тором деформации такого профиля будут минимальными. Поэтому в настоящее время сфера его применения крайне ограничена.

Все приведенные нормативные требования ограничивают реализацию планов по введению скоростного движения поездов.

### **Анализ продольного профиля направления Гомель – Минск**

В рамках государственных программ за последние восемь лет были закуплены 30 грузовых магистральных электровозов, 18 электропоездов и 13 дизель-поездов. В том числе в сотрудничестве с китайскими партнерами стальная магистраль приобрела 12 двухсекционных электровозов БКГ-1 и 18 односекционных электровозов БКГ-2 производства Датунского электровозостроительного завода. Такое решение было принято с учетом расширения полигона электрификации дороги. Планы дальнейшего развития локомотивного хозяйства предусматривают приобретение в 2021–2025 гг. десяти единиц электропоездов межрегиональных линий пятивагонной составности производства ЗАО «Штадлер Минск» ( $v_k = 160$  км/ч) (Беларусь). Также планируется закупка электровозов серии БКГ в количестве 15 ед. с возможностью ведения пассажирских поездов.

Эксплуатация мощных локомотивов позволила формировать поезда с увеличением их среднего веса и длины. Это создает предпосылки для снижения себестоимости перевозок и повышения их привлекательности для грузовладельцев, особенно в сфере транзитных контейнерных перевозок.

Задействованные на важнейших направлениях перевозок современные электропоезда стали воплощением инновационных решений, призванных вывести Белорусскую стальную магистраль на новый уровень развития.

Одно из важных направлений Белорусской железной дороги является железнодорожная линия Минск – Гомель – линия от Минска через Осиповичи, Жлобин и далее до Гомеля. На всем протяжении линия двухпутная, электрифицированная.

На участке Гомель – Минск запланирована организация скоростных пассажирских перевозок по маршруту Гомель – Жлобин – Минск (300 км). Для того чтобы указанный маршрут был востребован у пассажиров, время

следования по участку должно быть минимальным. Запланировано повышение установленных скоростей движения грузовых поездов до 100 км/ч и установление скоростей движения пассажирских поездов на уровне 141–160 км/ч и выше [18].

Возможность повышения скорости движения пассажирских поездов до 160 км/ч на направлении основывается на анализе технических характеристик, показателей плана и профиля, а также причин, ограничивающих скорость.

Анализ причин ограничения скорости пассажирских и грузовых поездов показал, что главными факторами, которые сдерживают повышение скорости на всем участке, являются:

- состояние верхнего строения пути (сверхнормативный износ рельсов, наличие дефектных креплений и шпал);
- станционные устройства, которые нуждаются в модернизации или реконструкции;
- несоответствие переломов продольного профиля современным нормам и требованиям к проектированию скоростных железных дорог.

При этом последний фактор играет одну из важных ролей в повышении скоростей. После анализа продольного профиля направления Минск – Гомель выявлены участки, на которых разность соседних уклонов ( $\Delta i$ ) больше 6 ‰, что недопустимо для скоростей 161 км/ч и выше. Только в пределах Гомельской дистанции пути (протяженность участка около 20 км) таких «барьерных» мест порядка 15.

На протяжении всего направления (300 км) таких участков, где разность соседних уклонов больше 6 ‰, оказалось около 147 км или 49 ‰. Эти участки требуют перепроектирования и применения таких уклонов, чтобы разность стала  $\Delta i \leq 6$  ‰.

Переустройство продольного профиля рассмотрено на всем протяжении и перепроектировано согласно нормативным требованиям. Все уклоны старались изменять с наименьшими объемами работ. Однако существующая застройка, наличие промежуточных станций не всегда позволяют это осуществить.

Для примера приведен участок профиля, на котором имеется разность уклонов больше 6 ‰ (рис. 6). Для него уложена новая проектная линия с соседними уклонами, разность которых меньше 6 ‰ (рис. 7).





Для проверки движения пассажирских поездов со скоростями свыше 140 км/ч и грузовых поездов со скоростью 100 км/ч по переустроенному профилю решена инженерная задача по тяговым расчетам. Тяговые расчеты произведены для грузовых составов с электровозом БКГ1-012 и пассажирского состава электропоезда серии ЭПм.

Из расчета следует, что по переустроенным участкам с уклонами 2,8; 3,0; 1,3; 2,2; 1,6 ‰ локомотив БКГ1-012 может двигаться со скоростью 100 км/ч (максимальная масса состава 3 500 т), а пассажирский электропоезд ЭПм может свободно передвигаться со скоростью свыше 140 км/ч.

Проанализировав существующее расположение пути, отметим, что при изменении уклонов будет затронуто больше 50 % суще-

ствующей инфраструктуры, что тоже потребует переустройства.

### Заключение

При введении скоростного движения помимо реконструкции плана требуется и реконструкция продольного профиля. Два этих мероприятия являются самыми трудозатратными. Изучив требования к продольному профилю при введении скоростного движения поездов, выявлены «барьерные» места в профиле, самыми многочисленными из которых являются реконструкция плана и профиля. Сравнив два основных мероприятия по повышению скоростей движения поездов делаем вывод, что стоимость переустройства профиля примерно в 1,5 раза дороже стоимости переустройства криволинейных участков.

### Список литературы

1. Ерофеев А.А., Ковтун П.В., Дубровская Т.А. Проблемы повышения скорости движения поездов на существующих железнодорожных линиях // Вестник БелГУТ. 2018. № 39. С. 57–60.
2. Михеева Г.А. Перспективы развития высокоскоростного и скоростного движения в России // Тр. 79-й студенч. науч.-практ. конф. РГУПС. Воронеж, 2020. Ч. 1. С. 72–74.
3. Ковтун П.В., Дубровская Т.А., Стрижак А.И. Анализ основных технических решений, направленных на повышение скоростей движения поездов в Республике Беларусь // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 2 (61). С. 16–23.
4. Харина Е.В. Выбор рациональных мер по повышению скорости движения пассажирских поездов в условиях растущего объема грузовых и пассажирских перевозок : автореф... дис. канд. техн. наук. М. : МИИТ, 2004. 24 с.
5. Identification of the railway reconstruction parameters at imposition of high speed traffic on the existing lines / I. Lebid, I. Kravchenya, T. Dubrovskaya et al. // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 294 (7). P. 05003. DOI 10.1051/mateconf/201929405003.
6. Левин Д.Ю. Оптимизация скорости движения поездов // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 6(97). С. 73–90.
7. Карасев С.В., Калидова А.Д. Метод экспресс-оценки потребности изменения плана железнодорожных линий скоростного движения // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2020. № 2 (53). С. 46–53.
8. Калидова А.Д. Анализ возможностей совмещения скоростного и обычного движения с использованием существующей инфраструктуры // Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2016. Т. 2. С. 52–55.
9. Карасев С.В., Зарубина Т.Д. Особенности организации скоростного движения с учетом использования имеющейся железнодорожной инфраструктуры // Политранспортные системы : материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск, 2015. С. 61–67.
10. Совершенствование конструкции скоростного пути // Евразия вести : сайт. URL: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2007-08a07>. (Дата обращения: 1.09.2022).
11. Колос А.Ф., Козлов И.С. Современные конструкции верхнего строения пути для строительства скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий // Бюллетень результатов научных исследований. 2013. № 2. С. 16–21.
12. Довгелюк Н.В., Ахраменко Г.В., Царенкова И.М. Изыскания и проектирование железных дорог. Гомель : БелГУТ, 2013. 332 с.
13. СП 119.13330.2017 Железные дороги колеи 1520 мм (с изменением № 1 от 24.12.2019) : утв. приказом Минстроя РФ № 1648/пр от 12.12.2017 г. Введ. 2018–06–13. М. : Минстрой России, 2017. 41 с.
14. СТП БЧ 56.263-2013. Железнодорожные пути. Устройство и эксплуатация пути на участках обращения скоростных пассажирских поездов. Минск: М-во транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь, 2014. 286 с.
15. СНБ 3.03.01-98. Железные дороги колеи 1520 мм. Введ. 1998–08–01. Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 1998. 26 с.
16. Об утверждении Правил технической эксплуатации железной дороги в Республике Беларусь : постановление Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 25.11.2015 № 52 // Pravo.by : национал. прав. Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21530414p&p1=1> (Дата обращения 1.09.2022).

17. СП 237.1326000.2015. Инфраструктура железнодорожного транспорта. Общие требования : утв. приказом Минтранса РФ № 208 от 6.07.2015 г. Введ. 2015–07–01. М. : Стандартинформ, 2015. 57 с.

18. Об установлении скоростей движения поездов на Белорусской железной дороге (с изменениями и дополнениями) : приказ начальника дороги от 28 апреля 2021 №231Н. Минск, 2021. 93 с.

### References

1. Erofeev A.A., Kovtun P.V., Dubrovskaya T.A. Problemy povysheniya skorosti dvizheniya poezdov na sushchestvuyushchikh liniyakh [Problems of increasing the speed of trains on existing railway lines]. *Vestnik BelGUT* [Bulletin of Belarussian State University of transport], 2018, no. 2 (37), pp. 57–59.

2. Mikheeva G.A. Perspektivy razvitiya vysokoskorostnogo i skorostnogo dvizheniya v Rossii [Prospects for the development of high-speed and high-speed traffic in Russia]. *Trudy 79-i studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii RGUPS* [Proceedings of the 79th student scientific and practical conference of the Rostov State Transport University]. Voronezh, 2020, part 1, pp. 72–74.

3. Kovtun P.V., Dubrovskaya T.A., Stryzhak A.I. Analiz osnovnykh tekhnicheskikh reshenii, napravlennykh na povyshenie skorosti dvizheniya poyezdov v Respublike Belarus' [Analysis of the main technical solutions aimed at increasing the speed of trains in the Republic of Belarus]. *Vestnik SGUPS* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2018, no. 2(61), pp. 16–23.

4. Kharina E.V. Vybór ratsional'nykh mer po povysheniyu skorosti dvizheniya passazhirskikh poyezdov v usloviyakh rastushchego ob'ema gruzovykh i passazhirskikh perevozok [The choice of rational measures to increase the speed of passenger trains in the face of a growing volume of freight and passenger traffic]. Ph.D.'s thesis. Moscow: MIIT, 2004. 24 p.

5. Lebid I., Kravchenya I., Dubrovskaya T., Luzhanska N. Identification of the railway reconstruction parameters at imposition of high speed traffic on the existing lines. *MATEC Web of Conferences*. 2019, vol. 294 (7), p. 05003.

6. Levin D.Yu. Optimizatsiya skorosti dvizheniya poyezdov [Optimization of train speed]. *Mir Transporta* [World of transport], 2021, vol. 19, no. 6(97), pp. 73–90.

7. Karasev S.V., Kalidova A.D. Metod ekspress-otsenki potrebnosti izmeneniya plana zheleznodorozhnykh linii skorostnogo dvizheniya [Method for express assessment of the need to change the plan of high-speed railway lines]. *Vestnik SGUPS* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2020, no. 2 (53), pp. 46–53.

8. Kalidova A.D. Analiz vozmozhnoy kombinatsii vysokoskorostnogo i obychnogo dvizheniya s ispol'zovaniyem sushchestvuyushchei infrastruktury [Analysis of the possibilities of combining high-speed and ordinary traffic using the existing infrastructure]. *Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Traditsionnaya i innovatsionnaya nauka : istoriya, sovremennoe sostoyaniye, perspektivy»* [Proceedings of the International scientific-practical Conference «Traditional and innovative science: history, current state, prospects»]. Ufa, 2016, vol. 2, pp. 52–55.

9. Karasev S.V., Zarubina T. D. Osobennosti organizatsii skorostnogo dvizheniya s uchetom ispol'zovaniya imeyushchey-sya zheleznodorozhnoy infrastruktury [Features of the organization of high-speed traffic taking into account the use of the existing railway infrastructure]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Polytransportnye sistemy»* [Proceedings of the VIII International scientific-practical Conference «Polytransport systems»]. Novosibirsk, 2015, pp. 61–67.

10. Sovershenstvovanie konstruktssii skorostnogo puti (Elektronnyi resurs) [Improving the design of the high-speed track (Electronic resource)]. Available at: <http://eav.ru/publ1.php?publ1=2007-08a07> (Accessed September 1, 2022).

11. Kolos A.F., Kozlov I.S. Sovremennye konstruktssii verkhnego stroeniya puti dlya stroitel'stva skorostnykh i vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh linii [Modern designs of the upper structure of the track for the construction of high-speed and high-speed railway lines]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research], 2013, no. 2, pp. 16–21.

12. Dovgelyuk N.V., Akhramenko G.V., Tsarenkova I.M. Izyskaniya i proyektirovaniye zheleznykh dorog [Research and design of railways]. Gomel': BelGUT Publ., 2013. 332 p.

13. SP 119.13330.2017 Zheleznye dorogi kolei 1520 mm. (s izmeneniyem no 1 ot 24.12.2019) [Set of Rules no 119.13330.2017 Railway with 1520 mm track (with edit no 1 dated December 24, 2019)]. Moscow: Minstroy Publ., 2017. 41 p.

14. STP BCH 56.263-2013. Zheleznodorozhnye puti. Ustroystvo i ekspluatatsiya puti na uchastkakh obrashcheniya skorostnykh passazhirskikh poyezdov. [Railways. Arrangement and operation of the track in the areas of circulation of high-speed passenger trains]. Minsk: Ministerstvo transporta i kommunikatsii Respubliki Belarus' Publ., 2014. 286 p.

15. SNB 3.03.01-98. Zheleznye dorogi kolei 1520 mm [1520 mm gauge railways]. Minsk: Ministerstvo arkhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus' Publ., 1998. 26 p.

16. Postanovlenie Ministerstva transporta i kommunikatsii Respubliki Belarus' ot 25.11.2015 №52 «Ob utverzhdenii Pravil tekhnicheskoi ekspluatatsii zheleznoi dorogi v Respublike Belarus'» [Resolution No 52 of the Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus dated 25.11.2015 «On approval of the Rules of Technical Operation of the Railway in the Republic of Belarus»].

17. SP 237.1326000.2015. Infrastruktura zheleznodorozhnogo transporta. Obshchie trebovaniya [Set of Rules 237.1326000.2015. Railway transport infrastructure. General requirements]. Moscow: Standartinform Publ., 2015. 57 p.

18. Prikaz nachal'nika dorogi ot 28.04.2021 № 231N «Ob ustanovlenii skorosti dvizheniya poezdov na Belorusskoi zheleznoi doroge (s izmeneniyami i dopolneniyami)» [Order of the head of the road no 231N dated April 28, 2021 «On the establishment of train speeds on the Belarussian Railway (with changes and additions)»].

**Информация об авторах**

*Ковтун Павел Владимирович*, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; e-mail: sed@bsut.by.

*Дубровская Татьяна Алексеевна*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; e-mail: rt-555@yandex.ru.

**Information about the authors**

*Pavel V. Kovtun*, Ph.D. in Engineering Science, Associate professor, Head of the Department of Design, Construction and Operation of Transport Facilities, Belarusian State University of Transport, Gomel; e-mail: sed@bsut.by.

*Tatyana A. Dubrovskaya*, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Design, Construction and Operation of Transport Facilities, Belarusian State University of Transport, Gomel; e-mail: rt-555@yandex.ru.

## Совершенствование качества обслуживания пассажиров и посетителей вокзального комплекса станции Иркутск-Пассажирский с применением методов имитационного моделирования

А.В. Димов, В.А. Оленцевич✉

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉olencevich\_va@mail.ru

### Резюме

Компания ОАО «РЖД» держит курс на увеличение пассажирооборота, привлечение большего числа клиентов за счет внедрения новых видов услуг и сервисов, расширения функциональных зон постоянно развивающейся инфраструктуры. В настоящее время клиентоориентированный подход в части развития вокзальных комплексов является приоритетным. Организация работы железнодорожного вокзала с пассажирами и посетителями, зависит от слаженного взаимодействия всех его подразделений, следовательно, необходимость обладания четким представлением об эффективности функционирования является актуальным вопросом. В современных условиях цифровизации производственных процессов большинства структурных подразделений железнодорожного транспорта, повышению качества обслуживания пассажиров уделяется особое внимание, поскольку данный процесс является наиболее трудоемким для отрасли, требует высокого качества и безопасности обслуживания. Применение методов имитационного моделирования, которые позволяют формировать дискретно-событийную модель обработки пассажиропотока на железнодорожном вокзальном комплексе, используя программную среду AnyLogic возможно достичь оптимальных управленческих решений в сфере организации работы. Результатом представленного научного исследования явилась разработка модели пассажиропотока нового объединенного пассажирского здания вокзального комплекса железнодорожной станции Иркутск-Пассажирский Восточно-Сибирской железной дороги в среде AnyLogic, на основе анализа которой предложен ряд мероприятий, направленных на повышение эффективности работы. При моделировании пассажиропотока на железнодорожном вокзале могут быть использованы различные математические модели, но учитывая специфику объекта моделирования, для обеспечения высокой адекватности целесообразно использовать именно имитационное моделирование, в большинстве случаев выступающее единственным инструментом, который позволяет получить данные о поведении пассажиропотока и провести его анализ.

### Ключевые слова

железнодорожный транспортный комплекс, методы имитационного моделирования, вокзальный комплекс, совершенствование качества обслуживания, пассажир, 3D-модель работы, модель пассажиропотока

### Для цитирования

Димов А.В. Совершенствование качества обслуживания пассажиров и посетителей вокзального комплекса станции Иркутск-Пассажирский с применением методов имитационного моделирования / А.В. Димов, В.А. Оленцевич // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 72–81. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).72-81.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 20.06.2023 г.; поступила после рецензирования: 27.06.2023 г.; принята к публикации: 28.06.2023 г.

## Improving the quality of passenger and visitor service at the Irkutsk-Passenger station complex using simulation methods

A.V. Dimov, V.A. Olentsevich✉

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

✉olencevich\_va@mail.ru

### Abstract

The JSC «Russian Railways» is committed to increasing passenger turnover, attracting more customers through the introduction of new types of services, expanding the functional areas of the constantly developing infrastructure. Currently, a customer-oriented approach to the development of railway station complexes is a priority. The organization railway station's work with passengers and visitors depends on the well-coordinated interaction of all its departments, therefore, the need for a clear idea of the effectiveness of functioning is an urgent issue. In modern conditions of digitalization of production processes at most railway structural divisions, special attention is paid to improving the quality of passenger service, the process being the most labor-intensive for the industry, requiring high quality and safety of service. The use of simulation modeling methods that allowing to form a discrete-event model of passenger traffic processing at a railway station complex using the AnyLogic software environment, makes it possible to achieve optimal management decisions in the field of work organization. The result of the presented scientific research was the development of a passenger traffic model for the new combined railway station passenger building

complex of the Irkutsk-Passenger railway station of the East Siberian Railway in the AnyLogic environment, based on the analysis of which a number of measures aimed at improving the efficiency of work are proposed. When modeling passenger traffic at a railway station, various mathematical models can be used, but taking into account the specifics of the modeled object, it is advisable to use simulation modeling to ensure high adequacy, in most cases acting as the only tool that allows us to obtain data on the behavior of passenger traffic and analyze it.

### Keywords

railway transport complex, simulation methods, railway station complex, improving the quality of service, passenger, 3D-model of work, passenger traffic model

### For citation

Dimov A.V., Olentsevich V.A. Sovershenstvovanie kachestva obsluzhivaniya passazhirov i posetitelei vokzal'nogo kompleksa stantsii Irkutsk-Passazhirskii s primeneniem metodov imitatsionnogo modelirovaniya [Improving the quality of passenger and visitor service at the Irkutsk-Passenger station complex using simulation methods]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78). pp. 72–81. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).72-81.

### Article Info

Received: June 20, 2023; Revised: June 27, 2023; Accepted: June 28, 2023.

### Введение

Компания ОАО «РЖД» входит в тройку лидеров железнодорожных компаний мира и имеет особое значение для всей транспортной отрасли Российской Федерации. Особое место занимает сектор работы с пассажирами. Сокращение объема перевозок пассажиров и пассажирооборота в дальнем следовании связано с развитием конкуренции с другими видами транспорта. Пассажирооборот на воздушном транспорте, включая международное сообщение, в этот же период увеличился практически в 2 раза: с 147,1 млрд пасс.-км до 286,3. Также активно развивается автомобильный транспорт: расширяется сеть автобусного сообщения, вводятся в эксплуатацию новые автодороги. Так, в сравнении с 2018 г. к сегодняшнему дню протяженность автомобильных дорог с твердым покрытием увеличилась более чем на 380 тыс. км [1–3].

Все это способствует оттоку пассажиров с железнодорожного транспорта. В то же время активное развитие пригородной железнодорожной инфраструктуры способствует росту перевозок пассажиров и пассажирооборота в пригородном сообщении. ОАО «РЖД» держит курс на увеличение пассажирооборота, привлечение большего числа клиентов за счет внедрения новых видов услуг, расширения функциональных зон постоянно развивающейся инфраструктуры. В настоящее время именно клиентоориентированный подход в части развития вокзальных комплексов является наиболее приоритетным направлением. Эффективное, доходобразующее функционирование железнодорожного вокзального комплекса зависит от

слаженного взаимодействия всех его структурных подразделений, следовательно, необходимость обладания четким представлением об их оптимальной работе, долгосрочное прогнозирование пассажиропотоков и колебаний уровня подвижности населения в регионах и развитых экономических зонах Российской Федерации являются актуальными вопросами [4, 5].

В представленном научном исследовании в качестве объекта выступает вокзальный комплекс ст. Иркутск-Пассажирский Восточно-Сибирской железной дороги. Именно на примере данного комплекса авторы предлагают и обосновывают ряд мероприятий, направленных на совершенствование качества обслуживания пассажиров и посетителей вокзала с применением методов имитационного моделирования [6].

Проведенный авторами анализ инфраструктуры и видов деятельности иностранных вокзальных комплексов показал, что все они оказывают достаточно большой спектр различного вида услуг, что позволяет пассажирам чувствовать себя комфортно в течение всей поездки, при этом данная сфера деятельности железных дорог является весьма прибыльной [6–9].

### Анализ работы и перспективы развития вокзального комплекса

Вокзальный внеклассный комплекс станции Иркутск-Пассажирский является крупным пересадочным узлом, объединяющим городские транспортные коммуникации с железнодорожным сообщением. Один из старейших вокзалов Сибирского региона, закладка которого состоялась в 1896 г. Здание вокзала построено

но за год с небольшим: в августе 1897 г. вокзал принял первых пассажиров и сегодня является памятником архитектуры регионального значения, находится под надзором Центра сохранения исторического наследия [2, 10]. Общая площадь железнодорожного вокзального комплекса до 2023 г. составляла 4 160,0 м<sup>2</sup>. Расчетная вместимость пассажирского здания, согласно расчету проектно-технической документации, 800 чел.

Согласно установленной технологии работы и географическому расположению анализируемый вокзальный комплекс производит качественное обслуживание пассажиров дальнего

и пригородного сообщения. Параметры пассажирских поездов, пользователи которых обслуживаются вокзалом Иркутск-Пассажирский, представлены в табл. 1.

На рис 1 представлены основные технологические линии обслуживания пассажиропотоков вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский, построенные на основе [2, 11].

На рис. 2 представлена динамика отправленных пассажиров [2, 10].

Объем отправленных пассажиров резко снизился в апреле 2020 г. почти на 70 % по сравнению с 2019 г., тенденция к снижению наблюдалась до марта 2021 г., в апреле 2021 г.

**Таблица 1.** Размеры движения поездов  
**Table 1.** Train traffic dimensions

Категория поездов Train category	Летний период, пар поездов Summer period, train pairs	Зимний период, пар поездов Winter period, train pairs
Пассажирские и скорые поезда дальнего следования (в том числе конечные транзитные) Passenger and long distance fast trains (including final transit ones)	53	42
Пригородные поезда (в том числе конечные транзитные) Commuter trains (including final transit ones)	32	36
Итого Total	85	78



**Рис. 1.** Технологические линии обслуживания пассажиропотоков вокзального комплекса  
**Fig. 1.** Technological lines for servicing passenger traffic of the station complex



Рис. 2. Динамика отправленных пассажиров по видам следования в 2019–2021 гг.

Fig. 2. Dynamics of departed passengers by type of route in 2019–2021

объем к предыдущему году вырос практически в 2,5 раза, что связано с частичным снятием карантинных мер и выравниванием эпидемиологической обстановки. Далее наблюдается постепенное увеличение среднесуточного значения отправленных пассажиров.

В 2019–2022 гг. вокзальный комплекс в дальнем сообщении в среднем отправляет свыше 2,85 тыс. пассажиров в сутки, в пригородном сообщении – свыше 5,75 тыс. Проведенный анализ показал, что суммарная площадь вокзального комплекса более чем в 2,5 раза ниже нормативного допустимого значения при фактическом суточном пассажиропотоке.

Согласно [1] в 2021 г. был утвержден план эффективного использования и развития железнодорожной вокзальной ст. Иркутск-Пассажирский, который обусловил его поэтапную реконструкцию:

- первый этап – реконструкция подземного перехода и платформ № 1 и 2;
- второй этап – строительство объединенного пассажирского зала, вместо существующего здания пригородных касс и туалета;
- третий этап – реконструкция существующего здания вокзала с реставрационными работами и реконструкция перрона;
- четвертый этап – строительство пригородного пассажирского зала-конкорса, третьей островной платформы вместо одиннадцатого пути для пригородного сообщения, реконструкция береговой платформы на пятнадцатом пути.

Анализ новой производственно-технической базы вокзального комплекса, а также показателей его работы после реконструкции позволил наметить мероприятия по

совершенствованию качества обслуживания пассажиров и посетителей вокзального комплекса с применением методов имитационного моделирования [6, 12–14].

### Вопросы совершенствования качества обслуживания пассажиров с использованием методов имитационного моделирования

Моделирование будет проводиться с учетом наличия работающего нового пассажирского здания, а также переноса касс дальнего следования в новое здание, а пригородных – в здание подъезда № 1 вокзального комплекса.

Задачи моделирования заключаются в следующем:

- пропустить через здание вокзала за сутки максимальный пассажиропоток при существующей планировке инфраструктуры;
- задействовать услуги касс дальнего следования по продаже билетов, зала ожидания, буфета, административно-хозяйственного комплекса, туалетных комнат;
- проанализировать работу вокзала за сутки, выявить наличие «узких мест»;
- внести предложения по внедрению новых видов услуг с целью повышения качества обслуживания пассажиров и посетителей;
- разрешить проблемы, выявленные в процессе моделирования;
- построить 3D-модель работы вокзального комплекса.

В качестве исходных данные для построения имитационной модели вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский используются:

- расписание движения поездов за сутки

с максимальной загрузкой;

- число проходов пассажиров через арочные металлодетекторы;
- количество пассажиров дальнего следования по отправлению;
- вместимость помещений вокзала;
- часы работы с максимальным пассажиропотоком;
- схема помещений вокзала;
- схема организации маршрутов потоков пассажиров;
- количество билетных касс.

В качестве условия для построения модели примем следующие нормы времени нахождения различных категорий пассажиров на вокзале:

1. В дальнем следовании:

- по отправлению – накопление пассажиров начинается за 30–60 мин., за 5–10 мин. до отправления поезда пассажиры проходят на посадку;
- по прибытию – 60 % прибывающих пассажиров задерживаются на вокзале более 30–40 мин.

2. В пригородном сообщении:

- по отправлению – накопление пассажиров начинается за 20 мин.;
- по прибытию – пассажиры задерживаются на вокзале на 10–15 мин.

Максимальное количество проходов посетителей вокзального комплекса, следующих через арочные металлодетекторы, согласно статистике 2022 г., приходится на август и составляет 11 676 чел. в сутки. Из суточных проходов по рамкам необходимо вычесть количество проходов персонала в размере 7 %. Из всех прошедших за сутки пассажиров 20 % приходится на покупателей билетов в дальнем сообщении, из них 5 % просто покупают билеты, 15 % покупают билеты и проходят в зону ожидания и на посадку. При высадке количество пассажиров нельзя отследить, так как в настоящее время они обходят здание вокзала и сразу попадают в город. Через вокзал после высадки следует 20 % от общего количества пассажиров дальнего сообщения и 10 % пригородного сообщения.

Техническим процессом работы вокзального комплекса с целью обеспечения безопасности передвижения и качества оказываемых услуг должно предусматриваться:

- разделение пассажиропотоков дальних и местных пассажиров от пригородных;

- отделение багажного и почтового транспорта от пассажиропотока;
- разделение потока пассажиров и багажа по отправлению и прибытию.

Движение пассажиров от привокзальной площади до здания вокзала, а также на пассажирские платформы и обратно должно быть взаимосвязано для учета максимальной загрузки инфраструктуры.

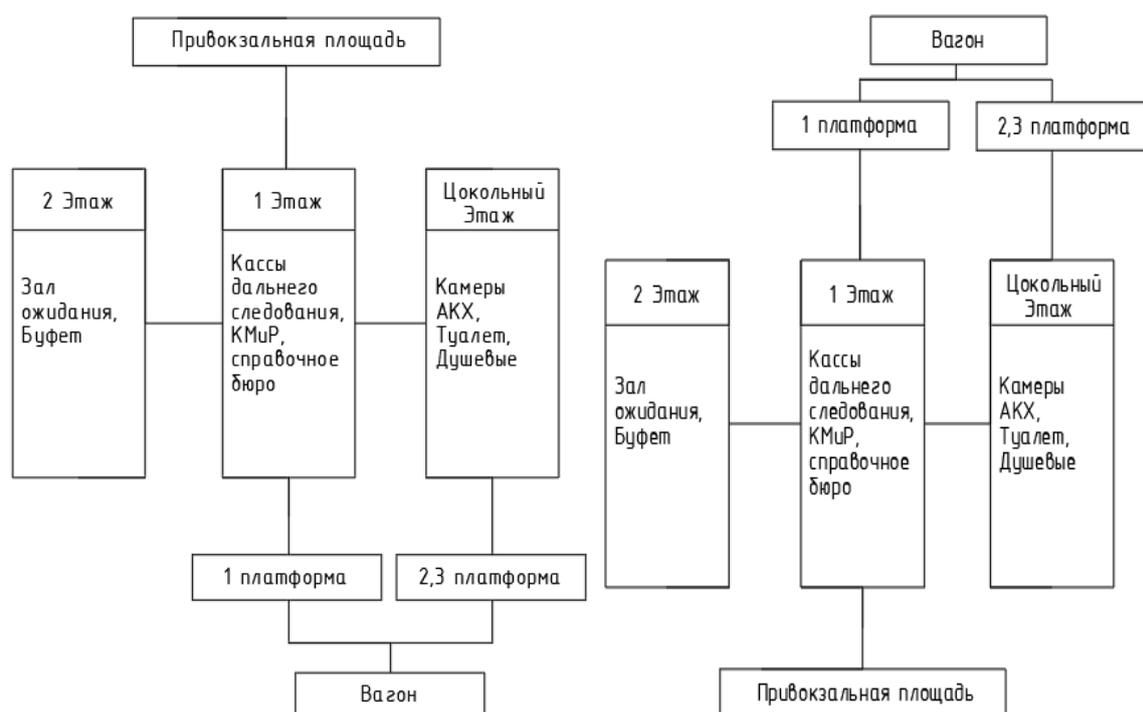
Разработка имитационной модели вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский осуществляется с использованием планировочных решений, технологических алгоритмов и параметров нагрузок, обеспечивающих демонстрацию изменений количества пассажиров и их перемещение в зависимости от графика прибытия и отправления поездов. Очевидно утверждение, что пассажиропоток на железнодорожном вокзале увеличивается, это приводит к росту нагрузок на кассы, досмотровое оборудование, в связи с чем запланированная инфраструктура для обслуживания пассажиров может оказаться недостаточной в определенные промежутки времени [15–18].

На рис. 3 представлена схема технологической линии обслуживания посетителей и пассажиров железнодорожного вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский. В табл. 2 представлены данные о максимальном единовременном количестве пассажиров в помещениях здания объединенного пассажирского зала.

### Реализация имитационной модели вокзального комплекса

Модель железнодорожного вокзального комплекса ст. Иркутск-Пассажирский содержит следующие основные элементы:

- 1, 2 точки входа;
- 1, 2 точки выхода в зависимости от выбранного маршрута следования пассажира и направления движения пассажиропотока;
- пункты входного контроля безопасности пассажиров и посетителей, оснащенные высокоточными арочными металлодетекторами и рентгеноскопическими аппаратами;
- кассовые помещения для приобретения проездных документов на поезда дальнего следования;
- терминалы по реализации проездных документов на поезда дальнего следования;
- зона ожидания отправления, представляющая собой помещение, в котором пассажи-



**Рис. 3.** Перспективные технологические линии пассажиропотока вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский

**Fig. 3.** Perspective technological lines of passenger traffic at the station complex Irkutsk-Passenger

**Таблица 2.** Максимальное количество пассажиров, одновременно находящихся в помещениях здания объединенного пассажирского зала

**Table 2.** The maximum number of passengers at the simultaneously present in the building of the joint passenger hall premises

Помещение Premise	Количество пассажиров, чел. Number of passengers, pers.
Камеры хранения ручной клади Hand luggage storage	36
Вестибюль Hall	306
Операционный зал Operating room	62
Зал ожидания Waiting hall	381
Буфет Buffet	24
Прочие пассажирские помещения Other passenger spaces	91
Итого Total	900

ры и посетители ожидают прибытия пассажирского или пригородного поезда.

Рассмотрим процесс имитационного моделирования пассажиропотока на железнодорожном вокзале. Моделирование реализуется при помощи пешеходной библиотеки и библио-

теки моделирования процессов, которая представляет собой совокупность этапов обработки пассажиропотока.

В рамках модели пассажиры дальнего следования проходят входной контроль, приобретают проездные документы, что реализовано

с помощью блока «Ped Service», для зоны осмотра используется сервис с очередями, для касс – сервис с такой областью, чтобы можно было повторить работу касс в режиме электронной очереди.

Интенсивность прибытия пассажиров за определенные промежутки времени реализована через блок «Расписание». Далее пассажиры проходят в зону ожидания, которая представляет собой целевую линию, после попадания в которую пассажиры исчезают из поля видимости модели «Ped Exit», но все еще находятся в ней до прибытия поезда. Время нахождения пассажиров в зоне ожидания определяется в соответствии с распределением Гаусса или нормальным законом распределения (среднее время нахождения принято равным 20 мин.).

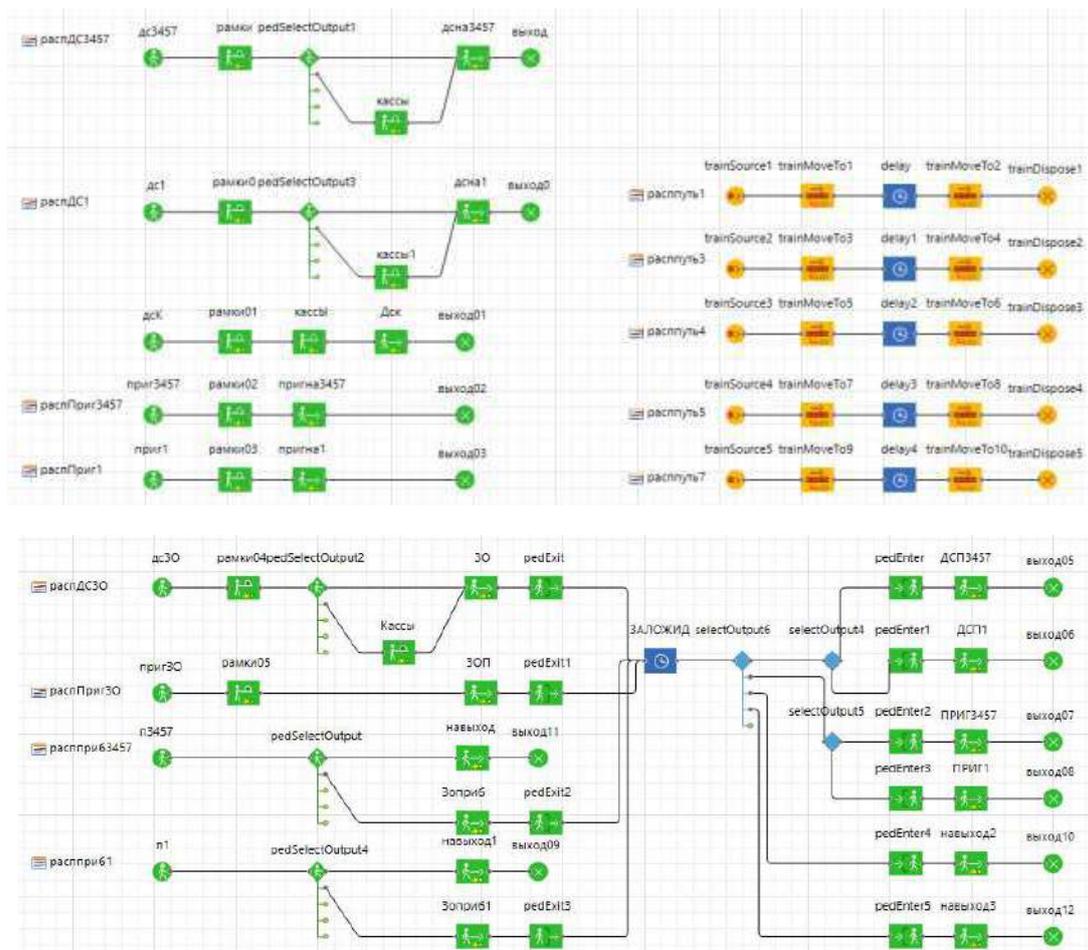
Для посадки была смоделирована зависимость зала ожидания и прибытия поездов посредством блока «delay». По прибытии поезда

происходит информирование пассажиров о необходимости проследовать на соответствующую платформу, далее они покидают зал ожидания «Ped Enter».

После каждый пассажир следует к своей платформе в зависимости от номера пути прибытия поезда. Часть пассажиров приобретают проездные документы и следуют на выход. В пригородном сообщении пассажиры либо следуют непосредственно на пути с помощью блока «Ped Go To» для посадки, либо следуют через зал ожидания и буфет, расположенные на одном этаже, и далее уже на необходимую платформу.

В качестве вспомогательных исходных данных для построения имитационной модели будут выступать:

- потребное число каналов обслуживания заданного пассажиропотока на каждом этапе;
- выбор пассажиром или посетителем то-



**Рис. 4.** Схема модели железнодорожного вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский в среде AnyLogic  
**Fig. 4.** Model scheme of the Irkutsk-Passenger railway station complex in the AnyLogic environment

го или иного маршрута следования в зависимости от номера железнодорожного пути прибытия пассажирского или пригородного поезда;

– время, затраченное пассажиром или посетителем вокзального комплекса на получение качественной услуги.

Построение модели учитывает ограничения во времени на оказание прочих дополнительных услуг, предоставляемых железнодорожным вокзалом, с ее помощью также задается интервал времени продолжительности моделирования – 24 ч. Модель строится на основании характеристик сервиса и нормативов времени, которое пассажиры могут проводить в ожидании освобождения какого-либо канала обслуживания.

С учетом описанных характеристик произведено построение модели пассажиропотока на рассматриваемом железнодорожном вокзале в среде AnyLogic (рис. 4).

В созданной модели содержится три точки входа: с фронтальной стороны одна точка, с противоположной – две точки. Тем самым определено различие в поведении пассажиропотоков, входящих с разных сторон. Количество арочных металлодетекторов для входного контроля – три единицы. Установлено, что пассажиры, прибывающие с поездов «чистые», досмотру не подвергаются.

Билетные кассы рассматриваются в совокупности с терминалами по продаже проездных документов. Таким образом, система имеет девять касс и два терминала для приобретения проездных документов в дальнем сообщении.

В модели используется одна абстрактная зона ожидания. Также смоделированы процессы

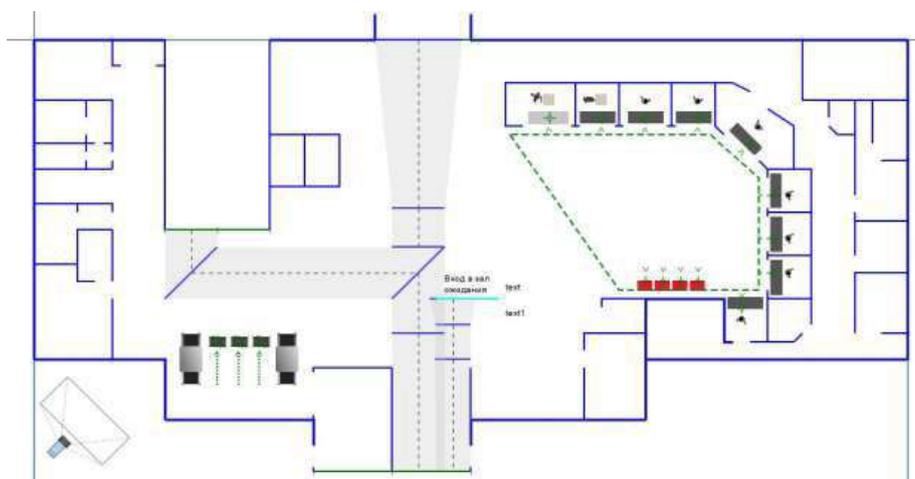
прибытия и отправления поездов с учетом номера пути нахождения составов. После запуска модели мы сможем наблюдать реалистичное движение пешеходов в заданном пространстве с учетом физических размеров, скорости движения, стремления двигаться по кратчайшему маршруту, огибая препятствия и большие скопления посетителей. На рис. 5 представлена 2D-модель пассажиропотока железнодорожного вокзала в среде AnyLogic [19, 20].

### Заключение

Для оценки загруженности различных зон архитектурного объекта применен элемент «Карта плотности», который позволяет сделать выводы о потенциальной реорганизации пространства с целью увеличения пропускной способности заданного пассажиропотока. Также существует возможность собирать и отображать статистику любого уровня сложности в виде гистограмм, диаграмм, графиков и т.д. 3D-модель пассажиропотока железнодорожного вокзала представлена в среде AnyLogic.

Проведенный анализ результатов моделирования позволил выявить следующие недостатки в качестве обслуживания пассажиров и посетителей на железнодорожном вокзале:

- наличие «враждебных» пассажиропотоков по прибытию и отправлению пассажирских и пригородных поездов;
- скопление посетителей в так называемые часы пик в зоне досмотра на входе в вокзальный комплекс по причине недостаточного количества арочных металлодетекторов;
- излишнее количество касс по реализации проездных документов.



**Рис. 5.** 2D-модель пассажиропотока железнодорожного вокзала в среде AnyLogic  
**Fig. 5.** 2D passenger flow model of a railway station in the AnyLogic environment

## Список литературы

1. Стратегия развития Холдинга «РЖД» на период до 2030 года // ОАО «РЖД» : сайт. URL : <https://volgograd-terkom34.ru/wp-content/uploads/2017/05/Стратегия-развития-ОАО-РЖД-до-2030-года.pdf> (Дата обращения 11.02.2023).
2. Российские железные дороги // ОАО «РЖД» : сайт. URL: <http://www.rzd.ru> (Дата обращения 17.04.2023).
3. Антонова Н.Л., Логинова Д.О. Цифровые технологии в управлении качеством транспортных услуг // Тенденции развития науки и образования. 2021. № 74-3. С. 6–12.
4. Виховская Л.И., Доценко Ю.В. Формирование системы логистического сервиса на предприятиях железнодорожного транспорта // Вестн. Донец. акад. автомобилн. трансп. 2019. № 3. С. 20–25.
5. Об утверждении Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.09.2018 г. № 2101-р (ред. 18.05.2023). Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» в локал. сети
6. Елуферьева Ю.С., Пальмов С.В. Моделирование работы железнодорожного вокзала средствами Anylogic // Междунар. науч.-исслед. журн. 2018. № 12-1(78). С. 121–127.
7. Устинова Е.С. Умный вокзал. Концептуальные решения «smart-вокзал» ОАО РЖД // Синергия наук. 2021. № 55. С. 338–347.
8. Самуйлов В.М., Медовщиков И.А., Каргапольцева Т.А. Железнодорожный вокзал будущего // Инновационный транспорт. 2020. № 1(35). С. 3–10.
9. Черенцов Д.Ю., Холомеева Н.В. Модернизация инженерных сетей пассажирских железнодорожных комплексов в соответствии с их современными функциями // Политранспортные системы : материалы XI междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск, 2020. С. 198–202.
10. Организационно-экономическая модель управления инновационным потенциалом Иркутской области / В.Н. Гордеев, В.Ю. Конюхов, К.И. Новикова и др. Иркутск : ИрННТУ, 2014. 91 с.
11. Жарков М.Л., Супруновский А.В. Моделирование работы вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский на основе сетей массового обслуживания // Информац. и матем. технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21). С. 43–53.
12. Application of correlation analysis in the study of passenger service quality indicators / V.E. Gozbenko, V.A. Olentsevich, S.K. Kargapol'tsev et al. // The European proceedings of social and behavioural sciences EpSBS. 2021. Vol. 113. P. 898–906. DOI 10.15405/epsbs.2021.07.107
13. Файзрахманова Е.В., Оленцевич А.А., Микаилов Р.А. Совершенствование управления логистическими издержками предприятия // Актуальные вопросы современной экономики. 2021. № 1. С. 70–74.
14. Курганов В.М. Эффективность логистики и конкурентоспособность России // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 1 (44). С. 19–23.
15. Рябикин Р.В., Никонова Я.И. Исследование стратегических факторов внешней среды развития вокзальных комплексов // European Journal of Natural History. 2020. № 1. С. 121–125.
16. Вержевикин И.А. Технология обслуживания транспортных и пассажирских потоков на привокзальных площадях вокзального комплекса // Труды 78-й студенч. науч.-практ. конф. РГУПС. Воронеж, 2019. Ч. 1. С. 24–26.
17. Creation of a mobile application for digitizing technological processes of a railway station / V.A. Olentsevich, V.Yu. Konyukhov, A.A. Olentsevich et al. // Journal of Physics. 2020. Vol. 1661. P. 012186. DOI 10.1088/1742-6596/1661/1/012186.
18. Automation of the procedure for assessing the quality of transport service for the population in the conditions of digitalization of the railway transportation system / T.A. Bulokhova, V.A. Olentsevich, V.Yu. Konyukhov et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1064. P. 012006. DOI 10.1088/1757-899X/1064/1/012006.
19. Каимов Е.В., Оленцевич В.А., Власова Н.В. Проблемы формирования, развития и реконструкции элементов инфраструктурного комплекса железных дорог // Образование – Наука – Производство : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Чита, 2022. Т. 1. С. 288–296.
20. Каимов Е.В., Оленцевич А.А. Формирование альтернативных решений модернизации инфраструктуры вокзального комплекса с применением имитационного моделирования // Наука и образование: достижения и перспективы : материалы VI междунар. науч.-практ. конф. Саратов, 2022. С. 26–29.

## References

1. Strategiya razvitiya Kholdinga «RZHD» na period do 2030 goda (Elektronnyi resurs) [Development strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2030 (Electronic resource)]. Available at: <https://volgograd-terkom34.ru/wp-content/uploads/2017/05/Стратегия-развития-ОАО-РЖД-до-2030-года.pdf> (Accessed February 11, 2023).
2. Rossiiskie zheleznye dorogi (Elektronnyi resurs) [Russian Railways (Electronic Resource)]: Available at: <http://www.rzd.ru> (Accessed April 17, 2023).
3. Antonova N.L., Loginova D.O. Tsifrovye tekhnologii v upravlenii kachestvom transportnykh uslug [Digital technologies in quality management of transport services]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the development of science and education], 2021, no. 74-3, pp. 6–12.
4. Vikhovskaya L.I., Dotsenko Yu.V. Formirovanie sistemy logisticheskogo servisa na predpriyatiyakh zheleznodorozhnogo transporta [Formation of a logistics service system at railway transport enterprises]. *Vestnik Donetskoi akademii avtomobil'nogo transporta* [Bulletin of the Donetsk Academy of Automobile Transport], 2019, no. 3, pp. 20–25.
5. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 30.09.2018 g. № 2101-r «Ob utverzhdenii Kompleksnogo plana modernizatsii i rasshireniya magistral'noi infrastruktury na period do 2024 goda» (red. 18.05.2023) [Decree of the Government of the Russian Federation no 2101-r dated September 30, 2018 «On approval of the Comprehensive Plan for Modernization and Expansion of the trunk infrastructure for the period up to 2024» (ed. May 18, 2023)].

6. Elufer'eva Yu.S., Pal'mov S.V. Modelirovanie raboty zheleznodorozhnogo vokzala sredstvami Anylogic [Modeling of the railway station operation by means of Anylogic]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal* [International Scientific Research Journal], 2018, no. 12-1 (78), pp. 121–127.
7. Ustinova E.S. Umnyi vokzal. Kontseptual'nye resheniya «smart-vokzal» OAO RZhD [Smart railway station. Conceptual solutions «smart-station» of JSC Russian Railways]. *Sinergiya nauk* [Synergy of Sciences], 2021, no. 55, pp. 338–347.
8. Samuilov V.M., Medovshchikov I.A., Kargapol'tseva T.A. Zheleznodorozhnyi vokzal budushchego [Railway station of the future]. *Innovatsionnyi transport* [Innovative transport], 2020, no. 1 (35), pp. 3–10.
9. Cherentsov D.Yu., Kholomeeva N.V. Modernizatsiya inzhenernykh setei passazhirskikh zheleznodorozhnykh kompleksov v sootvetstvi s ikh sovremennymi funktsiyami [Modernization of engineering networks of passenger railway complexes in accordance with their modern functions]. *Materialy XI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Politransportnye sistemy»* [Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference «Polytransport systems»]. Novosibirsk, 2020, pp. 198–202.
10. Gordeev V.N., Konyukhov V.Yu., Novikova K.I., Nagaeva A.V., Vasil'kova A.V., Shchadov I.M. Organizatsionno-ekonomicheskaya model' upravleniya innovatsionnym potentsialom Irkutskoi oblasti [Organizational and economic model of management of innovative potential of Irkutsk region]. Irkutsk: IRNITU Publ., 2014. 91 p.
11. Zharkov M.L., Suprunovskii A.V. Modelirovanie raboty vokzal'nogo kompleksa Irkutsk-Passazhirskii na osnove setei massovogo obsluzhivaniya [Modeling the operation of the Irkutsk-Passazhirskii railway station complex based on queuing networks]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2021, no. 1 (21), pp. 43–53.
12. Gozbenko V.E., Olentsevich V.A., Kargapol'tsev S.K., Bulokhova T.A., Karlina Yu.I., Shtaiyer M.G., Karlina A.I. Application of correlation analysis in the study of passenger service quality indicators. *The European Proceedings of Social and Behavioural Sciences EpSBS*, 2021, vol. 113, pp. 898–906.
13. Faizrakhmanova E.V., Olentsevich A.A., Mikailov R.A. Sovershenstvovanie upravleniya logisticheskimi izderzhkami predpriyatiya [Improving the management of logistics costs of the enterprise]. *Aktual'nye voprosy sovremennoi ekonomiki* [Topical issues of the modern economy], 2021, no. 1, pp. 70–74.
14. Kurganov V.M. Effektivnost' logistiki i konkurentosposobnost' Rossii [Logistics efficiency and competitiveness of Russia]. *Transport Rossiiskoi Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2013, no. 1 (44), pp. 19–23.
15. Ryabikin R.V., Nikonova Ya.I. Issledovanie strategicheskikh faktorov vneshnei sredy razvitiya vokzal'nykh kompleksov [Research of strategic factors of the external environment of the development of railway complexes]. *European Journal of Natural History*, 2020, no. 1, pp. 121–125.
16. Verzhavikin I.A. Tekhnologiya obsluzhivaniya transportnykh i passazhirskikh potokov na privokzal'nykh ploshchadyakh vokzal'nogo kompleksa [Technology of service of transport and passenger flows on the forecourts of the station complex]. *Trudy 78-i studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii RGUPS* [Proceedings of the 78th Student Scientific and Practical Conference of the Rostov State Transport University]. Voronezh, 2019, part 1, pp. 24–26.
17. Olentsevich V.A., Konyukhov V.Yu., Olentsevich A.A., Lysenko D.A. Creation of a mobile application for digitizing technological processes of a railway station. *Journal of Physics*, 2020, vol. 1661, pp. 012186. DOI 10.1088/1742-6596/1661/1/012186.
18. Bulokhova T.A., Olentsevich V.A., Konyukhov V.Yu., Lysenko D.A. Automation of the procedure for assessing the quality of transport service for the population in the conditions of digitalization of the railway transportation system. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1064, pp. 012006. DOI 10.1088/1757-899X/1064/1/012006.
19. Kaimov E.V., Olentsevich V.A., Vlasova N.V. Problemy formirovaniya, razvitiya i rekonstruktsii elementov infrastruktornogo kompleksa zheleznykh dorog [Problems of formation, development and reconstruction of elements of the infrastructural complex of railways]. *Materialy VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation «Education – Science – Production»]. Chita, 2022, vol. 1, pp. 288–296.
20. Kaimov E.V., Olentsevich A.A. Formirovanie al'ternativnykh reshenii modernizatsii infrastruktury vokzal'nogo kompleksa s primeneniem imitatsionnogo modelirovaniya [Formation of alternative solutions for modernization of the infrastructure of the railway station complex using simulation modeling]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka i obrazovanie: dostizheniya i perspektivy»* [Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference «Science and Education: achievements and prospects»]. Saratov, 2022, pp. 26–29.

### Информация об авторах

**Димов Алексей Владимирович**, кандидат технических наук, проректор по научной работе, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: dimov\_av@irgups.ru.

**Оленцевич Виктория Александровна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: olencevich\_va@mail.ru.

### Information about the authors

**Alexei V Dimov**, Ph.D. in Engineering Science, Vice-Rector for Scientific Work, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: dimov\_av@irgups.ru.

**Victoriya A. Olentsevich**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: olencevich\_va@mail.ru.

## Разработка блок-схемы алгоритма расчета норм закрепления подвижного состава с учетом профиля станционного пути

Н.Ю. Гончарова, И.Ю. Ермоленко, Т.Н. Черняева, Н.П. Асташков ✉

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉astashkovnp@yandex.ru

### Резюме

Одним из факторов обеспечения безотказной работы ОАО «РЖД» в условиях соблюдения действующих нормативов, правил и инструкций является внедрение безлюдных технологий и разработка мероприятий, направленных на минимизацию использования человеческого труда. Сложная структура железнодорожной системы не позволяет полностью вывести работника из организационно-технологической деятельности, поскольку требует постоянного принятия важнейших управленческих решений на всех этапах транспортного процесса. Руководствуясь изложенным следует заключить, что успешное функционирование компании ОАО «РЖД» невозможно без квалифицированного персонала, одним из путей повышения результативности труда которого является непрерывное производственное обучение. Транспортные происшествия и события, возникающие в связи с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, подчеркивают актуальность исследования вопросов закрепления подвижного состава на путях станции с целью предотвращения его самопроизвольного движения. Поставленная в статье задача не являлась актуальной, когда парк вагонов был укомплектован буксами с подшипниками скольжения, которые имели значительное сопротивление троганию с места. Переход на роликовые подшипники повысил актуальность вопроса обеспечения безопасности при закреплении подвижного состава. Перечень первоначальных исходных данных, необходимых для расчета норм ручного закрепления вагонов, подразумевает дополнение существующих формул поправочными коэффициентами. Каждая формула имеет широкое обоснование возможностей ее использования. В настоящее время разрабатываются различные технические средства, основной целью которых является минимизация использования человеческого труда и исключение ошибок в расчете количества и месторасположения тормозных башмаков. Альтернативные способы механизированного закрепления требуют точной установки состава перед упором. Использование определенного способа закрепления обусловлено пропускной и перерабатывающей способностью конкретной рассматриваемой станции, а обоснованием мероприятий смены одного на другой предопределяет технико-экономический расчет, включающий оценку сокращения величины вынужденных простоев на станционных путях подвижного состава. Представленная блок-схема алгоритма расчета норм закрепления может быть использована в учебном процессе.

### Ключевые слова

железнодорожный транспорт, безопасность движения, эксплуатация железнодорожного транспорта, расчет норм закрепления подвижного состава, тормозной башмак, блок-схема

### Для цитирования

Разработка блок-схемы алгоритма расчета норм закрепления подвижного состава с учетом профиля станционного пути / Н.Ю. Гончарова, И.Ю. Ермоленко, Т.Н. Черняева, Н.П. Асташков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78).С. 82–92. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).82-92.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 24.04.2023 г.; поступила после рецензирования: 23.05.2023 г.; принята к публикации: 24.05.2023 г.

## Development of a flow diagram for the calculation of rolling stock anchoring rates algorithm taking into account the station track profile

N.Yu. Goncharova, I.Yu. Ermolenko, T.N. Chernyaeva, N.P. Astashkov ✉

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

✉astashkovnp@yandex.ru

### Abstract

One of the factors to ensure the trouble-free operation of JSC Russian Railways in compliance with applicable standards, rules and instructions is the introduction of unmanned technologies and the development of measures aimed at minimizing human labor. The complex structure of the railway system does not allow an employee to be completely removed from organizational and technological activities, since it requires the continuous making of the most important management decisions at all stages of the transportation process. Based on the above, the successful functioning of the Russian Railways company is impossible without qualified personnel, one of the ways to improve its productivity being continuous production training. Transport accidents and events resulting from the violation of traffic safety rules and the operation of railway transport emphasize the relevance of studying the issues of securing rolling stock on the station tracks in order to prevent its spontaneous movement. The task set

within the framework of the article was not relevant when the fleet of wagons was equipped with axle boxes with plain bearings, which had significant resistance to starting. The transition from plain to roller bearings has raised the urgency of the issue of ensuring safety when securing rolling stock. The list of initial data necessary for calculating the norms for manual fixing of wagons implies the supplementation of existing formulas with correction factors. Each formula has a broad justification for the possibilities of its use. Currently, various technical means are being developed, whose main purpose is to minimize human labor and eliminate errors in calculating the number and location of brake shoes. However, alternative methods of mechanized fastening require precise setting of the train in front of the stop. It is obvious that the use of a specific method of securing is due to the throughput and processing capacity of the station in question, and the rationale for changing one to another will be determined by a feasibility study, including an assessment of the reduction in the amount of the rolling stock forced downtime on the station tracks. The presented block diagram of the algorithm for calculating the norms of fixing can be used in the educational process.

### Keywords

railway transport, traffic safety, operation of railway transport, calculation of the norms of fastening of rolling stock, brake shoe, block diagram

### For citation

Goncharova N.Yu., Ermolenko I.Yu., Chernyaeva T.N., Astashkov N.P. Razrabotka blok-skhemy algoritma rascheta norm zakrepleniya podvizhnogo sostava s uchedom profilya stantsionnogo puti [Development of a flow diagram for the calculation of rolling stock anchoring rates algorithm taking into account the station track profile]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 82–92. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).82-92.

### Article Info

Received: April 24, 2023; Revised: May 23, 2023; Accepted: May 24, 2023.

### Введение

Разработка средств механизации и автоматизации технологических процессов на сегодняшний день является приоритетным направлением развития ОАО «РЖД» [1–3]. Однако применение тормозных башмаков обусловлено тем, что переход к повсеместному использованию стационарных устройств для закрепления подвижного состава не может быть реализован в кратчайшие сроки. Руководствуясь изложенным следует заключить, что разработка алгоритмов, направленных на исключение ошибочных действий эксплуатационного персонала, является актуальной задачей [4–6]. Обеспечение надежного закрепления подвижного состава для предотвращения его самопроизвольного выхода со станционных путей – важный вопрос обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте [7, 8]. Поставленная задача осложняется тем, что первоначальное проектирование продольного профиля определенных станций выполнялось для условий использования в эксплуатации вагонов подшипников скольжения [9, 10].

Наличие предохранительных тупиков, сбрасывающих башмаков и стрелок, охранных стрелок, стрелочных сбрасывающих остряков как дополнительных средств обеспечения безопасности, подчеркивает актуальность представленной тематики. Кроме того, станционные операции по закреплению поездов и групп ваго-

нов характеризуются продолжительностью этого процесса либо его снятия, что является важным эксплуатационным показателем, отражающимся величиной простоя [11].

### Обзор существующих устройств и средств закрепления железнодорожного подвижного состава

Следует отметить, что известные устройства и средства закрепления подвижного состава можно разделить на три группы: тормозные башмаки и упоры; стационарные устройства; специальный трехэлементный профиль станционного пути.

Представленные устройства и средства обладают огромным перечнем достоинств. Однако первая группа устройств определяет необходимость применения ручного труда. Возможность переноса в одной руке двух и более тормозных башмаков определяет целесообразность разработки конструктивных решений, позволяющих их надежно соединять между собой. Кроме того, реализация поставленной задачи подчеркивает актуальность уменьшения веса тормозных башмаков.

Основные мероприятия, направленные на совершенствование тормозных башмаков, ориентированы на решение следующих задач:

– разработка универсального конструктивного устройства, которое можно использо-

вать не только в статическом, но и динамическом режиме;

- разработка облегченного варианта, параметры тормозного усилия которого будут сопоставимы с существующим;

- реализация вариантов надежного крепления ручки к башмаку.

Слабая профессиональная подготовка, нарушение технологии производства работ, невнимательность и утомляемость, неучет определенных условий, требующих использования дополнительных коэффициентов в формулах для расчета норм закрепления, в полной степени отражают человеческий фактор, что доказывает наличие статистики самопроизвольного ухода подвижного состава по вине работников компании. Кроме того, существует статистика случаев схода по причине неизъятия тормозных башмаков.

В отличие от башмака тормозной упор имеет преимущество во времени закрепления, либо его снятия, ведь не требует переноса. В рамках представленной статьи рассмотрен тормозной упор УЗ-220, использование которого ограничено и возможно на следующих путях: тупиковые пути станций; железнодорожные пути необщего пользования промышленных предприятий и организаций; повышенные пути грузовых дворов; пути, переданных в ведение смежных служб [12].

Исключение или сведение к минимуму использования человеческого труда при закреплении подвижного состава реализовано во второй и третьей группе.

Ко второй группе перечисленных устройств относятся упоры тормозные стационарные (УТС) и устройства закрепления составов (УЗС). Выбор типа устройства производится на основе анализа местных условий работы станции (вес закрепляемых составов, уклон путей, тип верхнего строения пути и т.д.) и технико-экономических расчетов [13].

Следует отметить, что используемый в настоящее время упор УТС-380 в зависимости от массы поезда может применяться как самостоятельно, так и с тормозными башмаками, что облегчило труд работников, однако полностью его не устранило. Данное средство механизации представляет собой устройство точечного типа, которое с помощью электропривода и системы рычагов устанавливает упоры на оба рельса под колеса вагона [14].

Для станций, уклоны путей которых не превышают 2 ‰, разработан одиночный вариант упора УТС(1)-380. Подобную конструкцию имеет упор УТС-1-160, однако меньшая высота и установка только на один рельс обуславливает закрепление только пассажирских составов.

В рамках представленной статьи рассмотрен пружинный упор УТСП-380, пружины в конструкции которого позволяют уменьшить силу удара колеса по колодке при закреплении подвижного состава.

Необходимость присутствия сигналиста в непосредственной близости от упора является основным недостатком рассмотренных стационарных тормозных упоров. Возможность дистанционного контроля и управления тормозным упором подразумевает использование сложной аппаратуры, что увеличивает эксплуатационные затраты, связанные с содержанием устройства.

Одним из альтернативных устройств механизированного закрепления подвижного состава является УЗС 86Р, которое в сопоставлении с УТС-380 имеет большее удерживающее усилие, однако уступает в таких характеристиках, как масса конструкции, расход электроэнергии на закрепление, трудозатраты на обслуживание и монтаж.

Оценка характеристик, рассмотренных в рамках статьи устройств механизированного закрепления обуславливает определение возможности и целесообразности их использования для конкретной рассматриваемой станции с учетом объема ее работы.

### Этапы разработки блок-схемы алгоритма расчета норм закрепления подвижного состава

В рамках представленной статьи предложено рассмотреть нормы и основные правила закрепления железнодорожного подвижного состава в виде блок-схем, каждая из которых позволит учесть все критерии и ограничения.

В работе [15] представлена блок-схема алгоритма расчета норм закрепления поездов, исходными данными которой являются следующие показатели и условия:

- тара  $k$ -го вагона закрепляемого поезда  $q_k^{\text{тар}}$ ;
- масса груза в вагоне закрепляемого поезда  $q_k^{\text{гр}}$ ;

– количество осей  $k$ -го вагона, закрепляемого поезда  $n_k$ ;  
 – скорость ветра  $V_B$  и угол его направления  $\varphi$ .

Основным отличием разработанной блок-схемы является акцент на крутизну приведенного профиля станционных путей.

Руководствуясь порядком закрепления железнодорожного подвижного состава, представленном в инструкции по организации движения поездов и маневровой работе на железнодорожном транспорте России [16], следует предусматривать:

1. На горизонтальных железнодорожных путях и железнодорожных путях с уклонами  $i \in (0; 0,5]$  ‰:

– для закрепления любого количества вагонов с обеих сторон по одному тормозному башмаку;

– приведение в действие стояночного тормоза одного вагона (локомотива) в любой части сцепленной группы (рис. 1).

2. Если уклон  $i \in (0,5; 1]$  ‰, то помимо общеизвестных формул (1) и (2) необходимо дополнительно закрепить вагоны одним тормозным башмаком со стороны, противоположной спуску:

$$K = \frac{n \cdot (1,5i + 1)}{200}, \quad (1)$$

$$K = \frac{n \cdot (4i + 1)}{200}, \quad (2)$$

где  $K$  – необходимое количество башмаков, шт.;  $n$  – количество осей в составе (группе), шт.;  $i$  – средняя величина уклона пути или отрезка железнодорожного пути, в тысячных долях (рис. 2) [16].

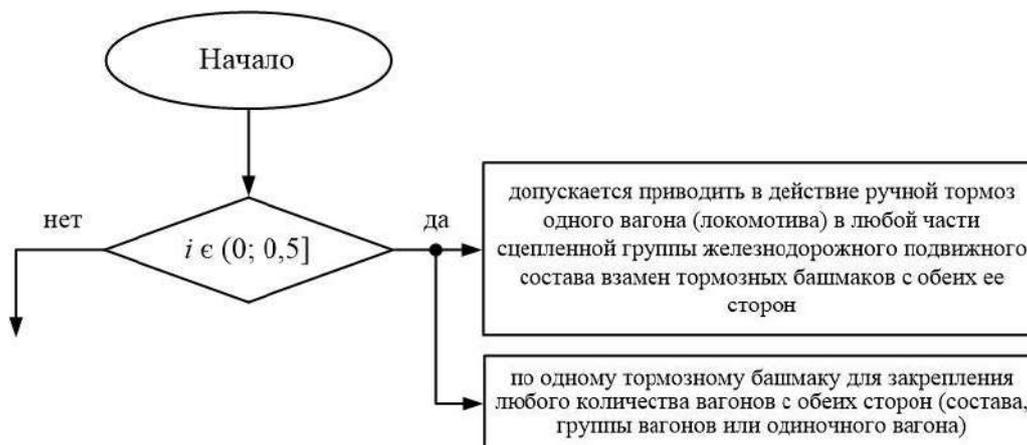
3. Если уклон  $i \in (1; 2,5]$  ‰, то со стороны, противоположной спуску, укладка тормозных башмаков не требуется (рис. 3).

4. Если уклон  $i > 2,5$  ‰, то осуществление закрепления возможно, если для маршрутов следования поездов со стороны спуска выполняются следующие условия:

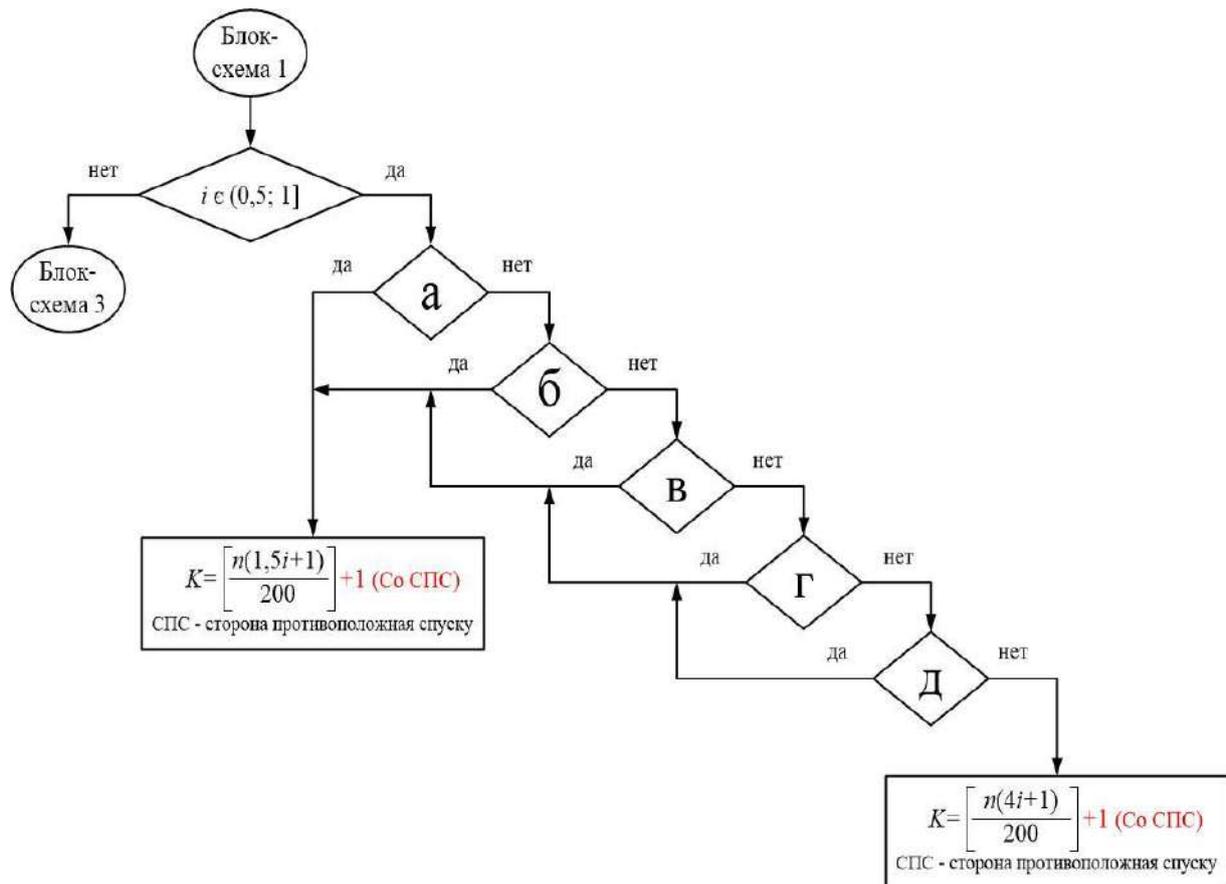
– ограждение от закрепляемого состава предохранительным устройством (1) или стационарным устройством закрепления (2);

– закрепляемый состав изолирован взаимным расположением железнодорожных путей и стрелок (3) (рис. 4).

По представленным блок-схемам можно сделать вывод, что ориентироваться только на профиль станционного пути нецелесообразно, ведь замасленные поверхности рельсов и ветер, направление которого совпадает с направлением возможного самопроизвольного движения железнодорожного подвижного состава, влияют на расчет потребного количества тормозных башмаков. Данные факторы учтены в обобщенной блок-схеме алгоритма расчета норм закрепления подвижного состава (рис. 5).



**Рис. 1.** Первая блок-схема алгоритма расчета норм закрепления подвижного состава на горизонтальных железнодорожных путях и железнодорожных путях с уклонами  $i \in (0; 0,5]$  ‰  
**Fig. 1.** The first block diagram of the calculation algorithm for the norms for securing rolling stock on horizontal railway tracks and tracks with slopes  $i \in (0; 0,5]$  ‰



**Рис. 2.** Вторая блок-схема алгоритма расчета норм закрепления подвижного состава на железнодорожных путях с уклонами  $i \in (0,5; 1]$  ‰:

*a* – одиночные вагоны; *б* – плотки локомотивов в недействующем состоянии;  
*в* – рефрижераторные вагоны (в группе (секции) все вагоны груженные или все порожние (в том числе порожняя секция с машинным отделением)); *г* – составы или группы вагонов, состоящие из однородного по массе (брутто) железнодорожного подвижного состава: грузовых груженных или порожних вагонов независимо от их рода, пассажирских вагонов, мотор-вагонного подвижного состава; *д* – смешанные (разнородные по весу) составы или группы вагонов, состоящие из груженных и порожних вагонов или груженных вагонов различной массы, при условии, что тормозные башмаки укладываются под вагоны с нагрузкой на ось не менее 15 т (брутто), а при отсутствии таких вагонов – под вагоны с меньшей нагрузкой на ось, но максимальной для закрепляемой группы

**Fig. 2.** The second block diagram of the algorithm for calculating the norms for fixing the rolling stock on railway tracks with slopes  $i \in (0.5; 1]$  ‰:

*a* – single wagons; *b* – rafts of locomotives in a non-operating state; *c* – refrigerated wagons (in a group (section) all loaded wagons or all empty wagons (including an empty section with engine branch)); *d* – trains or groups of wagons, consisting of homogeneous mass (gross) railway rolling stock: freight loaded or empty wagons, regardless of their type, passenger wagons, motor-wagon rolling stock; *e* – mixed (dissimilar in weight) compositions or groups of wagons consisting of laden and empty wagons or laden wagons of various weights, provided that brake shoes are placed under wagons with an axle load of at least 15 tons (gross), and in the absence of such wagons – for wagons with a lower axle load, but the maximum for the assigned group

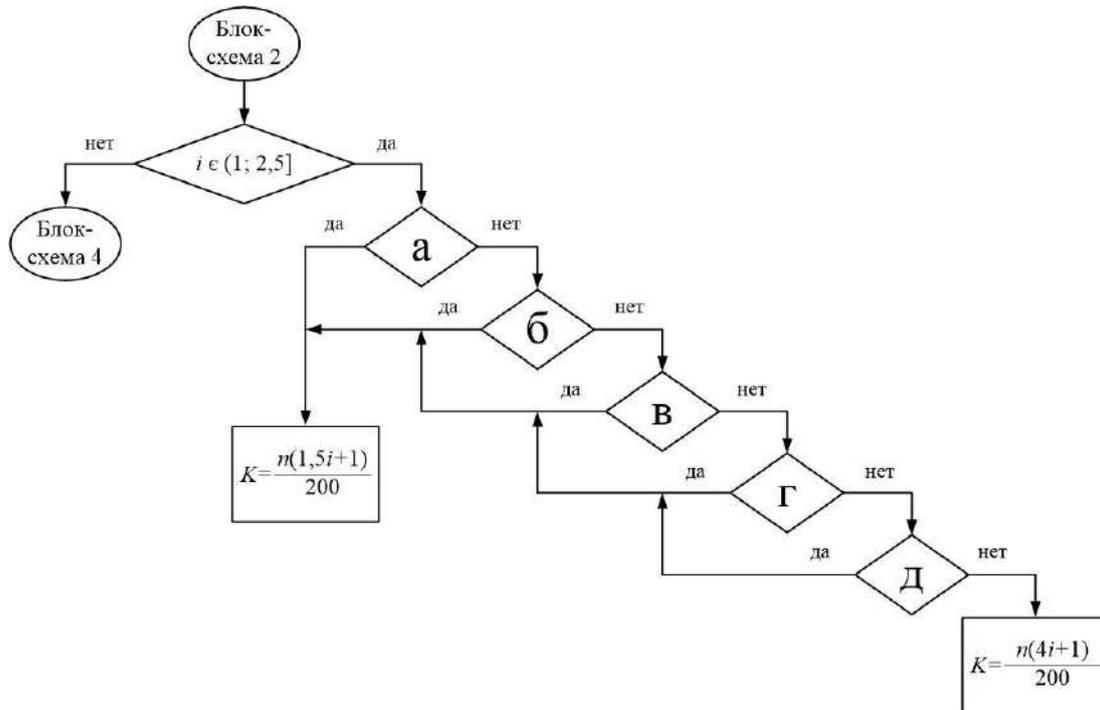


Рис. 3. Третья блок-схема алгоритма расчета норм закрепления подвижного состава на железнодорожных путях с уклонами  $i \in (1; 2,5] \%$

Fig. 3. The third block diagram of the algorithm for calculating the norms for fixing rolling stock on railway tracks with slopes  $i \in (1; 2,5] \%$

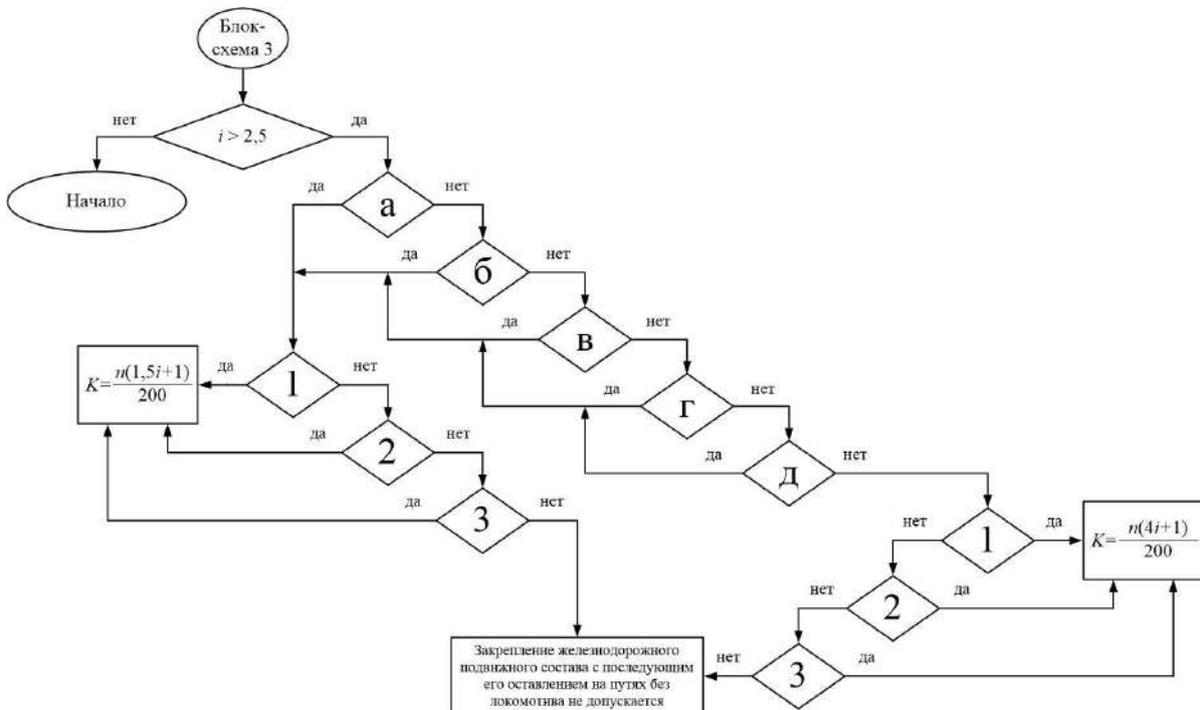
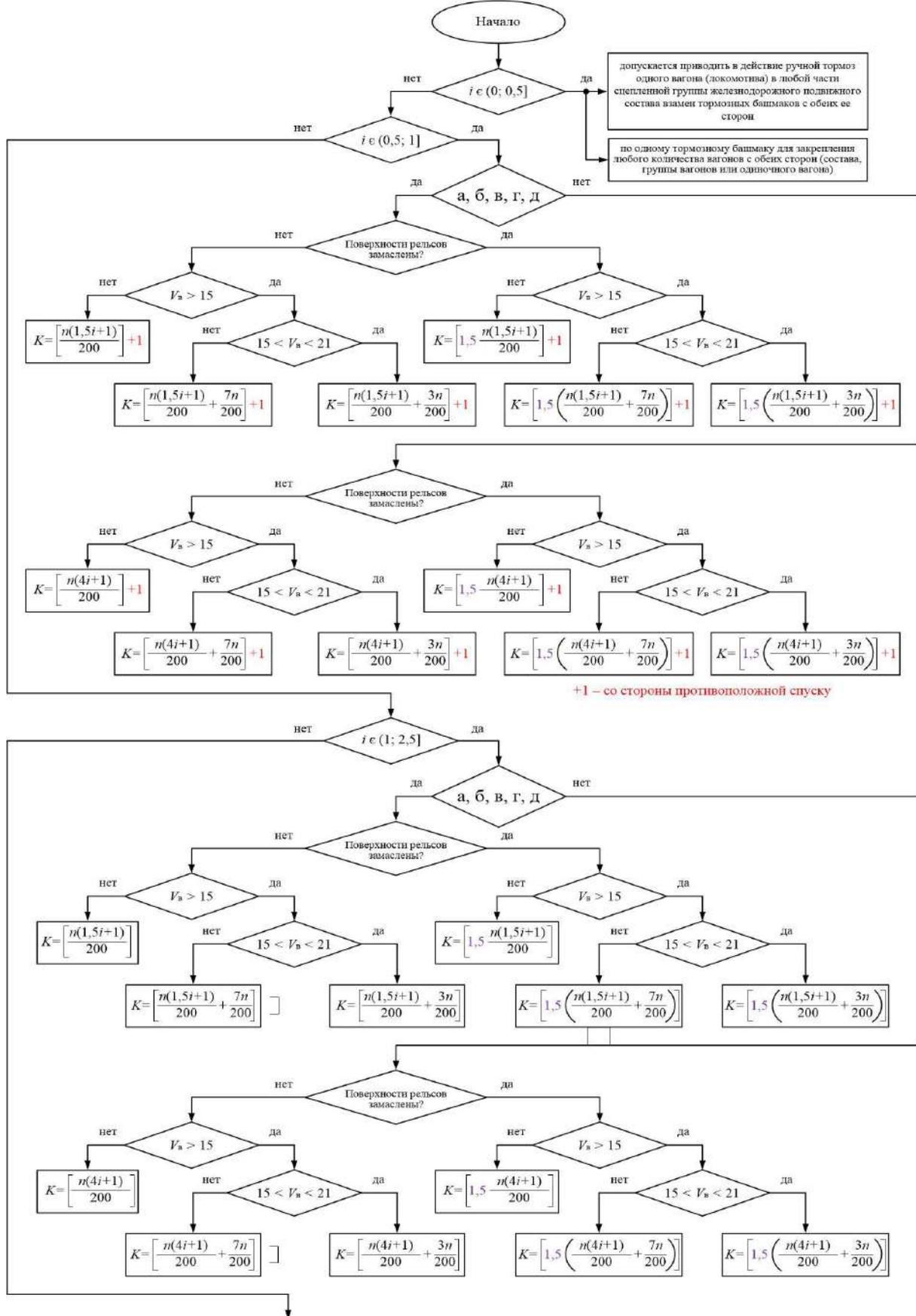


Рис. 4. Четвертая блок-схема алгоритма расчета норм закрепления подвижного состава на железнодорожных путях с уклонами  $i > 2,5 \%$

Fig. 4. The fourth block diagram of the algorithm for calculating the norms for securing rolling stock on railway tracks with slopes  $i > 2.5 \%$



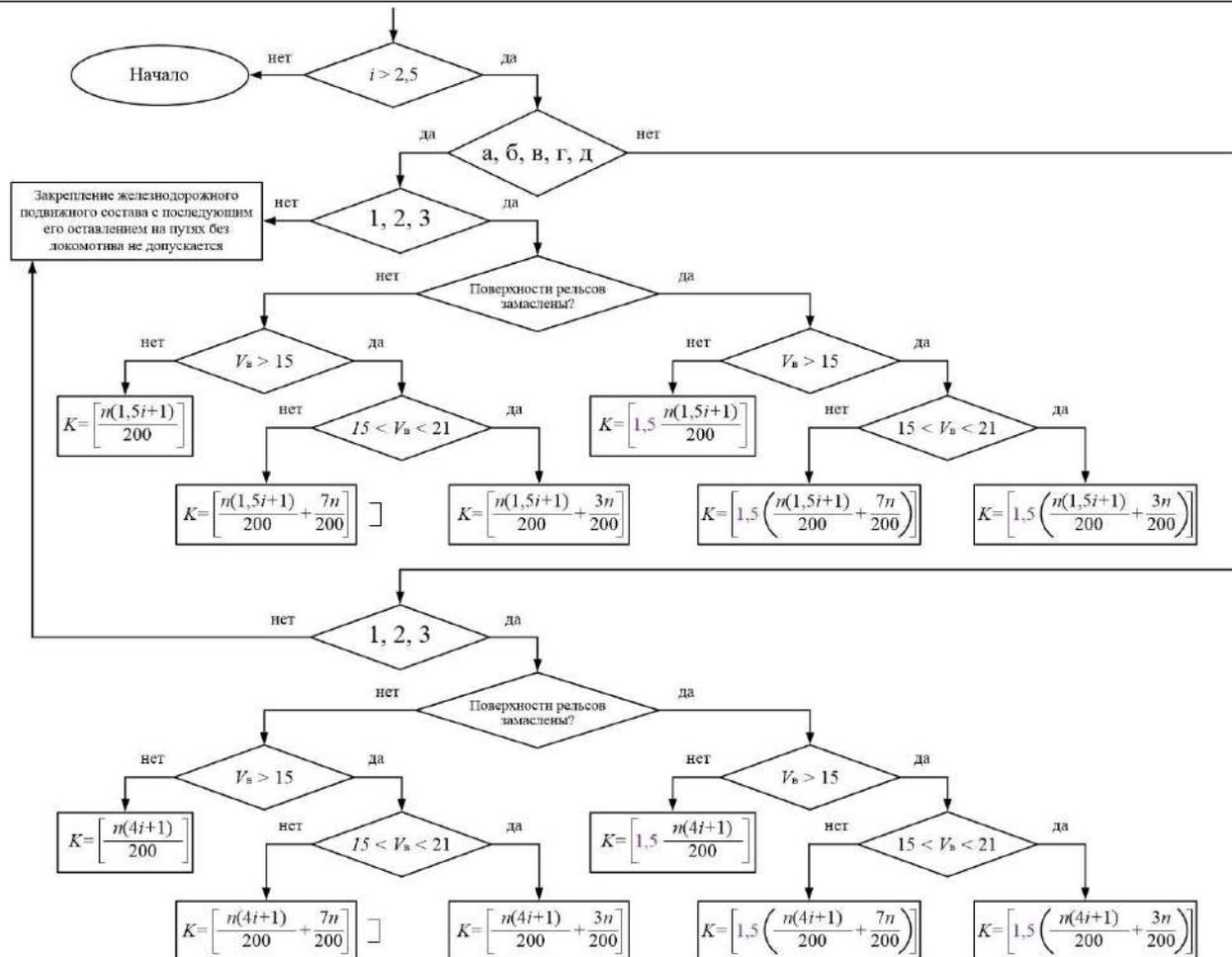


Рис. 5. Общая блок-схема алгоритма расчета норм закрепления подвижного состава  
 Fig. 5. General block diagram of the algorithm for calculating the norms for securing rolling stock

### Заключение

Нарушение минимальных норм закрепления при укладке недостаточного количества тормозных башмаков может привести к несанкционированному движению подвижного состава. Неверная трактовка общеизвестных формул и использование тормозных башмаков сверх нормы приведут к увеличению времени, необходимого для выполнения операций закрепления (снятия закрепления), простою вагонов и локомотивов.

Внедрение новых подходов к обучению за счет различных способов подачи материала

направлено на развитие профессиональных знаний студентов и работников компании [17–19].

Представленная в рамках статьи блок-схема позволит повысить безопасность за счет представления работникам порядка закрепления железнодорожного подвижного состава не только в тестовом виде, но и в виде алгоритма, что исключит сложности в трактовке отдельных пунктов инструкции.

### Список литературы

1. Белоголов Ю.И., Стецова Ю.М., Оленевич А.А. Использование методов математического моделирования при управлении транспортными процессами на железной дороге // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы девятой Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2018. Т. 1. С. 145–148.
2. Гозбенко В.Е., Громышова С.С., Белоголов Ю.И. Анализ и исследование факторов, влияющих на безопасность движения // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития: сб. материалов XIII Междунар. науч.-практ. конф. Чебоксары, 2019. С. 149–155.

3. Громышова С.С., Белоголов Ю.И., Оленцевич В.А. Автоматизация процесса взаимодействия транспортно-технических средств и устройств, как один из способов повышения уровня безопасности функционирования ЖДТС // Наука сегодня: проблемы и пути решения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Вологда, 2019. С. 18–19.
4. Носков С.И., Оленцевич В.А., Базилевский М.П. Математическая модель оценки безопасности перевозочного процесса на региональном уровне // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы пятой Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2014. Т. 1. С. 537–542.
5. Асалханова Т.Н., Колисниченко Е.А. Цифровые технологии в путевом хозяйстве // Образование - Наука - Производство : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. Чита, 2020. Т. 1. С. 80–84.
6. Асалханова Т.Н., Осколков А.А. Организация транспортного производства путевых работ с учетом информационного моделирования // Транспорт Урала. 2021. № 3 (70). С. 65–67.
7. Козаченко Д.Н., Пасичный А.Н., Иващенко Е.В. Усовершенствование норм закрепления подвижного состава на станционных путях // Сб. науч. тр. Донецк. ин-та ж.-д. трансп. 2013. № 34. С. 119–125.
8. Ташлыкова А.И., Несветова Е.А. Основные проблемы обеспечения надежного закрепления подвижного состава на станционных путях // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : тр. Всерос. науч.-практ. конф. творческ. молодежи с междунар. участ. Хабаровск, 2016. Т. 1. С. 226–229.
9. Ермоленко И.Ю., Морозов Д.В., Асташков Н.П. Влияние продольных нагрузок на безопасность движения при эксплуатации на горно-перевальных участках пути // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2021. № 2 (82). С. 104–111.
10. Анализ направлений совершенствования буксового узла / Е.А. Логинова, А.Н. Власова, И.Ю. Ермоленко и др. // Совершенствование методологии и организации научных исследований в целях развития общества : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2020. Ч. 2. С. 168–171.
11. Ильин А.М., Числов О.Н. Развитие автоматизированной методики расчета норм закрепления подвижного состава на станционных железнодорожных путях // Транспорт и логистика: инновационная инфраструктура, интеллектуальные и ресурсосберегающие технологии, экономика и управление : сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2018. С. 247–251.
12. Гуд Ю.О., Вязьмин И.С., Асташков Н.П. Совершенствование качества организации производственных систем железнодорожного транспорта путем внедрения эффективных средств механизации // Молодая наука Сибири. 2021. № 3 (13). С. 101–108. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/831>. (Дата обращения 02.03.2023).
13. Власова Н.В., Оленцевич В.А. Совершенствование качества организации производственных систем железнодорожного транспорта путем внедрения эффективных средств механизации // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы восьмой Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск. 2017. Т. 1. С. 106–109.
14. Малыгин Е.А. Технические средства и технологии безопасности транспортного процесса (курс лекций). Ч. 2. Екатеринбург : УрГУПС, 2012. 213 с.
15. Похилко С.П., Иванченко И.С. Автоматизация методики расчета норм закрепления подвижного состава на станционных путях // Сб. науч. тр. Донецк. ин-та ж.-д. трансп. 2020. № 59. С. 27–38.
16. Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : приказ Минтранса России от 23.06.2022 № 250 // Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локал. сети.
17. Алексеева Т.Л., Рябченко Н.Л., Астраханцев Л.А. Совершенствование содержания образовательного процесса в учебных учреждениях // Современные проблемы профессионального образования: опыт и пути решения : материалы первой Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Иркутск, 2016. С. 44–48.
18. Рябченко Н.Л., Алексеева Т.Л., Астраханцев Л.А. Новые возможности повышения эффективности образовательного процесса в учебных заведениях высшего образования // Современные проблемы профессионального образования: опыт и пути решения : материалы третьей Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. Иркутск, 2018. С. 837–842.
19. Асалханова Т.Н. Альтернативные методы подготовки обучающихся инженерных специальностей // Проблемы и пути развития профессионального образования : сб. ст. Всерос. науч.-метод. конф. Иркутск, 2021. С. 33–37.

## References

1. Belogolov Yu.I., Stetsova Yu.M., Olentsevich A.A. Ispol'zovanie metodov matematicheskogo modelirovaniya pri upravlenii transportnymi protsessami na zheleznoi dorozhe [The use of mathematical modeling methods in the management of transport processes on the railway]. *Materialy devyatoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the 9th International Scientific-Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2018, vol. 1, pp. 145–148.
2. Gozbenko V.E., Gromyshova S.S., Belogolov Yu.I. Analiz i issledovanie faktorov, vliyayushchikh na bezopasnost' dvizheniya [Analysis and study of factors affecting traffic safety]. *Sbornik materialov XIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka, obrazovanie, obshchestvo: tendentsii i perspektivy razvitiya»* [Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference «Science, education, society: trends and development prospects»]. Cheboksary, 2019, pp. 149–155.
3. Gromyshova S.S., Belogolov Yu.I., Olentsevich V.A. Avtomatizatsiya protsessa vzaimodeystviya transportno-tekhnicheskikh sredstv i ustroystv, kak odin iz sposobov povysheniya urovnya bezopasnosti funktsionirovaniya ZHDTS [Automation of the process of interaction of transport and technical means and devices, as one of the ways to increase the safety level of the functioning of railway transport]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka segodnya: problema i puti resheniya»* [Proceedings of the International Scientific and Practical conference «Science today: problems and solutions»]. Vologda, 2019, pp. 18–19.

4. Noskov S.I., Olentsevich V.A., Bazilevskii M.P. Matematicheskaya model' otsenki bezopasnosti perevozchnogo protsessa na regional'nom urovne [Mathematical model of transportation process safety assessment at the regional level]. *Materialy pyatoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2014, vol. 1, pp. 537–542.

5. Asalkhanova T.N., Kolisnichenko E.A. Tsifrovye tekhnologii v putevom khozyaistve [Digital technologies in track facilities]. *Materialy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie – Nauka – Proizvodstvo»* [Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference «Education – Science – Production»]. Chita, 2020, vol. 1, pp. 80–84.

6. Asalkhanova T.N., Oskolkov A.A. Organizatsiya transportnogo proizvodstva putevykh rabot s uchedom informatsionnogo modelirovaniya [Organization of transport production of track works, taking into account information modeling]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2021, no. 3 (70), pp. 65–67.

7. Kozachenko D.N., Pasichnyy A.N., Ivashchenko E.V. Usovshenstvovaniye norm zakrepleniya podvizhnogo sostava na stantsionnykh putyakh [Improving the norms for securing rolling stock on station tracks]. *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Proceedings of the Donetsk Institute of Railway Transport], 2013, no. 34, pp. 119–125.

8. Tashlykova A.I., Nesvetova E.A. Osnovnye problemy obespecheniya nadezhnogo zakrepleniya podvizhnogo sostava na stantsionnykh putyakh [The main problems of ensuring reliable fastening of the rolling stock on the station tracks]. *Trudy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii tvorcheskoi molodezhi s mezhdunarodnym uchastiem «Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Creative Youth with International participation «Scientific, technical and economic cooperation of the countries of the Asian-Pacific region in the 21st century»]. Khabarovsk, 2016, vol. 1, pp. 226–229.

9. Ermolenko I.Yu., Morozov D.V., Astashkov N.P. Vliyaniye prodol'nykh nagruzok na bezopasnost' dvizheniya pri ekspluatatsii na gorno-pereval'nykh uchastkakh puti [Influence of longitudinal loads on traffic safety during operation on mountain pass sections of the track]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2021, no. 2 (82), pp. 104–111.

10. Loginova E.A., Vlasova A.N., Ermolenko I.Yu., Astashkov N.P. Analiz napravlenii sovershenstvovaniya buksovogo uzla [Analysis of directions for improving the axle box assembly]. *Sbornik statei po itogam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovershenstvovanie metodologii i organizatsii nauchnykh issledovaniy v tselyakh razvitiya obshchestva»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Improving the methodology and organization of scientific research for the development of society»]. Novosibirsk, 2020, part 2, pp. 168–171.

11. Il'in A.M., Chislov O.N. Razvitiye avtomatizirovannoi metodiki rashcheta norm zakrepleniya podvizhnogo sostava na stantsionnykh zheleznodorozhnykh putyakh [Development of an automated method for calculating the norms for securing rolling stock on station railway tracks]. *Sbornik nauchnykh trudov II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport i logistika: innovatsionnaya infrastruktura, intellektual'nye i resursoberegayushchie tekhnologii, ekonomika i upravleniye»* [Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference «Transport and logistics: innovative infrastructure, intelligent and resource-saving technologies, economics and management»]. Rostov-on-Don, 2018, pp. 247–251.

12. Gud Yu.O., Vyaz'min I.S., Astashkov N.P. Sovershenstvovanie ekspluatatsionnoi raboty zheleznodorozhnoi stantsii putem vnedreniya kompleksa tekhnicheskikh sredstv avtomatizirovannogo zakrepleniya sostavov [Improving the operational work of a railway station by introducing a set of technical means for automated fixing of trains]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia], 2021, no. 3 (13), pp. 101–108.

13. Vlasova N.V., Olentsevich V.A. Sovershenstvovanie kachestva organizatsii proizvodstvennykh sistem zheleznodorozhnogo transporta putem vnedreniya effektivnykh sredstv mekhanizatsii [Improving the quality of the organization of production systems of railway transport by introducing effective means of mechanization]. *Materialy vos'moi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2017, vol. 1, pp. 106–109.

14. Malygin E.A. Tekhnicheskie sredstva i tekhnologii bezopasnosti transportnogo protsessa (kurs lektsii). Ch.2. [Technical means and technologies for the safety of the transport process (lecture course). P.2]. Ekaterinburg: UrGUPS Publ., 2012. 213 p.

15. Pokhilko S.P., Ivanchenko I.S. Avtomaticheskie metodiki rashcheta norm zakrepleniya podvizhnogo sostava na stantsionnykh putyakh [Automatic methods for calculating the norms for securing rolling stock on station tracks]. *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Proceedings of the Donetsk Institute of Railway Transport], 2020, no. 59, pp. 27–38.

16. Priказ Mintransa Rossii ot 23.06.2022 № 250 «Ob utverzhdenii Pravil tekhnicheskoi ekspluatatsii zheleznnykh dorog Rossiiskoi Federatsii» [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No 250 dated June 23, 2022 «On approval of the Rules of Technical Operation of Railways of the Russian Federation»].

17. Alekseeva T.L., Ryabchenok N.L., Astrakhantsev L.A. Sovershenstvovanie soderzhaniya obrazovatel'nogo protsessa v uchebnykh uchrezhdeniyakh [Improving the content of the educational process in educational institutions]. *Materialy pervoi Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Sovremennyye problemy professional'nogo obrazovaniya: opyt i puti resheniya»* [Proceedings of the first All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation «Modern problems of vocational education: experience and solutions»]. Irkutsk, 2016, pp. 44–48.

18. Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantsev L.A. Novyye vozmozhnosti povysheniya effektivnosti obrazovatel'nogo protsessa v uchebnykh zavedeniyyakh vysshego obrazovaniya [New Opportunities for Improving the Efficiency of the Educational Process in Higher Education Institutions]. *Materialy tret'ei Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Sovremennyye problemy professional'nogo obrazovaniya: opyt i puti resheniya»* [Proceedings of the third All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation «Modern problems of vocational education: experience and solutions»]. Irkutsk, 2018, pp. 837–842.

19. Asalkhanova T.N. Al'ternativnye metody podgotovki obuchayushchikhsya inzhenernykh spetsial'nostei [Alternative methods of training engineering students]. *Sbornik statei Vserossiyskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii «Problemy i puti razvitiya professional'nogo obrazovaniya»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Methodological Conference «Problems and ways of development of professional education»]. Irkutsk, 2021, pp. 33–37.

#### Информация об авторах

**Гончарова Наталья Юрьевна**, кандидат педагогических наук, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: gonnataly@mail.ru.

**Ермоленко Игорь Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: ermolenko\_iy@list.ru.

**Черняева Татьяна Николаевна**, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: chetn2021@yandex.ru.

**Асташков Николай Павлович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: astashkovnp@yandex.ru.

#### Information about the authors

**Natal'ya Yu. Goncharova**, Ph.D. in Pedagogical Science, Associate Professor of the Department of Operational Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: gonnataly@mail.ru.

**Igor' Yu. Ermolenko**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Wagons and Wagons Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: ermolenko\_iy@list.ru.

**Tat'yana N Chernyaeva**, Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: chetn2021@yandex.ru.

**Nikolai P. Astashkov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operational Work Management, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: astashkovnp@yandex.ru.

## Оценка эффективности применения шпал рельсовой колеи 1526 мм в кривых малых радиусов

Д.А. Ковенькин<sup>1</sup>✉, Р.И. Живин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Восточно-Сибирская дирекция инфраструктуры, г. Иркутск, Российская Федерация

✉kovenkin\_da@irgups.ru

### Резюме

В работе рассматриваются вопросы, связанные с эксплуатацией железобетонных шпал разных типоразмеров в кривых малых радиусов. Анализ проводился для участков пути с высокой грузонапряженностью. Оценивалась эффективность содержания шпал на рельсовой колее 1 520, 1 526 и 1 530 мм. Для этого было выбрано три участка, схожих по плану и профилю пути и имеющих примерно одинаковые условия эксплуатации по грузонапряженности. С целью выявления того, какие шпалы обладают более высокой эффективностью, был проведен анализ изменения ширины рельсовой колеи и бокового износа рельсов на экспериментальных участках с момента укладки рельсовой плети до момента ее смены. Выполнен расчет силового воздействия от подвижного состава на путь с учетом фактических скоростей движения. Расчет проводился в программном комплексе «Универсальный механизм». По результатам проведенных исследований можно сказать, что шпалы с типоразмером рельсовой колеи 1 526 мм являются более эффективными по сравнению с другими. Использование шпал типоразмера 1 520 мм в кривых малых радиусов приводит к сужению рельсовой колеи в начальный период эксплуатации, а применение шпал типоразмера 1 530 мм – к уширению колеи после нескольких месяцев содержания. Укладка шпал типоразмера 1 526 мм в кривых малых радиусов не противоречит правилам технической эксплуатации и обеспечивает стабильность содержания колеи на протяжении всего жизненного цикла рельсовой плети.

### Ключевые слова

шпалы, рельсовая колея, износ, кривые малых радиусов, типоразмер шпал

### Для цитирования

Ковенькин Д.А. Оценка эффективности применения шпал рельсовой колеи 1 526 мм в кривых малых радиусов / Д.А. Ковенькин, Р.И. Живин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78).С. 93–104. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).93-104.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 18.05.2023 г.; поступила после рецензирования: 02.06.2023 г.; принята к публикации: 05.06.2023 г.

## Assessment of the efficiency of 1 526 mm rail gauge sleepers in curves of small radii

D.A. Koven'kin<sup>1</sup>✉, R.I. Zhivin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>East Siberian Directorate of Infrastructure, Irkutsk, the Russian Federation

✉kovenkin\_da@irgups.ru

### Abstract

The paper considers issues related to the operation of reinforced concrete sleepers of different types and sizes in curves of small radii. The analysis was carried out for the track sections with a high load. The efficiency of the maintenance of sleepers on the rail gauge of 1 520, 1 530 and 1 526 mm was assessed. To this end, three sections were selected with approximately the same operating conditions in terms of load, plan and track profile. To identify which sleepers are the most effective in use, an analysis of the change in the width of the rail track and the lateral wear of the rails in the experimental sections from the moment of laying the rail lash to the moment of its replacement was carried out. The calculation of the force effect from the rolling stock upon the track was carried out, taking into account the actual speeds of movement. The calculation was performed in the «Universal Mechanism» software package. Based on the conducted research, it can be stated that sleepers with a standard 1 526 mm rail gauge show more efficient operation as compared to others. The use of a standard size 1 520 mm sleepers in curves of small radii results in a narrowing of the rail track in the initial period of operation. At the same time, the use of standard size 1 530 mm sleepers results in a widening of the track after several months of maintenance. The laying of the standard size 1 526 mm sleepers in curves of small radii does not contradict the norms of technical operation rules, and ensures the stability of the track content throughout the entire life cycle of the rail lash.

### Keywords

sleepers, rail track, wear, curves of small radii, standard size of sleepers

**For citation**

Koven'kin D.A., Zhivin R.I. Otsenka effektivnosti primeneniya shpal relsovoi kolei 1 526 mm v krivykh malykh radiusov [Assessment of the efficiency of 1 526 mm rail gauge sleepers in curves of small radii]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 93–104. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).93-104.

**Article info**

Received: May 18, 2023; Revised: June 2, 2023; Accepted: June 5, 2023.

**Введение**

Согласно требованиям правил технической эксплуатации (ПТЭ) все элементы железнодорожного пути по прочности, устойчивости и техническому состоянию должны обеспечивать безопасное, плавное и бесперебойное движение поездов с установленными скоростями. Одним из основных резервов роста надежности эксплуатации железнодорожного пути является обеспечение стабильности ширины рельсовой колеи.

Для качественной работы верхнего строения пути, подвижного состава и их элементов вопрос обеспечения стабильности рельсовой колеи имеет, безусловно, важное значение. Сверхнормативные отклонения ширины рельсовой колеи в сторону ее сужения являются причиной повышенного бокового износа головок рельсов и гребней колес, а также возникновения неисправностей неподрессоренных масс подвижного состава. Сверхнормативные отклонения ширины рельсовой колеи в сторону ее уширения требуют уменьшения скоростей движения поездов вплоть до его прекращения и принятия немедленных мер по устранению таких неисправностей.

Трудозатраты на выполнение путевых работ, связанных с регулировкой ширины колеи, устранением неисправностей, затрудняющих движение поездов, а также заменой преждевременно изношенных элементов верхнего строения пути, составляют существенную часть затрат на текущее содержание пути.

На Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД) бесстыковой путь на железобетонных шпалах начал укладываться и эксплуатироваться с 1999 г. Требования ТУ-2000 ограничивали укладку бесстыкового пути прямыми и кривыми радиусами более 350 м. В кривых участках пути радиусами 300–350 м укладка бесстыкового пути допускалась при наличии технико-экономического обоснования. В кривых участках радиусами менее 300 м бесстыковой путь укладывать было нельзя. В 2008 г., с появлением шурупно-дюбельных рельсовых креплений,

на перегоне Большой Луг – Подкаменная в кривых радиусами менее 350 м была произведена укладка железобетонных шпал типа ШЗ-3Д. Применялись шпалы типоразмера 1 520 мм в нарушение требований ПТЭ, устанавливающих рельсовую колею в таких кривых, равную 1 530 мм. Причина заключалась в том, что шпал других типоразмеров на ВСЖД в то время не было. Использование шпал типоразмера 1 520 мм в кривых малых радиусов приводило к сужению рельсовой колеи и, как уже было сказано, к интенсивному износу элементов пути и подвижного состава. Только в 2012 г., с выходом новых технических условий, бесстыковой путь разрешили укладывать в кривых радиусами более 250 м. Именно в это время на Слюдянской дистанции пути ВСЖД на таких участках, согласно нормам ширины колеи, при реконструкции верхнего строения пути была произведена укладка опытных шпал типа ШЗ-ДК, рассчитанных на ширину колеи 1 530 мм. Однако после нескольких месяцев эксплуатации ширина колеи стала превышать значение 1 540 мм. Боковой износ рельсов при этом составил 5–7 мм, т. е. всего 1–3 мм не хватило до предельно допустимой ширины колеи – 1 548 мм [1, 2]. Теперь уже встал вопрос о целесообразности применения шпал ШЗ-ДК типоразмера 1 530 мм в кривых малого радиуса в условиях высокой грузонапряженности.

Итак, как показала практика эксплуатации железобетонных шпал типоразмеров 1 520 и 1 530 мм в кривых малых радиусов на особо грузонапряженных участках, ни один из этих типов шпал не обеспечивал надежности работы пути.

С целью минимизации затрат на текущее содержание кривых малого радиуса горно-перевального участка и в соответствии с проектом бережливого производства, утвержденного в Слюдянской дистанции пути, при всех капитальных видах ремонтов в кривые менее 350 м с 2016 г. производится укладка шпал с нормой зашивки 1 526 мм (ШЗ-ДК). По состоянию на 1 января 2023 г. шпалы такого типоразмера уло-

жены в 23 кривых, общей протяженностью 12,91 км. Укладка данного типа шпал в кривых малых радиусов не противоречит нормам ПТЭ, так как ширина колеи находится в допустимых пределах. Кроме того, при норме зашивки ширины рельсовой колеи 1 526 мм и боковом износе рельсов от 15 до 18 мм уширение рельсовой колеи составит 1 545 мм (вторая степень в соответствии с «Инструкцией по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов», утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 28 февраля 2020 г. № 436/р, до 1 544 мм в кривых радиусом 300–350 м и до 1 545 мм в кривых радиусом менее 300 м), что позволяет осуществлять пропуск поездов с установленной скоростью [3].

Исследованию вопросов повышения стабильности ширины рельсовой колеи посвящены работы В.Г. Альбрехта [4], Д.В. Величко [5, 6], М.Ф. Вериго [7], О.П. Ершкова [8, 9], А.Я. Когана [10, 11]. Однако решены еще далеко не все вопросы обеспечения надежности связей рельсов со шпалами.

Исходя из изложенного основная цель данной работы заключается в исследовании

возможности повышения стабильности ширины рельсовой колеи в кривых малых радиусов на участках с высокой грузонапряженностью. Для достижения этой цели в работе решаются следующие задачи:

- исследуются и определяются величины и характер направляющих сил;
- оценивается эффективность применения шпал типоразмеров 1 520, 1 526 и 1 530 мм на экспериментальных участках.

### Характеристика экспериментальных участков

Слюдянская дистанция пути расположена на южной оконечности озера Байкал.

Дистанция обслуживает один из сложнейших на сети дорог горно-перевальный участок от ст. Большой Луг (5 222 км) до ст. Слюдянка I (5 310 км). От начала движения по перевалу поезда уже через 30 км поднимаются на отметку 400 м над уровнем озера Байкал – ст. Андриановская.

Горно-перевальный участок имеет следующие характеристики. Протяжение пути с уклонами до 20 ‰, в том числе 60,13 км от 15 до 20 ‰, протяжение кривых радиусом менее 299 м

Таблица 1. Характеристика экспериментальных участков  
Table 1. Characteristics of experimental sites

Показатель Indicator	Участок Section		
	1	2	3
Километр начала Start kilometer	5 225	5 246	5 314
Метр начала Start Meter	752	215	204
Километр конца End kilometer	5 226	5 246	5 314
Метр конца End Meter	99	468	477
Длина, м Length, m	347	254	273
Радиус, м Radius, m	298	317	320
Возвышение, мм Elevation, mm	110	100	95
Уклон, ‰ Slope, ‰	подъем 6,8 climb 6,8	подъем 4,4 climb 4,4	подъем 4,2 climb 4,2
Направление кривой Direction of the curve	Левая Left	Левая Left	Левая Left
Типоразмер шпал Standard size of sleepers	1 530	1 526	1 520
Зашивка шпал, мм Sleeper track, mm	1 535	1 530	1 530

– 33,06 км, кривых радиусом 300–350 м – 86,10 км. Участок состоит из шести двухпутных перегонов. Грузонапряженность путей главного хода составляет для первого пути 64,9 млн т брутто на километр в год, а для второго – 158,4 млн т брутто, что значительно влияет на состояние пути. Установленная скорость для горно-перевального участка пассажирских и грузовых поездов – 70 и 60 км/ч соответственно.

Для анализа эффективности применения железобетонных шпал разных типоразмеров были выбраны три экспериментальных участка, характеристики которых представлены в табл. 1.

### Анализ изменения ширины рельсовой колеи

Надежность крепления рельсов к подрельсовому основанию, интенсивность износа элементов верхнего строения пути, а также интенсивность изменения рельсовой колеи в значительной степени зависят от характера взаимодействия элементов пути с элементами подвижного состава [12, 13]. Так, на исследуемых участках, доля поездов массой 6 тыс. т и более составляет 72,92 % от общего количества; массой 7 тыс. т и более 25,0 %. Средняя осевая нагрузка при этом составила 22,18 т/ось, а доля поездов с осевой нагрузкой более 23 т/ось оказалась равной 50 %. Обращение тяжеловесных поездов в

условиях горно-перевальных участков в том числе сопряжено с сосредоточением на малой длине дополнительных единиц тяги. В таких условиях эксплуатации максимальные значения горизонтальных поперечных сил в кривых участках пути могут достигать до 120 кН и более. Безусловно, осложнение условий эксплуатации отражается на стабильности железнодорожного пути и требует принятия дополнительных мер к повышению надежности его работы. Для оценки воздействия подвижного состава на путь был проведен анализ изменения ширины рельсовой колеи и бокового износа рельсов на исследуемых участках в зависимости от наработанного тоннажа. Результаты анализа представлены на рис. 1–3.

Из диаграммы (см. рис. 2) можно определить, что в начальный период на всех участках скорость изменения ширины рельсовой колеи максимальна. При достижении пропущенного тоннажа до 40–50 млн т брутто идет резкое снижение данного параметра. Тоннаж в 50 млн т брутто при грузонапряженности 158,8 млн т брутто соответствует 3,8 месяцам работы пути. После тоннажа 50 млн т брутто и вплоть до смены рельсовой плети показатель интенсивности стабилизируется и меняется незначительно. Для данного конкретного случая, при сравне-

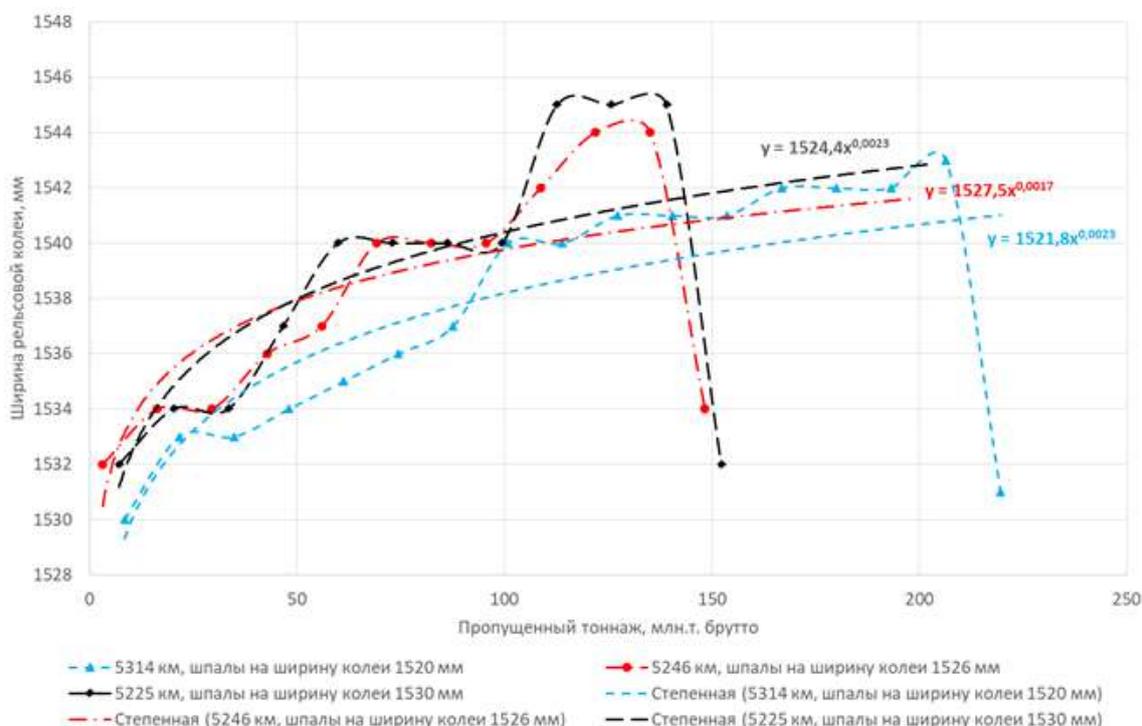


Рис. 1. Изменение ширины рельсовой колеи  
Fig. 1. Change in the width of rail gauge

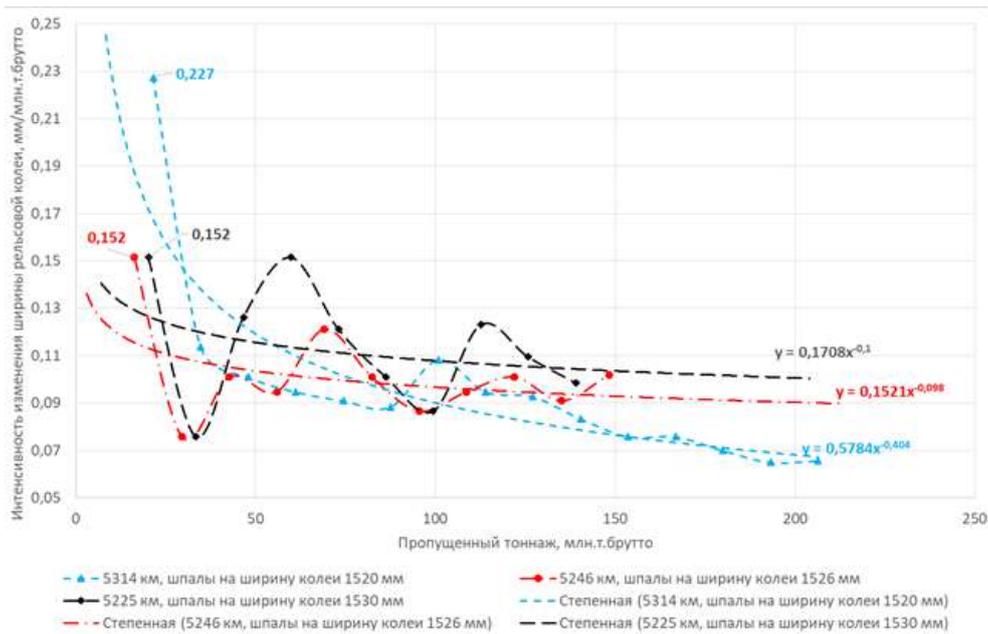


Рис. 2. Интенсивность изменения ширины рельсовой колеи  
Fig. 2. Intensity of rail gauge width change

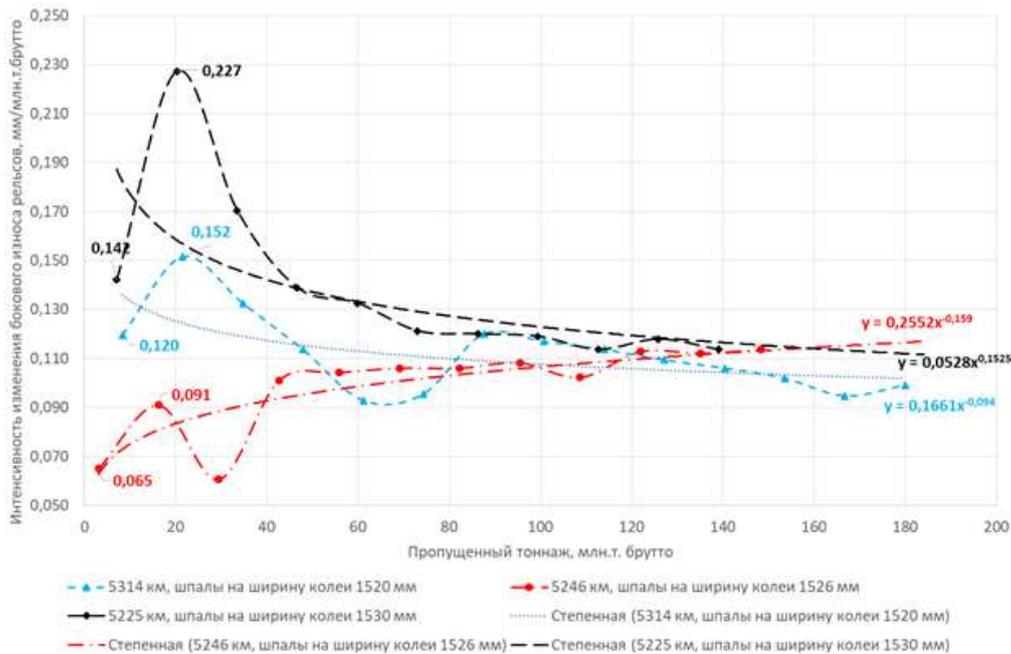


Рис. 3. Интенсивность изменения бокового износа рельсов  
Fig. 3. Intensity of change in rail lateral wear

нии изменения ширины колеи на шпалах разных типоразмеров, выявлены следующие особенности:

- для шпал на колею 1 520 мм (5 314 км) скорость уширения колеи с начала эксплуатации и до пропущенного тоннажа в 25–30 млн т brutto составляла 0,17–0,23 мм/млн т brutto;
- для шпал на колею 1 526 мм (5 246 км)

скорость уширения колеи с начала эксплуатации и до пропущенного тоннажа в 25–30 млн т brutto составляла 0,11–0,15 мм/млн т brutto;

- для шпал на колею 1 530 мм (5 225 км) скорость уширения колеи с начала эксплуатации и до пропущенного тоннажа в 25–30 млн т brutto составляла 0,12–0,15 мм/млн т brutto.

В целом получены закономерные резуль-

таты. Более высокая интенсивность изменения ширины рельсовой колеи на участке со шпалами типоразмера – 1 520 мм, объясняется более сложным механизмом вписывания подвижного состава в кривую [14–17].

Из диаграммы (см. рис. 3) можно определить, что в начальный период скорость изменения бокового износа рельсов максимальна на участках со шпалами типоразмеров 1 520 и 1 530 мм. Не совсем понятно, почему интенсивность бокового износа максимальна на участках со шпалами типоразмера 1 530 мм. На этом участке из-за возможности более свободного вписывания тележки в кривую износ рельса должен меняться медленнее. Однако в данной работе мы не учитываем другие факторы, помимо типоразмера шпал, которые могут влиять на интенсивность износа рельсов (лубликация, категория рельсов и т.п.). Кроме того, на данный показатель влияет возвышение наружного рельса, которое на участке 5 314 км меньше по сравнению с другими участками. В целом также, как и по изменению ширины колеи, после наработки тоннажа 50 млн т брутто и вплоть до смены рельсовой плети показатель интенсивности стабилизируется и меняется незначительно. При сравнении показателя изме-

нения бокового износа рельсов на шпалах разных типоразмеров выявлены следующие особенности:

– для шпал на колею 1 520 мм (5 314 км) скорость увеличения бокового износа с начала эксплуатации и до пропущенного тоннажа в 25–30 млн т брутто составляла 0,12–0,14 мм/млн т брутто;

– для шпал на колею 1 526 мм (5 246 км) скорость роста бокового износа с начала эксплуатации и до пропущенного тоннажа в 25–30 млн т брутто составляла 0,07–0,09 мм/млн т брутто;

– для шпал на колею 1 530 мм (5 225 км) скорость роста бокового износа с начала эксплуатации и до пропущенного тоннажа в 25–30 млн т брутто составляла 0,15–0,19 мм/млн т брутто.

Оценивая значения интенсивности бокового износа наружного рельса на исследуемых участках в начальный период, можно сказать, что на участке с типоразмером шпал 1 526 мм она ниже базовой интенсивности, равной 0,105–0,109 мм/млн т брутто [18]. На других участках выше базовой.

В табл. 2 приведены данные статистической обработки.

**Таблица 2.** Среднестатистические показатели интенсивности изменения ширины колеи и бокового износа  
**Table 2.** Average statistical indicators of the intensity of changes in track width and lateral wear

Показатель	Участок		
	1	2	3
Километр начала Kilometer of start	5 225	5 246	5 314
Типоразмер шпал Standard size of sleepers	1 530	1 526	1 520
Зашивка шпал, мм Sleeper track, mm	1 535	1 530	1 530
Средняя интенсивность изменения ширины колеи, мм/млн т бр. Average intensity of track width change, mm/million tons br	0,114	0,102	0,096
Среднее квадратичное отклонение Mean square deviation	0,025	0,021	0,039
Интенсивность изменения ширины колеи в начальный период, мм/млн т бр. The intensity of the change in track width in the initial period, mm / million tons br	0,12– 0,15	0,11– 0,15	0,17– 0,23
Средняя интенсивность изменения бокового износа, мм/млн т бр. Average intensity of lateral wear change, mm/million tons br	0,106	0,099	0,093
Среднее квадратичное отклонение Mean square deviation	0,030	0,018	0,057
Интенсивность изменения бокового износа в начальный период, мм/млн т бр. Intensity of lateral wear change in the initial period, mm/million tons br	0,15– 0,19	0,07– 0,09	0,12– 0,14

Опираясь на данные средних показателей из диаграмм и сведений, приведенных в табл. 2, можно определить, что изменение ширины колеи происходит в основном за счет изменения бокового износа рельсов и составляет практически 100 % на участке со шпалами типоразмера 1 530 мм (5 225 км), 60–64 % на участке со шпалами типоразмера 1 526 мм (5 246 км) и 61–70 % на участке со шпалами типоразмера 1 520 мм (5 314 км), т.е. при укладке шпал типоразмера 1 530 мм и зашивке их на колею 1 535 мм происходит выборка всех люфтов в узлах креплений. Это может привести к увеличению боковой жесткости пути и, как следствие, к росту интенсивности бокового износа рельсов. При укладке шпал типоразмера 1 520 мм и зашивке их на колею 1 530 мм возможность изменения ширины рельсовой колеи за счет отжатия рельсов и выборки зазоров узлов креплений составила 30–39 %. Если говорить о шпалах типоразмера 1 526 мм и зашивки их на колею 1 530 мм, то такой же показатель составил 36–40 %. С одной стороны, это приводит к снижению бокового

износа рельсов, с другой – к возможности увеличения интенсивности изменения рельсовой колеи. В целом можно констатировать, что в начальный период времени на участке со шпалами типоразмера 1 526 мм (5 246 км) среднестатистические показатели интенсивности изменения ширины колеи и бокового износа ниже, чем на других опытных участках. Однако рельсовая плеть на 5 314 км прослужила на пять месяцев дольше (66 млн т брутто), чем на других участках. В связи с этим возникла необходимость оценить силовое воздействие от подвижного состава на всех исследуемых участках.

### Анализ скоростемерных лент

Для оценки силового воздействия на путь учитывались следующие исходные данные:

- план и профиль пути;
- характеристика верхнего строения;
- осевая нагрузка;
- фактическая скорость движения.

Для определения фактической скорости движения подвижного состава проводился ана-

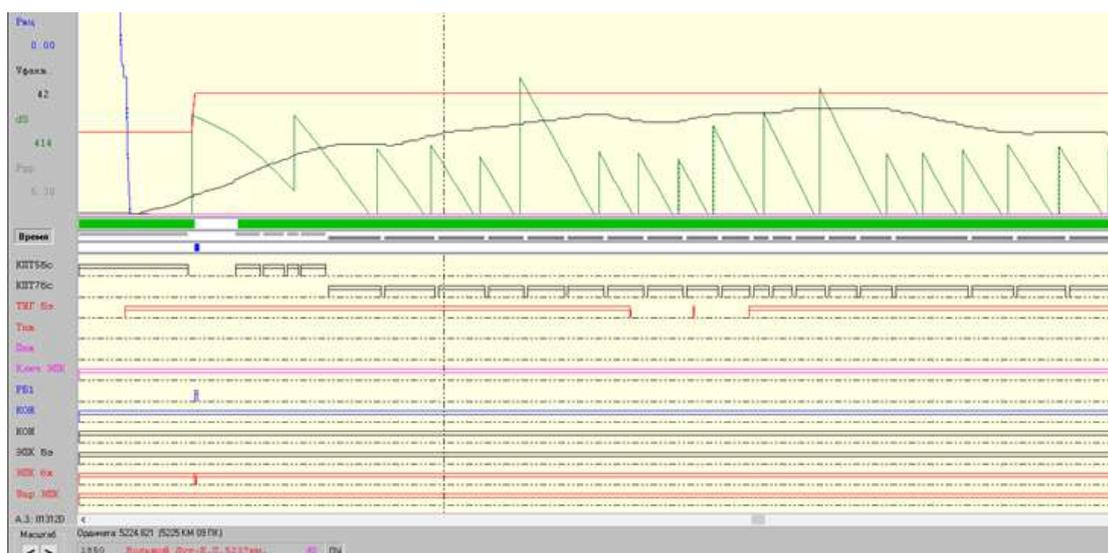


Рис. 4. Фрагмент скоростемерной ленты  
Fig. 4. A fragment of a speed-measuring tape

Таблица 3. Показатели фактической скорости движения  
Table 3. Indicators of the actual speed of movement

Участки Sections	Установленная скорость, км/ч Set speed, km/h	Фактическая скорость, км/ч Actual speed, km/h	Средневзвешенная характеристика подвижного состава Average assessed characteristics of rolling stock	
			Масса состава, т Train weight, t	Осевая нагрузка, т/ось Axial load, t/axle
5 225	60	44,08	5 954,04	22,18
5 246		49,68		
5 314		33,41		

лиз скоростемерных лент на исследуемых участках. Всего было рассмотрено более 100 лент в период отсутствия ограничений по скорости на участках. На рис. 4 представлен фрагмент одной из скоростемерных лент. Все данные сведены в табл. 3.

Расшифровка скоростемерных лент показала, что на особо грузонапряженных участках в условиях горных перевалов грузовые поезда почти всегда следуют со скоростью меньше расчетной или установленной. Так, на экспериментальном участке 5 225 км фактическая скорость ниже установленной на 26,5 %, на 5 246 км разница составляет 17,2 %, на 5 314 км – 44,3 %, 5 314 км находится на подходе к станции.

### Расчет силового воздействия от подвижного состава на путь

Расчеты проводились с применением программного комплекса «Универсальный механизм».

В данном случае было принято решение определить направляющую силу, возникающую при набегании гребня колеса на боковую грань головки рельса в кривых участках пути. В расчете принималось свободное вписывание двухосной жесткой базы в кривую. Центр (полюс) поворота жесткой базы в этом случае находится на пересечении продольной оси жесткой базы с радиусом к ней, перпендикулярным за задней осью двухосной базы (рис. 5).

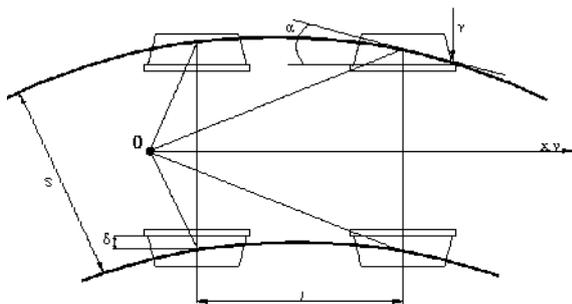


Рис. 5. Схема свободного вписывания тележки в кривую

Fig. 5. The scheme of the bus free fitting into the curve

Рассматривалось движение экипажа в круговой кривой со средним радиусом  $\{\rho^0\}$  и средним возвышением наружного рельса  $h_p^0$ .

Система уравнений, описывающая вписывание в кривую с такими параметрами кривой может быть записана в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} & m \left( \frac{V^2}{\langle \rho^0 \rangle} - \frac{g \langle h_p^0 \rangle}{S} \right) + c_y^+ \left[ \langle y_{II} \rangle - \langle y_I^+ \rangle + (a_{II} - a_I^*) \langle \psi_I^+ \rangle + \frac{(a_{II} - a_I^*)^2}{2 \langle \rho^0 \rangle} \right] + \\ & + Q_{cm} \delta \langle d_{II} \rangle - f_{II} \langle \psi_{II} \rangle + f_{III} \langle d_{III} \rangle = 0; \\ & c_{\psi}^+ \left( \langle \psi_{II} \rangle - \langle \psi_I^+ \rangle - \frac{a_{II} - a_I^*}{\langle \rho^0 \rangle} \right) = f_{II} \left( -\frac{1}{\langle \rho^0 \rangle} - \lambda^2 \langle d_{II} \rangle \right); \\ & \langle y_{II} \rangle - \langle d_{II} \rangle = 0; \\ & m^+ \left( \frac{V^2}{\langle \rho^0 \rangle} - \frac{g \langle h_p^0 \rangle}{S} \right) - \sum_{I=1}^n c_y^+ \left[ \langle y_{II} \rangle - \langle y_I^+ \rangle + (a_{II} - a_I^*) \langle \psi_I^+ \rangle + \frac{(a_{II} - a_I^*)^2}{2 \langle \rho^0 \rangle} \right] + \\ & + c_y^* \left[ \langle y_I^+ \rangle - \langle y^* \rangle + H^* \langle \phi^* \rangle + a_I^* \langle \psi^* \rangle + \frac{a_I^{*2}}{2 \langle \rho^0 \rangle} \right] = 0; \\ & \sum_{I=1}^n \left\{ c_y^+ (a_{II} - a_I^*) \times \left[ \langle y_{II} \rangle - \langle y_I^+ \rangle + (a_{II} - a_I^*) \langle \psi_I^+ \rangle + \frac{(a_{II} - a_I^*)^2}{2 \langle \rho^0 \rangle} \right] + \right. \\ & \left. + c_{\psi}^+ \left( \langle \psi_I^+ \rangle - \langle \psi_{II} \rangle - \frac{a_I^* - a_{II}}{\langle \rho^0 \rangle} \right) \right\} + c_{\psi}^* \left( \langle \psi_I^+ \rangle - \langle \psi^* \rangle - \frac{a_I^*}{\langle \rho^0 \rangle} \right) = 0; \\ & m^+ \left( \frac{V^2}{\langle \rho^0 \rangle} - \frac{g \langle h_p^0 \rangle}{S} \right) - \sum_{I=1}^N c_y^* \left[ \langle y_I^+ \rangle - \langle y^* \rangle + H^* \langle \phi^* \rangle + a_I^* \langle \psi^* \rangle + \frac{a_I^{*2}}{2 \langle \rho^0 \rangle} \right] = 0; \\ & \sum_{I=1}^N a_I^* c_y^* \left( \langle y_I^+ \rangle - \langle y^* \rangle + H^* \langle \phi^* \rangle + a_I^* \langle \psi^* \rangle + \frac{a_I^{*2}}{2 \langle \rho^0 \rangle} \right) - \\ & - \sum_{I=1}^N c_{\psi}^* \left( \langle \psi_I^+ \rangle - \langle \psi^* \rangle - \frac{a_I^*}{\langle \rho^0 \rangle} \right) = 0; \\ & m^+ H^* \left( \frac{V^2}{\langle \rho^0 \rangle} - g \langle \phi^* \rangle \right) + 2Nnb_z^2 c_z^+ \langle \phi^* \rangle - \frac{2b_z^{*2}}{S} Nmc_z^+ \langle h_p^0 \rangle = 0. \\ & i = \overline{1, n}, \quad I = \overline{1, N}. \end{aligned} \right\}$$

В данной системе использованы следующие обозначения параметров:  $m^*$  – масса кузова;  $2b_z^*$  – расстояние между рессорными комплектами одной колесной пары;  $S = 2S_1$  – расстояние между кругами катания колесной пары;  $c_{ZI}^+$  – жесткость, отнесенная к рессорному комплекту  $i$ -го колеса  $I$ -й тележки;  $C_{yI}^*$  – жесткость поперечной связи  $I$ -й тележки с кузовом;  $C_{\psi I}^*$  – угловая жесткость поворота  $I$ -й тележки относительно кузова;  $a_I^*$  – координата по оси  $x$  центра масс  $I$ -й тележки;  $C_{yil}^+$  – жесткость поперечной связи  $i$ -й колесной пары с  $I$ -й тележкой;  $C_{\psi il}^+$  – угловая жесткость поворота  $i$ -й колесной пары относительно  $I$ -й тележки;  $h_{p1il}^0$  – возвышение наружного рельса под  $i$ -м колесом  $I$ -й тележки;  $a_{il}$  – координата по оси  $x$  центра масс  $i$ -й колесной пары  $I$ -й тележки;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $H^*$  – расстояние от центра качаний при боковой качке кузова до его центра масс;  $y_{il}$  – поперечное перемещение центра масс  $i$ -й колесной пары  $I$ -й те-

лежки относительно продольной оси  $x$ ;  $\psi_{il}$  – угол между осью  $i$ -й колесной пары  $I$ -й тележки и нормалью к продольной оси  $x$ ;  $y_{il}^+$  – поперечное перемещение центра масс  $I$ -й тележки относительно продольной оси  $x$ ;  $\psi_{il}^+$  – угол между продольной осью пути  $x$  и осью  $I$ -й тележки;  $y_1^*$  – поперечный относ. кузова;  $\psi_1^*$  – угол между продольной осью  $x$  и осью кузова;  $\varphi^*$  – угол боковой

качки кузова;  $V$  – скорость движения [10, 11].

Результаты расчета изменения направляющей силы во времени представлены в виде графиков на рис. 6. Данные графиков были статистически обработаны. Учитывалось движение экипажа только по круговой кривой. Результаты сведены в табл. 4, в которой также представлены все данные, полученные по результатам исследований.

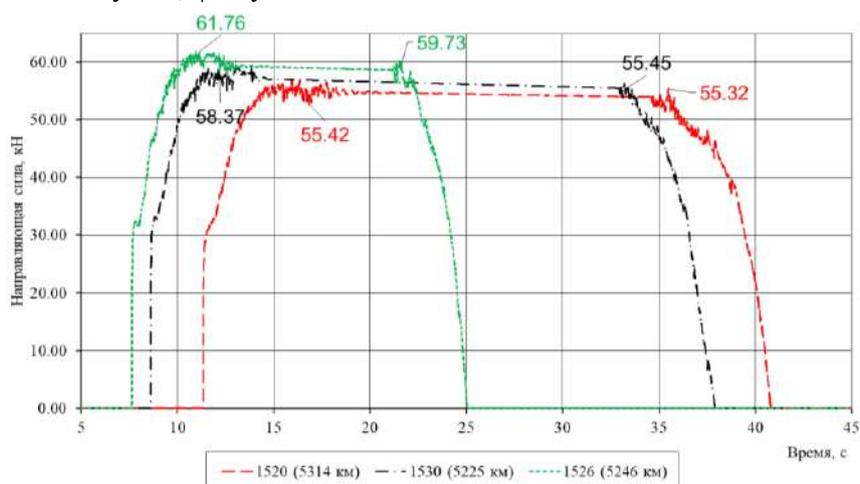


Рис. 6. График изменения направляющей силы на экспериментальных участках  
Fig. 6. Graph of the change in the guiding force in the experimental sections

Таблица 4. Исследуемые параметры воздействия от подвижного состава на путь  
Table 4. Investigated parameters of the impact of rolling stock upon the track

Показатель	Участок		
	1	2	3
Километр Kilometer	5 225	5 246	5 314
Радиус, м Radius, m	298	317	320
Возвышение, мм Elevation, mm	110	100	95
Уклон, ‰ Slope, ‰	подъем 6,8 climb 6,8	подъем 4,4 climb 4,4	подъем 4,2 climb 4,2
Типоразмер шпал Standard size of sleepers	1 530	1 526	1 520
Зашивка шпал, мм Sleeper track, mm	1 535	1 530	1 530
Фактическая скорость, км/ч Actual speed, km/h	44,08	49,68	33,41
Средняя интенсивность изменения ширины колеи, мм/млн т бр. Average intensity of track width change, mm/million tons br	0,114	0,102	0,096
Средняя интенсивность изменения бокового износа, мм/млн т бр. Average intensity of lateral wear change, mm/million tons br	0,106	0,099	0,093
Среднее значение направляющей силы в круговой кривой, кН The average value of the guiding	56,41	59,13	54,42
Среднеквадратичное отклонение Mean square deviation	0,73	0,85	0,52

Полученные данные показывают, что в целом силовое воздействие от подвижного состава на рельсы на участке со шпалами колеи 1 526 мм немногим выше, чем на других участках. Однако с определенной уверенностью можно сказать, что это вызвано большей скоростью на этом участке. Кроме того, несмотря на то, что в данном месте скорость движения и направляющая сила выше, интенсивность изменения ширины рельсовой колеи и бокового износа ниже, чем на участке со шпалами колеи 1 530 мм. Низкая интенсивность износа рельсов и ширины колеи на 5 314 км со шпалами 1 520 мм объясняется невысокой скоростью движения и, соответственно, пониженным воздействием от подвижного состава по сравнению с другими километрами.

### Заключение

Исходя из проведенных расчетов и исследований, можно сказать, что основная цель данной работы достигнута. Шпалы с типоразмером рельсовой колеи 1 526 мм показывают более эффективную работу по сравнению с другими.

Укладка данного типа шпал в кривых малых радиусов не противоречит нормам ПТЭ, так как ширина колеи находится в допустимых пределах. Кроме того, при норме зашивки ширины рельсовой колеи 1 526 мм и боковом износе рельсов 15–18 мм уширение рельсовой колеи составит 1 545 мм, что позволяет осуществлять пропуск поездов с установленной

скоростью вплоть до смены плети.

Изменение ширины колеи на участке со шпалами типоразмера 1 530 мм (5 225 км) происходит в основном за счет изменения бокового износа рельсов и составляет практически 100 %, т.е. при укладке шпал типоразмера 1 530 мм и зашивке их на колею 1 535 мм, происходит выборка всех люфтов в узлах скреплений. Это приводит к увеличению боковой жесткости пути и, как следствие, к росту интенсивности бокового износа рельсов. Результаты исследований подтвердили эту гипотезу. При укладке шпал типоразмера 1 520 мм и зашивке их на колею 1 530 мм возможность изменения ширины рельсовой колеи за счет отжатия рельсов и выборки зазоров узлов скреплений составила 30–39 %. Если говорить о шпалах типоразмера 1 526 мм и зашивки их на колею 1 530 мм, то такой же показатель составил 36–40 %. На наш взгляд, это положительный момент, так как рельс имеет возможность за счет чуть большего отжатия под поездом воспринимать большую нагрузку. Кроме того, за счет этого идет снижение передаваемой нагрузки на подрельсовое основание и основную площадку земляного полотна.

Более продолжительный срок службы рельсовой плети на 5 314 км (шпалы 1 520 мм) объясняется невысокими скоростями на данном участке.

### Список литературы

1. Малгатаев Д.С., Филатов Е.В. Определение целесообразности применения шпал ШЗ в кривых радиусом 300–350 м вместо шпал ШЗ-К // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2013. № 1. С. 144–150.
2. Малгатаев Д.С., Дюндик Л.С., Филатов Е.В. Анализ эффективности работы шпал типа Ш-3 и Ш-3К в кривых радиусом 300–350 метров на ВСЖД // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск. 2013. Т. 1. С. 438–445.
3. Об утверждении инструкции по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов : распоряжение ОАО «РЖД» от 28.02.20 г. № 436/р (ред. 6.08.2021). Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
4. Альбрехт В.Г., Шиладжян А.А. Работа рельсов в крутых кривых // Повышение надежности работы верхнего строения пути в современных условиях эксплуатации : сб. науч. тр. М. : Интекст, 2000. С. 42–54.
5. Величко Д.В. Влияние типа рельсовых скреплений на размер ширины колеи, получаемой при сборке рельсошпальной решетки // Актуальные проблемы Транссиба на современном этапе : материалы науч.-практ. конф. Новосибирск, 2001. С. 245.
6. Величко Д.В. Влияние конструкций промежуточных скреплений на ширину рельсовой колеи // Железные и автомобильные дороги в условиях Сибири : сб. науч. тр. Новосибирск, 2003. С. 108–116.
7. Вериго М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава в кривых малого радиуса и борьба с боковым износом рельсов и гребней колес. М. : ПТКБ ЦП МПС, 1997. 207 с.
8. Ершков О.П. Построение графиков удельных характеристик и графиков-паспортов вписывания железнодорожных экипажей в кривые (теоретические основы) // Труды ВНИИЖТ. 1963. Вып. 268. С. 64–125.
9. Ершков О.П. Применение графиков-паспортов для оценки воздействия локомотивов на путь в кривых. М. : Транспорт, 1964. 34 с.
10. Коган А.Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом. М. : Транспорт, 1997. 325 с.

11. Коган А.Я. Вертикальные динамические силы, действующие на путь. М. : Транспорт, 1969. 206 с.
12. Вершинский С.В., Данилов В.И., Хусидов В.Д. Динамика вагона. М. : Транспорт, 1991. 360 с.
13. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь. М. : Транспорт, 1987. 479 с.
14. Диль В.Ф., Ермоленко И.Ю., Железняк В.Н. Анализ параметров динамики вагона в кривых участках ВСЖД малого радиуса с использованием специализированного комплекса // Безопасность регионов – основа устойчивого развития : материалы IV междунар конф. Иркутск, 2014. Т. 1-2. С. 104–108.
15. Ермоленко И.Ю., Железняк В.Н., Мартыненко Л.В. Анализ силового воздействия на колесо-рельс в условиях эксплуатации пути на горных перевалах малого радиуса ВСЖД // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы VII междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2016. Т. 2. С. 531–534.
16. Уровень взаимодействия подвижного состава и пути в зависимости от его состояния / Д.В. Овчинников, А.Ю. Абдурашитов, В.А. Покацкий и др. // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство : труды XVII науч.-практ. конф. с междунар. участием. Москва, 2021. С. 4–13.
17. Работа пути в условиях тяжеловесного движения / О.А. Сулов, В.О. Певзнер, И.Б. Петропавловская и др. // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : труды XIII Междунар. науч.-техн. конф. чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. Москва, 2016. С. 138–140.
18. Методика прогнозирования износа рельсов различных категорий качества с нормативами интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации : методика ОАО «РЖД» от 29.09.2022 № 1824 : утв. заместителем генерального директора ОАО «РЖД» – начальником Центральной дирекции инфраструктуры Е.А.Шевцовым. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.

### References

1. Malgataev D.S., Filatov E.V. Opredelenie tselesoobraznosti primeneniya shpal Sh3 v krivykh radiusom 300–350 m vmesto shpal Sh3-K [Determining the feasibility of using Sh3 sleepers in curves with a radius of 300–350 m instead of Sh3-K sleepers]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznnykh dorog* [Designing the development of a regional railway network], 2013, no. 1, pp. 144–150.
2. Dyundik L.S., Malgataev D.S., Filatov E.V. Analiz effektivnosti raboty shpal tipa Sh-3 i Sh-3K v krivykh radiusom 300–350 metrov na VSZhD [Analysis of the efficiency of Sh-3 and Sh-3K type sleepers in curves with a radius of 300–350 meters on the East Siberian Railway]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the IV International Scientific-Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2013, vol. 1, pp. 438–445.
3. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» от 28.02.20 г. № 436/г «Ob utverzhdenii instruksii po otsenke sostoyaniya rel'sovoi kolei puteizmeritel'nymi sredstvami i meram po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya poezdov» (red. 6.08.2021) [Order of JSC «Russian Railways» dated February 28, 2020 no 436/r «On approval of the instructions for assessing the condition of the track gauge by track measuring means and measures to ensure the safety of train traffic» (ed. August 6, 2021)]
4. Al'brecht V.G., Shiladzhyan A.A. Rabota rel'sov v krutykh krivykh [The work of rails in steep curves]. *Trudy Vserossiiskogo ordena Trudovogo Krasnogo Znameni nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta «Povyshenie nadezhnosti raboty verkhnego stroeniya puti v sovremennykh usloviyakh ekspluatatsii»* [Proceedings of the All-Russian Order of the Red Banner of Scientific-Research Institute of Railway Transport «Improving the reliability of the upper structure of the track in modern operating conditions»]. Moscow, 2000, pp. 42–54.
5. Velichko D.V. Vliyanie tipa rel'sovykh skreplenii na razmer shiriny kolei, poluchaemoi pri sborke rel'soshpal'noi reshetki [The influence of the type of rail fasteners on the size of the track width obtained during the assembly of the rail grating]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy Transsiba na sovremennom etape»* [Proceedings of the Scientific-Practical Conference «Actual problems of the Trans-Siberian Railway at the present stage»]. Novosibirsk, 2001, pp. 245.
6. Velichko D.V. Vliyanie konstruksii promezhutochnykh skreplenii na shirinu rel'sovoi kolei [The influence of intermediate fastener designs on the width of the rail track]. *Sbornik nauchnykh trudov «Zheleznye i avtomobil'nye dorogi v usloviyakh Sibiri»* [Proceedings «Railways and highways in Siberian conditions»]. Novosibirsk, 2003, pp. 108–116.
7. Verigo M.F. Vzaimodeistvie puti i podvizhnogo sostava v krivykh malogo radiusa i bor'ba s bokovym iznosom rel'sov i grebnei koles [Interaction of track and rolling stock in small radius curves and the fight against lateral wear of rails and wheel ridges]. Moscow: PTKB TsP MPS Publ., 1997. 207 p.
8. Ershkov O.P. Postroenie grafikov udel'nykh kharakteristik i grafikov-pasportov vpisyvaniya zheleznodorozhnykh ekipazhei v krivye (teoreticheskie osnovy) [Plotting of specific characteristics and schedules-passports inscribing railway crews in curves (theoretical foundations)]. *Trudy VNIIZHT* [Proceedings of the All-Union Scientific-Research Institute of Railway Transport], 1963, is. 268, pp. 64–125.
9. Ershkov O.P. Primenenie grafikov-pasportov dlya otsenki vozdeistviya lokomotivov na put' v krivykh [Application of schedules-passports to assess the impact of locomotives on the track]. Moscow: Transport Publ., 1964. 34 p.
10. Kogan A.Ya. Dinamika puti i ego vzaimodeistvie s podvizhnym sostavom [Dynamics of the track and its interaction with rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1997. 326 p.
11. Kogan A.Ya. Vertikal'nye dinamicheskie sily, deistvuyushchie na put' [Vertical dynamic forces acting on the track]. Moscow: Transport Publ., 1969. 206 p.
12. Vershinskii S.V., Danilov V.N., Khusidov V.D. Dinamika vagona [Wagon Dynamics]. Moscow: Transport Publ., 360 p.
13. Shakhunyants G.M. Zheleznodorozhnyi put' [Railway track]. Moscow: Transport Publ., 1987. 479 p.
14. Dil' V.F., Ermolenko I.Yu., Zheleznyak V.N. Analiz parametrov dinamiki vagona v krivykh uchastkakh VSZhD malogo radiusa s ispol'zovaniem spetsializirovannogo kompleksa [Analysis of the parameters of the dynamics of the wagon in the curved radius with use of specialized complex].

sections of the small-radius of East Siberian railway with the use of a specialized complex]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi konferentsii «Bezopasnost; regionov – osnova ustoichivogo razvitiya»* [Proceedings of the IV International Conference «Regional security – the basis of sustainable development»]. Irkutsk, 2014, vol. 1-2, pp. 104–108.

15. Ermolenko I.Yu., Zheleznyak V.N., Martynenko L.V. [Analysis of the force effect on the wheel-rail in the conditions of operation of the track on the mountain passes of the small radius of the East Siberian Railway]. *Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona»* [Proceedings of the VII International Scientific-Practical Conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2016, vol. 2, pp. 531–534.

16. Ovchinnikov D.V., Abdurashitov A.Yu., Pokatskii V.A., Kadyrov R.R. Uroven' vzaimodeistviya podvizhnogo sostava i puti v zavisimosti ot ego sostoyaniya [The level of interaction of rolling stock and track depending on its condition]. *Trudy XVII nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Vnedrenie sovremennykh konstruktssii i peredovykh tekhnologii v putevoe khozyaistvo»* [Proceedings of the XVII Scientific and Practical Conference with international participation «Introduction of modern structures and advanced technologies into the track facilities»]. Moscow, 2021, pp. 4–13.

17. Suslov O.A., Pevsner V.O., Petropavlovskiy I.B., Tret'yakov V.V., Gromova T.I., Tret'yakov I.V., Shapetko K.V., Smelyanskaya I.S., Tomilenko A.S. Rabota puti v usloviyakh tyazhelovesnogo dvizheniya [The work of the track in conditions of heavy traffic]. *Trudy XIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Chteniya, posvyashchennye pamyati professora G.M. Shakhnyantsa «Sovremennye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti»* [Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference. Readings dedicated to the memory of Professor G.M. Shakhnyants «Modern problems of design, construction and operation of a railway track»]. Moscow, 2016, pp. 138–140.

18. Metodika prognozirovaniya iznosa rel'sov razlichnykh kategorii kachestva s normativami intensivnosti iznosa rel'sov razlichnykh kategorii kachestva v zavisimosti ot uslovii ekspluatatsii: utv. zamestitelem general'nogo direktora OAO «RZhD» – nachal'nikom Tsentral'noi direktsii infrastruktury 29.09.2022 g. N 1824 [The methodology for predicting the wear of rails of various quality categories with standards for the intensity of wear of rails of various quality categories, depending on the operating conditions: approved by the Deputy General Director of JSC «Russian Railways» – Head of the Central Directorate of Infrastructure on September 29, 2022 N 1824].

#### Информация об авторах

**Ковенькин Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kovenkin\_da@irgups.ru.  
**Живин Роман Ильич**, начальник Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры, г. Иркутск; e-mail: di\_zhivinri@esrr.ru.

#### Information about the authors

**Dmitrii A. Koven'kin**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Track and Track Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kovenkin\_da@irgups.ru.  
**Roman I. Zhivin**, Head of the East Siberian Directorate of Infrastructure, Irkutsk; e-mail: di\_zhivinri@esrr.ru.

## Методология оценки транспортных связей субъектов Российской Федерации

Ю.О. Гантимурова<sup>1</sup>, В.Е. Гозбенко<sup>1, 2</sup>✉, В.С. Ермолина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉vgozbenko@yandex.ru

### Резюме

Расширение транспортных связей является важным условием повышения мобильности и возможностей экономического развития субъектов Российской Федерации. Транспортные связи между центральными и периферийными районами способствуют повышению потенциала региональной конкуренции различных отраслей производства. В большинстве случаев экономическое и социальное развитие сосредоточено в административном центре или агломерации, поэтому оценка степени доступности состоит в возможности добраться до центра из самого дальнего населенного пункта за оптимальное время. Показатель сложности транспортных связей использовался для сравнения субъектов Российской Федерации с целью объяснения различий в характеристиках транспортной сети и социально-экономических факторов, а также для оценки возможных взаимосвязей был проведен кластерный анализ. Методология многокритериальной оценки была разработана путем объединения двух существующих методов, подходящих для анализа сложности транспортной сети с целью обоснования эффективных направлений развития региональной инфраструктуры. В результате оценки и последующих структурных преобразований улучшатся качественные показатели транспортных услуг, будет усилен региональный конкурентный потенциал и устранено неблагоприятное положение периферийных территорий. Предложенная методология и результаты проведенного исследования могут быть применены в региональном планировании для оценки характеристик доступности и определения трансграничных решений в отношении соседних субъектов, кроме того методика обеспечивает возможность визуального представления результатов на основе геоинформационных систем для поддержки процедуры принятия решений в области транспортного планирования перевозочного процесса.

### Ключевые слова

транспортные связи, субъекты Российской Федерации, виды транспорта, показатель сложности транспортной сети, территориальные особенности, качество транспортных услуг, многокритериальная оценка

### Для цитирования

Гантимурова Ю.О. Методология оценки транспортных связей субъектов Российской Федерации / Ю.О. Гантимурова, В.Е. Гозбенко, В.С. Ермолина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 105–114. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).105-114.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 06.06.2023 г.; поступила после рецензирования: 19.06.2023 г.; принята к публикации: 20.06.2023 г.

### Благодарность

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (проект № МК-3495.2022.4)

## Methodology for assessing transport links of the constituent entities of the Russian Federation

Yu.O. Gantimurova<sup>1</sup>, V.E. Gozbenko<sup>1, 2</sup>✉, V.S. Ermolina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉vgozbenko@yandex.ru

### Abstract

The expansion of transport links is an important condition for increasing the mobility and opportunities for economic development of the constituent entities of the Russian Federation. Transport links between the central and peripheral regions contribute to increasing the potential for regional competition in various industries. In most cases, economic and social development is concentrated in the administrative center or agglomeration, therefore, the assessment of the degree of accessibility is the ability get to the center from the farthest settlement in the optimal travel time. The indicator of the complexity of the transport network was used to compare the subjects of the Russian Federation in order to explain differences in the characteristics of the transport network and socio-economic factors, as well as to assess possible relationships; a cluster analysis was also carried out. The multi-criteria assessment methodology was developed by combining two existing methods suitable for assessing the complexity of the transport network in order to substan-

tiate effective directions for the development of regional infrastructure. As a result of the assessment and subsequent structural changes, the quality indicators of transport services will be improved, as well as the regional competitive potential will be strengthened and the unfavorable situation of peripheral territories will be eliminated. The proposed methodology and the results of the study can be applied in regional planning to assess the characteristics of accessibility and determine cross-border decisions in relation to neighboring entities, in addition, it provides the possibility of visual presentation of the results based on geographic information systems to support decision-making in the field of transport planning of the transportation process.

### Keywords

transport links, constituent entities of the Russian Federation, types of transport, indicator of the complexity of the transport network, territorial features, quality of transport services, multi-criteria assessment

### For citation

Gantimurova Yu.O., Gozbenko V.E., Ermolina V.S. Metodologiya otsenki transportnykh svyazei sub'ektov Rossiiskoi Federatsii [Methodology for assessing transport links of the constituent entities of the Russian Federation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 105–114. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).105-114.

### Article info

Received: June 6, 2023; Revised: June 19, 2023; Accepted: June 20, 2023.

### Acknowledgement

This work was supported by the Council for Grants of the President of the Russian Federation (Project No MK-3495.2022.4).

### Введение

Функционирование транспортной системы и степень развития субъектов страны взаимосвязаны, так как обеспеченность транспортом напрямую согласуется с возможностями распределения производимой продукции, что является важнейшим показателем регионального роста. Скорость развития различных видов транспорта по-разному влияет на экономику [1]. Расширение транспортной инфраструктуры и внутреннего валового продукта на душу населения находятся в положительной корреляции друг с другом [2], однако отмечается, что этот факт является результатом исторических процессов агломерации [3, 4]. Транспорт способствует развитию региональной экономики только в том случае, если его эксплуатация и функционирование осуществляются должным образом [2, 5]. Улучшение условий на транспорте оказывает положительное влияние на рынок труда и обеспечивает дополнительные преимущества в конкурентоспособности [6].

Во многих случаях новая транспортная инфраструктура создается не между центральными и периферийными регионами, а внутри центров, так как в этой области отмечается самый высокий спрос на транспортные услуги [7–10]. На территории РФ наблюдаются существенные региональные различия между отдельными федеральными округами, субъектами, городами и государственная поддержка, инвестиции, программы развития не всегда позволяют сгладить эти несоответствия.

### Исходные данные и методы исследования

Для того чтобы произвести градацию транспортных связей и оценить их различие на региональном уровне предлагается применение количественного показателя сложности транспортной сети (TRANS) [11]. Соотношение позволяет сопоставить уровень развития транспортных систем различных регионов с учетом территориальных особенностей [12, 13]. Для анализа использовались следующие исходные данные:

- $S$  – площадь субъекта (региона), млн км<sup>2</sup>;
- $N$  – численность населения, проживающего на территории субъекта, млн чел.;
- $L_{\text{ЖД}}$  – общая протяженность железнодорожной сети, км;
- $L_{\text{А}}$  – общая протяженность автомобильных дорог общего пользования, км;
- $AL_{\text{ТВ}}$  – доля автомобильных дорог общего пользования с твердым покрытием в общей протяженности дорог общего пользования, %;
- $L_{\text{ВОД}}$  – общая протяженность водных путей сообщения, км;
- $Q_{\text{ВОЗД}}$  – объемы перевозок через аэропорты, млн пасс.

В табл. 1 приведены исходные данные по восьми федеральным округам РФ для оценки сложности транспортных связей. Первичные данные были получены из баз данных Федеральной службы государственной статистики и Росавтодора [14].

Из табл. 1 видно, что характеристики региональных транспортных систем существенно

**Таблица 1.** Исходные данные для оценки транспортных связей федеральных округов РФ  
**Table 1.** Initial data for the assessment of transport links of the federal districts of the Russian Federation

№	Федеральный округ Federal district	$S$ , млн км <sup>2</sup> mln.sq.km	$N$ , млн чел. mln people	$L_{жд}$ , км km	$L_A$ , км km	$AL_{ТВ}$ , %	$Q_{возд}$ , млн пасс. mln pass.	$L_{вод}$ , км km
1	Центральный Central	0,65	40,23	16 973,1	359 049,5	68,7	75,55	5 441,0
2	Северо-Западный North-Western	1,69	13,87	13 199,9	146 807,5	72,4	25,52	17 144,7
3	Южный Southern	0,45	16,64	7 385,9	151 108,0	71,1	24,23	4 365,1
4	Северо-Кавказский North-Caucasian	0,17	10,20	2 101,1	92 086,7	79,0	6,52	0,0
5	Приволжский Volga	1,04	28,68	14 748,2	357 851,6	69,4	13,31	9 486,0
6	Уральский Urals	1,82	12,26	8 494,6	105 588,3	75,6	14,50	13 007,0
7	Сибирский Siberian	4,36	16,65	11 068,8	225 519,8	71,1	16,10	25 309,0
8	Дальневосточный Far-Eastern	6,95	7,90	12 558,3	128 133,9	67,0	7,84	26 825,6

отличаются в количественном выражении, поэтому, чтобы снизить эти различия, необходимо произвести процедуры статистического выравнивания переменных путем взвешивания и переопределения с учетом региональной площади и численности населения с помощью комплексного коэффициента Энгеля по формуле (1):

$$L'_A = \frac{L_A}{(S \cdot N)^{0,5}}, \quad (1)$$

где  $L'_A$  – переопределенное значение (коэффициент) протяженности автомобильных дорог общего пользования с учетом региональной площади и численности населения.

Процесс нормализации переопределенных данных осуществлялся с помощью метода Беннета согласно формуле (2):

$$N(L_A) = \frac{L'_A - \min L'_A}{\max L'_A - \min L'_A}, \quad (2)$$

где  $N(L_A)$  – нормированный сводный индекс протяженности автомобильных дорог общего пользования;  $\max L'_A$  – максимальный коэффициент протяженности автомобильных дорог анализируемых субъектов;  $\min L'_A$  – минимальный коэффициент протяженности автомобильных дорог анализируемых субъектов.

Принятие решений основывается на оценке различных характеристик альтернатив. Методы многокритериальной оценки широко используются в транспортной отрасли. Основными этапами алгоритма являются: анализ проблемы, определение переменных, выбор

факторов оценки, выполнение процедуры оценки и подготовка рекомендаций. Отмечается, что он эффективен для стратегической оценки инновационных решений, способствующих созданию безопасной дорожной среды [15]. Существует большое множество приложений данного алгоритма в области энергетики, окружающей среды, а также в сфере городского транспорта [15, 16]. Сравнение различных предпочтений приводит к обоснованию рекомендаций по принятию решения, где присутствуют подтверждающие четкие числовые значения, а также описания, включающие некоторую неопределенность из-за субъективных оценок нечисловых переменных. Одним из широко используемых методов, который может принимать решения в случае неопределенности, является процесс нечеткой аналитической иерархии (АНР). Этот метод применим для оценки стратегий обслуживания улично-дорожной сети или для управления движением на второстепенных дорогах [12]. Метод был успешно применен для технико-экономического обоснования дорожно-транспортных проектов, основанных на сбалансированном региональном развитии [13]. Вес атрибута – числовая мера относительной важности критерия в процедуре оценки альтернатив – является важной частью любого многокритериального анализа. Введение нечетких переменных обеспечивает значение весов атрибутов, так как вычисляется не только четкое число весов, но и задаются нижняя и верхняя

границы. АНР может использоваться как самостоятельный метод для оценки принимаемых решений, так и в сочетании с линейным программированием, генетическими алгоритмами, нейронными сетями и другими методами анализа. Кроме того, в исследованиях авторов отмечается успешное применение метода АНР совместно с методом КИРА, разработанным венгерскими учеными Kindler и Papp [15], который подходит для оценки программ улучшения региональных транспортных связей с учетом постоянно меняющихся потребностей экономики, а также ограниченных ресурсов. АНР основан на попарном сравнении факторов оценки, тогда как суть метода КИРА заключается в попарном сравнении альтернатив [16]. Матрица первого иерархического уровня АНР предназначена для расчета весов факторов оценки, а матрица второго иерархического уровня сравнивает числовые характеристики альтернатив на основе их пропорций. Метод КИРА выполняет попарное сравнение альтерна-

тив в матричной форме, вычисляя индекс предпочтения и дисквалифицирующий индекс, представляющий преимущества и недостатки сравниваемых альтернатив. Основным принцип метода КИРА аналогичен более широко используемому европейскому методу Promethee. Метод КИРА основан на различиях между парными альтернативами, тогда как АНР измеряет характеристики альтернатив по специальной шкале. В обоих случаях необходимо рассчитать веса факторов оценки. Главное преимущество комбинированного метода в том, что он вычисляет веса факторов оценки с использованием метода нечеткой аналитической иерархии и вводит эти веса в КИРА. Первоначальный метод КИРА исследует сравниваемые альтернативы с использованием пятиуровневой вербальной шкалы для отдельных факторов оценки, где размеры шкалы определяются на основе значений факторов. Комбинированный метод заменяет эти вербальные категории нечеткими переменными, поэтому попарное сравнение альтернатив

**Таблица 2.** Нечеткие значения для сравнения факторов оценки методом АНР

**Table 2.** Fuzzy values for comparing evaluation factors using the АНР method

Вербальная категория Verbal category	Описание Description	Нечеткие значения Fuzzy values
Крайне неважно Extremely unimportant	Фактор гораздо менее важен, чем другие A factor much less important than others	(0, 1, 2)
Неважно Unimportant	Фактор менее важен, чем другие A factor less important than others	(1, 2,5, 4)
Равноценная важность Equal importance	Факторы равноценны по степени важности Factors are equal in importance	(3, 5, 7)
Важно Important	Фактор важнее другого Factor more important than others	(6, 7,5, 9)
Чрезвычайно важно Extremely important	Фактор значительно важнее другого Factor much more important than others	(8, 9, 10)

**Таблица 3.** Рекомендуемые нечеткие значения для сравнения альтернатив в методе КИРА

**Table 3.** Recommended fuzzy values for comparing alternatives in the КИРА method

Вербальная категория Verbal category	Описание Description	Нечеткие значения Fuzzy values
Плохо Bad	Наиболее неблагоприятная альтернатива по данному фактору оценки The most unfavorable alternative by this assessment factor	(0, 1, 2)
Удовлетворительно Satisfactory	Неблагоприятная альтернатива по данному фактору оценки The unfavorable alternative for this assessment factor	(1, 2, 3)
Средне Medium	Безразлично по данному фактору оценки Indifferent by this assessment factor	(2, 3, 4)
Хорошо Good	Благоприятная альтернатива по данному фактору оценки The favorable alternative for this assessment factor	(3, 4, 5)
Отлично Excellent	Наиболее благоприятная альтернатива по данному фактору оценки The most favorable alternative by this assessment factor	(4, 5, 5)

может быть выполнено независимым способом. Кроме того, с помощью нечетких переменных может быть учтена неопределенность мнений экспертов, а также устранена проблема обратного ранжирования.

Введение и применение нечетких переменных является подходящим методом для обработки неопределенности в транспортных связях между регионами [17–19]. Форма нечетких переменных может быть различной. Чаще всего используется форма асимметричного треугольника. Нечеткое число ( $a$ ) в форме асимметричного треугольника характеризуется тройкой значений, где  $l$  – нижняя граница,  $m$  – пиковое значение равно 1, и  $u$  – верхняя граница, т.е.  $a = (l, m, u)$ . Полученное нечеткое число может быть дефаззифицировано с получением четкого числа с применением подходящего метода. Под процессом дефаззификации понимается определение четкого числа для наилучшей характеристики значения нечеткой переменной. Часто используемыми методами являются метод геометрического центра и метод точки веса. Упрощенный расчет дефаззифицированного четкого числа, может быть описан как  $c = (l + m + u) / 3$ .

Сравнительные значения факторов оценки, используемых в методе АНР: «1», «3», «5», «7», «9». В табл. 2 показан возможный вариант факторов, основанный на нечетком множестве. Вербальные категории для сравнения альтернатив в методе КИРА: «отлично», «хорошо», «средне», «удовлетворительно», «плохо». В табл. 3 показаны нечеткие значения, описывающие эти категории в комбинированном методе.

Для определения весов в методе АНР эксперты проводят попарное сравнение факторов оценки для всех возможных случаев [16]. Результаты представлены в виде элементов матрицы  $a_{ij}$  размером  $n \times n$  в случае  $n$  факторов оценки. Матрица симметрична ( $a_{ji} = 1/a_{ij}$ ), а значение элементов главной диагонали  $a_{ii}$  равно 1.

В нечетком варианте элементы матрицы представлены нечеткими числами. Нечеткий собственный вектор относительных весов может быть определен путем вычисления среднего геометрического с применением нечеткой арифметики в качестве подходящего приближения:

$$e_i = \left( \prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n},$$

$$w_i = \frac{e_i}{\sum_1^n e_i},$$

где  $a_{ij}$  – элемент матрицы сравнения факторов оценки;  $e_i$  – аппроксимация элемента собственного вектора матрицы;  $w_i$  – относительный вес фактора оценки (сумма относительных весов равна 1).

На рис. 1 представлена блок-схема комбинированного метода оценки с применением нечетких переменных.

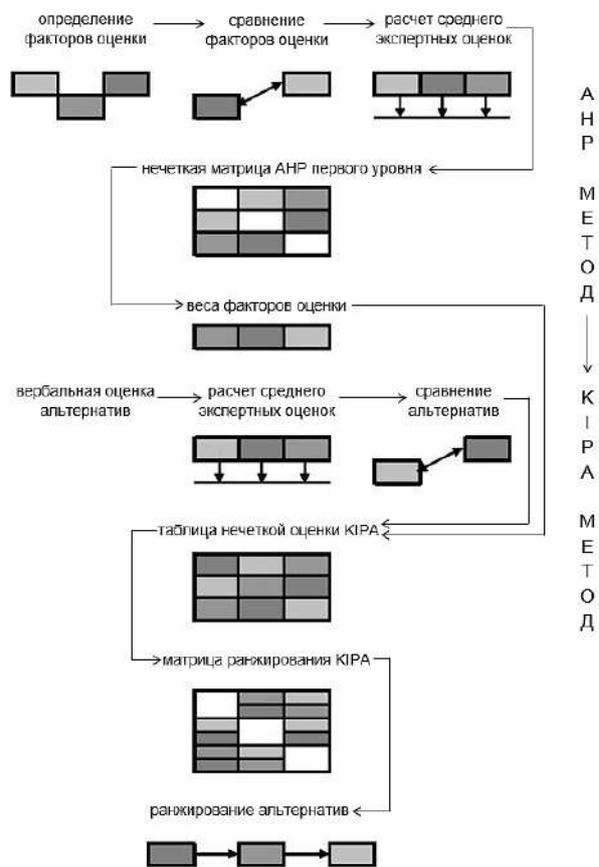


Рис. 1. Блок-схема комбинированного метода оценки

Fig. 1. Flowchart of the combined estimation method

При расчете веса факторов методом КИРА преимущества или предпочтения лучших либо равных альтернатив сравниваются с суммой весов:

$$c_{ij} = \sum_{i \in (t_i \geq t_j)} w_i,$$

где  $c_{ij}$  – коэффициент преимущества;  $w_i$  – вес данного фактора оценки;  $t_i, t_j$  – оценки данной альтернативы, состоящие из нечетких значений.

При расчете неблагоприятного или дисквалифицирующего фактора наибольшая разница в оценке сравнивается с диапазоном шкалы:

$$d_{ij} = \frac{(t_i - t_j)_{\max}}{80w_{\max}},$$

где  $d_{ij}$  – фактор недостатка,  $w_{\max}$  – максимальный вес факторов оценки.

Дефазификация факторов преимуществ и недостатков, рассчитанных как нечеткие переменные, обеспечивает оценку элементов матрицы с применением метода геометрического центра. Сама оценка представляет собой итеративную процедуру, которая шаг за шагом варьирует пределы преимуществ и недостатков факторов, и ее результатом является предпочтение или ранжирование приоритетов альтернатив [19].

### Результаты исследования

После нормализации все значения расчетных переменных находятся в пределах от 0 до 1. Чем ближе это значение к 1, тем лучше уровень транспортных систем данной территориальной единицы (табл. 4).

На рис. 2 отображены значения показателей сложности транспортной сети по 85 субъектам РФ. Было выделено три категории регионов: с высокоразвитыми транспортными связями (значение TRANS 0,3578–0,5366), формирующимися (значение TRANS 0,1789–0,3577) и слаборазвитыми связями (значение TRANS 0–0,1788) [20].

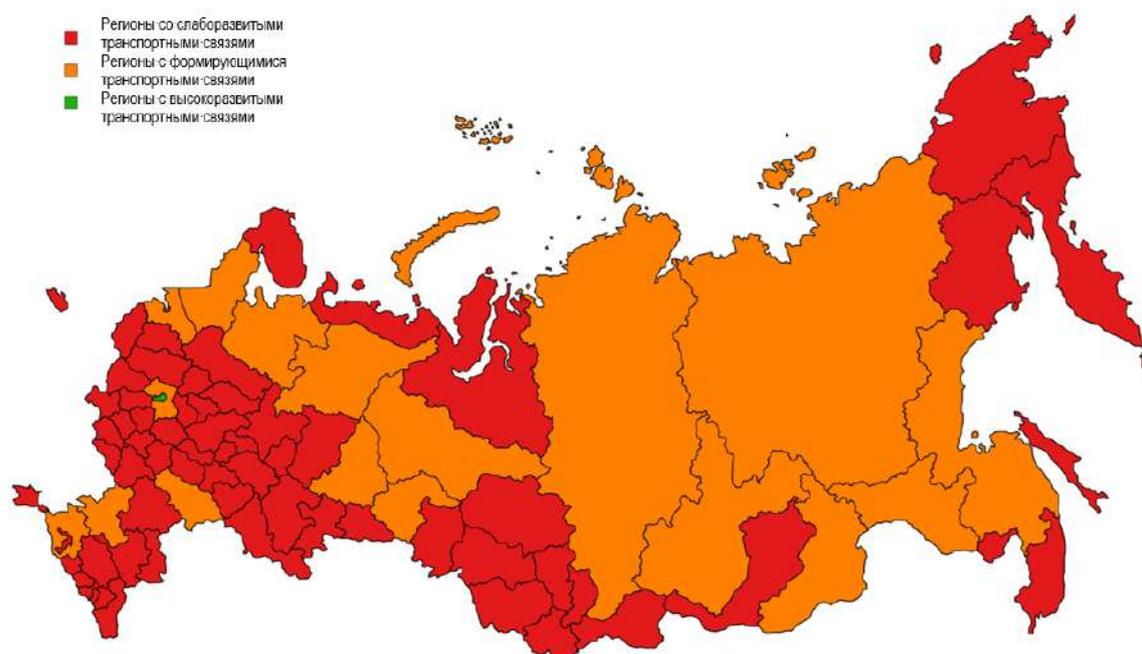
Цель кластерного анализа – объединить в одну группу схожие с точки зрения развития транспортной системы регионы с учетом функционирующих видов транспорта. Методы кластерного анализа можно разделить на две группы – иерархические и неиерархические. Каждая из групп включает множество подходов и алгоритмов, при использовании которых можно получить различные решения для одних и тех же данных, что считается нормальным явлением. Для анализа использовался иерархический метод «ближайшего соседа», федеральные округа были сгруппированы в три кластера относительно показателя сложности транспортной сети (рис. 3) [20]. Суть иерархической кластеризации состоит в последовательном объединении меньших кластеров в большие [21–23]. Важным условием адаптируемости кластерного анализа является стандартизация исследуемых переменных, поэтому была произведена стандартизация исходных значений (см. табл. 1) по экономическим и социальным факторам.

*Кластер 1.* К этому кластеру принадлежит только одна территориальная единица – Центральный федеральный округ, в который входит 17 областей и один город федерального значения. Центральный федеральный округ имеет более развитую транспортную сеть с высокой плотностью, что объясняется наибольшим сосредоточением населения в европейской части России.

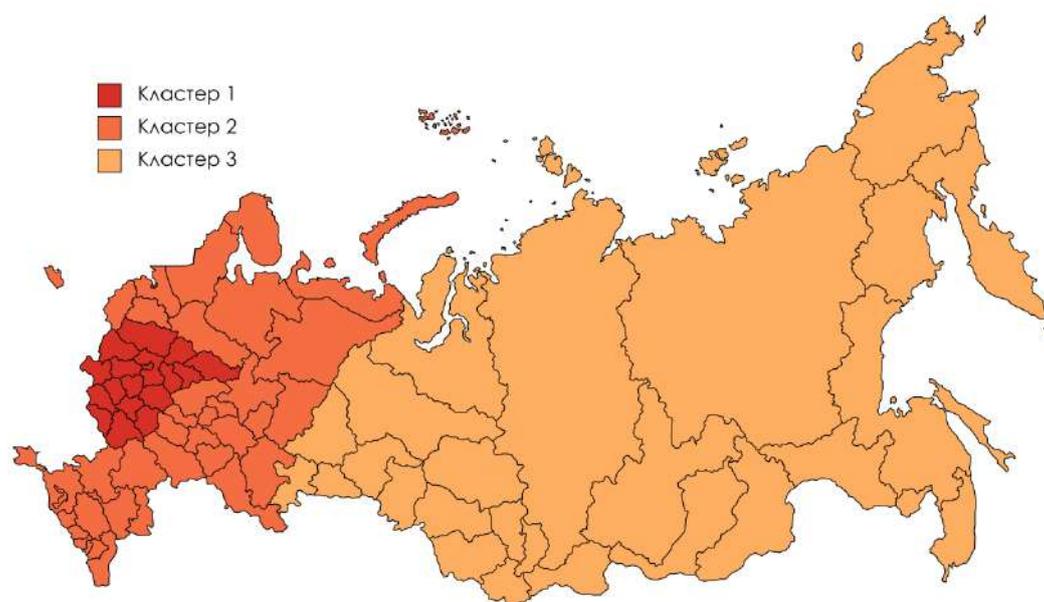
**Таблица 4.** Значения переменных после нормализации и рассчитанных показателей сложности транспортных связей

**Table 4.** Values of variables after normalization and calculated indicators of the complexity of transport links

№ п/п	Федеральный округ Federal district	$N(L_{ЖД})$	$N(L_A)$	$N(AL_{ТВ})$	$N(Q_{ВОЗД})$	$N(L_{ВОД})$	TRANS
1	Центральный Central	1,0000	1,0000	0,0986	1,0000	0,2940	0,6785
2	Северо-Западный North-Western	0,7079	0,2469	0,1283	0,3076	0,9795	0,4740
3	Южный Southern	0,6962	0,7192	0,3428	0,5700	0,4418	0,5540
4	Северо-Кавказский North-Caucasian	0,1467	0,9944	1,0000	0,2836	0,0000	0,4849
5	Приволжский Volga	0,6949	0,9125	0,0847	0,1007	0,4804	0,4546
6	Уральский Urals	0,2476	0,0959	0,1485	0,1467	0,7612	0,2800
7	Сибирский Siberian	0,0000	0,1734	0,0000	0,0606	0,8207	0,2110
8	Дальневосточный Far-Eastern	0,1956	0,0000	0,0135	0,0000	1,0000	0,2418



**Рис. 2.** Значения показателя сложности транспортной сети по субъектам РФ  
**Fig. 2.** The complexity indicator values for transport network by entities of the Russian Federation



**Рис. 3.** Результаты кластерного анализа федеральных округов РФ по показателю сложности транспортной сети  
**Fig. 3.** Cluster analysis results of the federal districts Russian Federation in terms of complexity transport network

*Кластер 2.* В него входят четыре федеральных округа – Северо-Западный, Южный, Северо-Кавказский и Приволжский. Самый развитый из них с наибольшим значением показателя сложности транспортной сети – Южный федеральный округ. Также стоит отметить, что Северо-Кавказский федеральный округ,

несмотря на отсутствие водных путей сообщения, с незначительным объемом перевезенных пассажиров воздушным транспортом по сравнению с другими федеральными округами данного кластера, отнесен к регионам с формирующимися транспортными связями. Это объясняется тем, что показатели развитости сети ав-

томобильных дорог с учетом плотности населения и площади территории округа достаточно высоки, а значение удельного веса автомобильных дорог с твердым покрытием – максимальное среди федеральных округов всех кластеров.

**Кластер 3.** В данную группу входят оставшиеся три федеральных округа: Уральский, Сибирский и Дальневосточный. Несмотря на то, что значения по протяженности всех путей сообщения в Сибирском и Дальневосточном федеральных округах выше, наибольшее значение показателя сложности транспортной сети отмечается в Уральском федеральном округе. Наблюдаются доминирующие параметры по протяженности автомобильных дорог, водных путей сообщения по сравнению с кластером 2. Однако на слабо освоенной территории Сибири и Дальнего Востока транспортные связи менее развиты, плотность сети значительно ниже. В целом для Российской Федерации характерна широтная направленность транспортных потоков.

### Заключение

Основной областью практического применения представленных результатов исследования является принятие решений, обеспечивающих процедуру многокритериальной оцен-

ки программ развития транспортного сообщения с учетом сложности транспортной сети (региональный фактор), интенсивности транспортных потоков (технический фактор), расчетной стоимости на транспортировку грузов и пассажиров (экономический фактор), плотности населения в регионе (социальный фактор).

Показатель сложности транспортных связей подходит для характеристики транспортной инфраструктуры с целью анализа и оценки транспортных систем субъектов РФ. Практическим применением расчетных значений показателей сложности транспортных связей является осуществление кластерного анализа федеральных округов и разработка рейтинга регионов с точки зрения развития транспортной системы. Кроме того, применение многокритериального анализа при принятии решений о расширении транспортных связей, повышении мобильности и возможностей экономического развития регионов позволяет учитывать технические, экономические и социальные факторы, которые оказывают влияние на распределение грузовых потоков с учетом ограниченности ресурсов внутри субъектов.

### Список литературы

1. Оленевич В.А., Гозбенко В.Е. Задачи приспособления транспортной инфраструктуры к новым технологиям // *Соврем. технологии и науч.-техн. прогресс*. 2021. № 8. С. 189–190.
2. Транспортная инфраструктура как основополагающий фактор эффективного функционирования экономики страны / О.А. Лебедева, Ю.О. Полтавская, З.Н. Гаммаева и др. // *Сб. науч. тр. Ангар. гос. техн. ун-та*. 2018. Т. 1. № 15. С. 125–130.
3. Крипак М.Н., Колесник А.И. Проблемы и перспективы развития транспортной инфраструктуры в современных городах // *Сб. науч. тр. Ангар. гос. техн. ун-та*. 2014. Т. 1. № 1. С. 194–198.
4. Крипак М.Н., Домнина А.С., Дружинина М.В. Перспективы развития транспортной сети г. Севастополь в ограниченных условиях исторической застройки // *Молодая наука Сибири*. 2021. № 3 (13). С. 170–175. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/228/122> (Дата обращения 18.04.2023).
5. Антонов Д.В., Лебедева О.А. Основные принципы развития транспортных систем городов // *Вестн. Ангар. гос. техн. акад.* 2014. № 8. С. 149–155.
6. Толстяков Р.Р., Гавриков В.А. Методика определения качества автотранспортных услуг как основного показателя конкурентоспособности автотранспортных предприятий // *Социал.-эконом. явления и процессы*. 2015. Т. 10. № 10. С. 150–155.
7. Антонова А.В., Доможирова А.Д. К вопросу моделирования размеров пассажиропотока на различных видах транспорта // *Инициативы молодых – науке и производству : сб. ст. IV Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов*. Пенза, 2022. С. 24–26.
8. Транспортное планирование в российских городах: перспективы актуализации классификации и подхода к проектированию городских улиц / Е.С. Преловская, А.Г. Левашев, А.Ю. Михайлов и др. // *Вестн. Сибир. гос. автомоб.-дорожн. ун-та*. 2017. № 6 (58). С. 113–119.
9. Левашев А.Г., Михайлов А.Ю., Шаров М.И. К вопросу об оценке качества транспортного обслуживания в городах // *Соврем. проблемы трансп. комплекса России*. 2013. Т. 3. № 1. С. 16–23.
10. Царегородцева Е.Ю., Упырь Р.Ю. Инновационные подходы в управлении логистикой на транспорте // *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона*. 2021. № 1 (26). С. 14–17.
11. Проскурина И.Ю., Макаров Д.Б. Приоритетные направления развития региональной транспортной системы // *Лесотехнический журнал*. 2014. Т. 4. №3 (15). С. 319–331.

12. Михайлов А.Ю. Интегральный критерий оценки качества функционирования улично-дорожных сетей // Изв. Иркут. гос. эконом. акад. 2004. № 2. С. 50–53.
13. Дутов А.В., Клочков В.В., Рождественская С.М. Измерение и нормирование транспортной связанности и качества транспортного обслуживания страны и ее регионов // Регионы России: стратегии и механизмы модернизации, инновационного и технологического развития : материалы X междунар. науч.-практ. конф. М., 2019. С. 43–48.
14. Федеральная служба государственной статистики // Росстат : сайт. URL : <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (Дата обращения 12.05.2023).
15. Gulyas A., Kovacs A. Assessment of transport connections based on accessibility // Transportation Research Procedia. 2016. № 14. P. 1723–1732.
16. Верескун В.Д. Экспертные оценки в производственно-транспортных процессах: вопросы организации, моделирования и управления // Фундаментальные исследования. 2016. № 4-3. С. 485–489.
17. Захарчук Е.А., Пасынков А.Ф., Некрасов А.А. Классификация регионов по критериям саморазвития // Экономика региона. 2011. № 3. С. 54–63.
18. Aldian A., Taylor M.A.P. Fuzzy Multicriteria Analysis for Inter-city Travel Demand Modelling // Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2003. Vol. 5. P. 1294–1307.
19. Awasthi A., Chauhan S. Using AHP and Dempster-Shafer theory for evaluation sustainable transport solutions // Environmental Modeling and Software. 2011. Vol. 26. P. 787–796.
20. Карта России // Map Chart. Russia map : сайт URL: <https://www.mapchart.net/russia.html> (Дата обращения 28.05.2023).
21. Барышникова Н.А. Методика кластеризации на основе иерархических и неиерархических методов кластерного анализа // Вестн. Таганрог. ин-та управления и экономики. 2012. № 1 (15). С. 81–83.
22. Игнатъева А.С., Логунова Ю.А. Анализ данных на основе алгоритмов агломеративной иерархической кластеризации // Фундаментал. и приклад. аспекты компьютер. технологий и информ. безопасности : сб. ст. III Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. Таганрог, 2017. Ч. 2. С. 17–20.
23. Гладиллин А.В., Гамазина В.С. Иерархические методы кластеризации данных и их характеристики // Информ. технологии в эконом. и техн. задачах : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2016. С. 200–202.

### References

1. Olentsevich V.A., Gozbenko V.E. Zadachi adaptatsii transportnoi infrastruktury k novym tekhnologiyam [Tasks of adaptation of transport infrastructure to new technologies]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* [Modern technologies and scientific and technical progress], 2021, no. 8, pp. 189–190.
2. Lebedeva O.A., Poltavskaya Yu.O., Gammaeva Z.N., Kondratenko T.V. Transportnaya infrastruktura kak priyemlyemy faktor ratsional'nosti ekonomiki strany [Transport infrastructure as an acceptable factor in the rationality of the country's economy]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Angarsk State Technical University], 2018, vol. 1, no. 15, pp. 125–130.
3. Kripak M.N., Kolesnik A.I. Problemy i perspektivy razvitiya transportnoi infrastruktury sovremennykh gorodov [Problems and prospects for the development of transport infrastructure in modern cities]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Angarsk State Technical University], 2014, vol. 1, no. 1, pp. 194–198.
4. Kripak M.N., Domnina A.S., Druzhinina M.V. Perspektivy razvitiya transportnoi seti goroda Sevastopolya v ogranichennykh usloviyakh istoricheskogo razvitiya [Prospects for the development of the transport network of the city of Sevastopol in the limited conditions of historical development]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young science of Siberia. 2021], 2021, no. 3 (13), pp. 170–175.
5. Antonov D.V., Lebedeva O.A. Osnovnye printsipy razvitiya transportnykh sistem gorodov [Basic principles for the development of transport systems of cities]. *Vestnik Angarskoi gosudarstvennoi tekhnicheskoi akademii* [Bulletin of the Angarsk State Technical Academy], 2014, no. 8, pp. 149–155.
6. Tolstyakov R.R., Gavrikov V.A. Metodika opredeleniya kachestva avtotransportnykh uslug kak kriterii otsenki konkurentosposobnosti avtotransportnykh predpriyatii [Methodology for determining the quality of motor transport services as a criterion for assessing the competitiveness of motor transport enterprises]. *Sotsial'no-ekonomicheskie yavleniya i protsessy* [Socio-economic phenomena and processes], 2015, vol. 10, no. 10, pp. 150–155.
7. Antonova A.V., Domozhirova A.D. K voprosu modelirovaniya velichiny passazhiropotoka na razlichnykh vidakh transporta [On the issue of modeling the size of passenger traffic on various modes of transport]. *Sbornik statei IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh i studentov «Molodezhnye initsiativy – nauka i proizvodstvo»* [Proceedings of the IV All-Russian scientific-practical conference of young scientists and students «Young people's initiatives – science and production»]. Penza, 2022, pp. 24–26.
8. Prelovskaya E.S., Levashev A.G., Mikhailov A.Yu., Engel B. Transportnoe planirovanie v rossiiskikh gorodakh: perspektivy aktualizatsii klassifikatsii i podkhoda k proektirovaniyu gorodskikh ulits [Transport planning in Russian cities: prospects for updating the classification and approach to the design of city streets]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University], 2017, no. 6 (58), pp. 113–119.
9. Levashev A.G., Mikhailov A.Yu., Sharov M.I. K voprosu ob otsenke kachestva transportnogo obsluzhivaniya v gorodakh [On the issue of assessing the quality of service in cities]. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Modern problems of the transport complex of Russia], 2013, vol. 3, no. 1, pp. 16–23.

10. Tsaregorodtseva E.Yu., Upry' R.Yu. Innovatsionnye podhody v upravlenii logistikoi na transporte [Innovative approaches to logistics management in transport]. *Transport Aziatsko-Tihookeanskogo regiona* [Transport of the Asia-Pacific region], 2021, no. 1 (26), pp. 14–17.
11. Proskurina I.Yu., Makarov D.B. Prioritetnye napravleniya razvitiya regional'noi transportnoi sistemy [Priority directions of development of the regional transport system]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry journal.], 2014, Vol. 4, no 3 (15), pp. 319–331.
12. Mikhailov A.Yu. Integral'nyi kriterii otsenki kachestva funktsionirovaniya ulichno-dorozhnoi seti [Integral criterion for assessing the quality of the functioning of street and road networks]. *Izvestiya Irkutskoi gosudarstvennoi ekonomicheskoi akademii* [Izvestia of the Irkutsk State Economic Academy], 2004, no. 2, pp. 50–53.
13. Dutov A.V., Klochkov V.V., Rozhdestvenskaya S.M. Izmerenie i regulirovanie transportnoi svyaznosti i kachestva transportnykh uslug dlya strany i ee regionov [Measurement and regulation of transport connectivity and the quality of transport services for the country and its regions]. *Materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Regiony Rossii: strategii i mekhanizmy modernizatsii, innovatsionnogo i tekhnologicheskogo razvitiya»* [Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference «Regions of Russia: strategies and mechanisms of modernization, innovation and technological development»]. Moscow, 2019, pp. 43–48.
14. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki (Elektronnyi resurs) [Federal State Statistics Service (Electronic resource)]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport> (Accessed May 12, 2023).
15. Gulyas A., Kovacs A. Assessment of transport connections based on accessibility. *Transportation Research Procedia*. 2016. No. 14. Pp. 1723–1732.
16. Vereskun V.D. Ekspertnye otsenki v proizvodstvennykh i transportnykh protsessakh: voprosy organizatsii, modelirovaniya i upravleniya [Expert assessments in production and transport processes: issues of organization, modeling and management]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2016, no. 4-3, pp. 485–489.
17. Zakharchuk E.A. Pasyukov A.F., Nekrasov A.A. Klassifikatsiya regionov po kriteriyam samorazvitiya [Classification of regions according to the criteria of self-development]. *Ekonomika regiona* [Economics of the region], 2011, no. 3, pp. 54–63.
18. Aldian A., Taylor M.A.P. Fuzzy Multicriteria Analysis for Inter-city Travel Demand Modelling. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 2003. Vol. 5. Pp. 1294–1307.
19. Awasthi A., Chauhan S. Using AHP and Dempster-Shafer theory for evaluation sustainable transport solutions. *Environmental Modeling and Software*. 2011. Vol. 26. Pp. 787–796.
20. Karta Rossii (Elektronnyi resurs) [Russia's map (Electronic resource)]. Available at: <https://www.mapchart.net/russia.html> (Accessed May 28, 2023).
21. Baryshnikova N.A. Metodika klasterizatsii na osnove ierarhicheskikh i neierarhicheskikh metodov klasterного analiza [Clustering technique based on hierarchical and non-hierarchical methods of cluster analysis]. *Vestnik Taganrogskogo instituta upravleniya i ekonomiki* [Bulletin of the Taganrog Institute of Management and Economics], 2012, no. 1 (15), pp. 81–83.
22. Ignat'eva A.S., Logunova Yu.A. Analiz dannykh na osnove algoritmov aglomerativnoi ierarhicheskoi klasterizatsii [Data analysis based on agglomerative hierarchical clustering algorithms]. *Sbornik statei III Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchennykh, aspirantov i studentov «Fundamental'nye i prikladnye aspekty komp'yuternykh tekhnologii i informatsionnoi bezopasnosti»* [Proceedings of the III All-Russian scientific and technical conference of young scientists, graduate students and students «Fundamental and applied aspects of computer technology and information security»]. Taganrog, 2017, part 2, pp. 17–20.
23. Gladilin A.V., Gamazina V.S. Ierarhicheskii metody klasterizatsii dannykh i ikh kharakteristiki [Hierarchical methods of data clustering and their characteristics]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh zadachakh»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Information technologies in economic and technical problems»]. Penza, 2016, pp. 200–202.

### Информация об авторах

**Гантимунова Юлия Олеговна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск; e-mail: juliapoltavskaya@mail.ru.

**Гозбенко Валерий Ерофеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; профессор кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск; e-mail: vgozbenko@yandex.ru.

**Ермолина Владислава Сергеевна**, кафедра управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск; e-mail: vladislava.ermolina@bk.ru.

### Information about the authors

**Yulia O. Gantimurova**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management of Automobile Transport, Angarsk State Technical University, Angarsk; e-mail: juliapoltavskaya@mail.ru.

**Valerii E. Gozbenko**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; Professor of the Department of Management of Automobile Transport, Angarsk State Technical University, Angarsk; e-mail: vgozbenko@yandex.ru.

**Vladislava S. Ermolina**, Department of Management of Automobile Transport, Angarsk State Technical University, Angarsk; e-mail: vladislava.ermolina@bk.ru.

## Повышение надежности вспомогательных машин электровозов на основе использования данных вибродиагностики

А.В. Лукьянов✉, Е.В. Каимов

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉loukian@inbox.ru

### Резюме

Статья посвящена актуальному исследованию массива вибрационных параметров вспомогательных машин грузовых электровозов ВЛ-85, полученных при проведении входного вибрационного контроля многоканальной аппаратурой виброизмерительных блоков, разработанной в Иркутском государственном университете путей сообщения. Измерения проводились в ремонтном локомотивном депо «Нижнеудинское» перед входом электровозов на текущий и средний ремонт. Проведена статистическая обработка массива данных более 1 300 виброизмерений мотор-вентиляторов электровозов ВЛ-85. Установлено, что уровень вибрации большинства мотор-вентиляторов существенно превышает предельно допустимый по существующему ГОСТ ИСО–10816-3-2002. Проведено разбиение массива на зоны надежности по виброскорости. Доказано, что плотность распределения вероятности среднеквадратических значений виброскорости и виброускорения подчиняется логнормальному закону. Вычислены параметры этого закона (математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение). Данные анализа показали, что более 50 % мотор-вентиляторов нуждаются в ремонте по существующим нормативам допустимой вибрации. Предложен алгоритм поэтапного уменьшения вибрации и повышения межремонтного пробега мотор-вентиляторов путем временного снижения нормативных требований на допустимую вибрацию, обеспечения равномерной загрузки ремонтного производства и неукоснительного выполнения требования государственного стандарта по допустимому среднеквадратическому значению виброскорости на выходе из ремонта. Повышения качества ремонта можно добиться при более полном использовании возможностей входного и выходного вибрационного контроля подшипников, балансировки ротора, контроля обмоток электродвигателя мотор-вентилятора и его внешнего магнитного поля. Проведено численное моделирование предложенного алгоритма снижения вибрации массива обслуживаемых мотор-вентиляторов при их ремонте за счет повышения его качества с учетом неравномерной скорости износа (повышения вибрации) при эксплуатации мотор-вентиляторов, которая была принята подчиняющейся нормальному закону распределения вероятности. Определено, что степень загрузки ремонтных служб будет переменной, но в допустимых границах. Установлено также, что через три года ремонта по принятому алгоритму математическое ожидание виброскорости уменьшится до нормативного уровня (2,5 мм/с). Количество мотор-вентиляторов с превышением предельно допустимого уровня (4,5 мм/с) будет находиться в пределах 40–45 ед., что обеспечит равномерную загрузку ремонтного производства. Таким образом, результаты численного моделирования предложенного алгоритма снижения вибрации и повышения межремонтного пробега мотор-вентиляторов подтвердили его осуществимость и эффективность.

### Ключевые слова

вспомогательные машины электровозов, мотор-вентиляторы, входной и выходной виброконтроль при ремонте, среднеквадратическое значение виброскорости, вибродиагностика, снижение вибрации оборудования электровозов

### Для цитирования

Лукьянов А.В. Повышение надежности вспомогательных машин электровозов на основе использования данных вибродиагностики / А.В. Лукьянов, Е.В. Каимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78).С. 115–126. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).115-126.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 09.06.2023 г.; поступила после рецензирования: 19.06.2023 г.; принята к публикации: 20.06.2023 г.

## Improving the reliability of auxiliary machines of electric locomotives based on the use of vibration diagnostics data

A.V. Luk'yanov✉, E.V. Kaimov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉loukian@inbox.ru

### Abstract

The article is devoted to the actual study of the array of vibration parameters of auxiliary machines of freight electric locomotives VL-85, obtained during the input vibration control by multi-channel equipment of vibration measuring units developed at the Irkutsk State Transport University. The measurements were carried out at the repair locomotive depot «Nizhneudinskoe» before the entrance of electric locomotives for current and medium repairs. Statistical processing of the data array of more than 1 300

vibration measurements of motor fans of electric locomotives VL-85 was carried out. It is established that the vibration level of most motor fans significantly exceeds the maximum permissible according to the existing State Standard ISO–10816-3-2002. The array is divided into zones of reliability by vibration velocity. It is proved that the probability distribution density of the root-mean-square values of vibration velocity and vibration acceleration obeys the lognormal law. The parameters of this law (mathematical expectation, standard deviation) are calculated. The analysis data showed that more than 50% of motor fans need repair according to the existing standards of permissible vibration. An algorithm is proposed for step-by-step reduction of vibration and increase in the inter-repair mileage of motor fans by temporarily reducing the regulatory requirements for permissible vibration, ensuring uniform loading of repair production and, at the same time, strict compliance with the requirements of the state standard for the permissible root-mean-square value of vibration velocity at the repair exit. Improving the quality of repairs is possible with a more complete use of the possibilities of input and output vibration control of bearings, balancing of the rotor, control of the windings of the fan electric motor and its external magnetic field. Numerical simulation of the proposed algorithm for reducing the vibration of the array of serviced motor fans during their repair by improving its quality was carried out, taking into account the uneven rate of wear (vibration increase) during operation of motor fans, which was adopted as obeying the normal law of probability distribution. It is determined that the degree of repair services loading will be uneven, but within acceptable limits. It is also established that after three years of repair according to the adopted algorithm, the mathematical expectation of vibration velocity will decrease to a standard level value of 2,5 mm/s. The number of motor fans exceeding the maximum permissible level of 4,5 mm/s will be within 40–45 motor fans, which will ensure uniform loading of repair production. Thus, the results of numerical simulation of the proposed algorithm for reducing vibration and increasing the inter-repair mileage of motor fans confirmed its feasibility and effectiveness.

### Keywords

auxiliary machines of electric locomotives, motor fans, input and output vibration monitoring during repair, root-mean-square value of vibration velocity, vibration diagnostics, vibration reduction of electric locomotives equipment

### For citation

Luk'yanov A.V., Kaimov E.V. Povyshenie nadezhnosti vspomogatel'nykh mashin elektrovozov na osnove ispol'zovaniya dannykh vibrodiagnostiki [Improving the reliability of auxiliary machines of electric locomotives based on the use of vibration diagnostics data]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 115–126. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).115-126.

### Article Info

Received: June 9, 2022; Revised: June 19, 2023; Accepted: June 20, 2023.

### Введение

Вспомогательные машины (ВМ) – мотор-вентиляторы (МВ), мотор-компрессоры (МК) и фазорасщепители (ФР) – обеспечивают работу всего оборудования электровозов и поездов:

– охлаждают тяговые электродвигатели и электрические сборки – МВ;

– являются источником сжатого воздуха для силовых, управляющих цепей и тормозной системы электровозов и поездов – МК.

Диагностирование и прогнозирование технического состояния ВМ электровозов и выявление развивающихся дефектов является важной задачей на железнодорожном транспорте [1]. Ее решение позволит повысить надежность работы машинного оборудования, выявлять и предотвращать развитие дефектов, перейти к обслуживанию и ремонту машин по фактическому состоянию.

ВМ электровозов генерируют значительные вибрации различных форм и частот узлов и деталей ВМ при стоянке и движении электровозов, которые передаются на кузов и раму электровоза, в кабины экипажа, на все электрическое и машинное оборудование.

Вибрационные воздействия стимулируют накопление повреждений в деталях, что приводит к появлению усталостных трещин и разрушениям. Вибрация вызывает постепенное ослабление неподвижных соединений, соударение сопрягаемых поверхностей подвижных соединений. В сложных объектах, обладающих широким набором собственных частот, возможно возбуждение нескольких резонансных режимов при действии полигармонического возмущения. При совпадении частоты вибрации с собственными резонансными частотами элементов электрическихборок возможны обрывы проводов в местах их закрепления, ослабление соединений шин и шунтов, выгорание контактов, возникновение коротких замыканий в электросхемах.

Виброускорения, возникающие при работе машин и механизмов, создают дополнительные динамические нагрузки на детали, увеличивают их износ, снижают ресурс изделий, оказывают опасное физиологическое воздействие на организм человека, приводя к профессиональным заболеваниям. Вибрационные воздействия могут вызвать как досрочный износ, так и

внезапные отказы машин, приборов и аппаратов. По сути, вспомогательные машины вследствие неуравновешенности масс, расцентровки и дефектов подшипников, электрических дефектов являются мощными источниками колебаний, создающими значительный вибрационный фон в электровозах. Причем вибрация, досрочно разрушая оборудование локомотивов, в свою очередь, способствует дальнейшему развитию порождающих вибрацию дефектов. Многолетними исследованиями выявлена прямая связь между уровнем вибрационного фона и снижением межремонтного пробега машин и локомотивов.

Вибродиагностика – метод неразрушающего контроля, основанный на анализе параметров вибрации, создаваемой работающим оборудованием либо обусловленной структурой исследуемого объекта. При измерении виброперемещений контролируются деформация или относительное смещение деталей ВМ, виброскорость является энергетической величиной, определяющей импульсы сил и кинетическую энергию вибрации, виброускорение характеризует динамические силовые нагрузки, разрушающие конструкцию ВМ.

Особое внимание следует уделять входному и выходному виброконтролю ВМ при текущем и среднем ремонте [2–4]. Входной виброконтроль ВМ позволит точно определить объем и содержание ремонта, оценить необходимость замены подшипников, балансировки

центробежного ротора ВМ [5–7]. Выходной виброконтроль ВМ позволяет оценить качество ремонта при замене подшипников, отсутствие расцентровки и механического ослабления в опорах, остаточный дисбаланс. Как показали исследования, до 10–15 % новых подшипников имеют дефекты завода-изготовителя [8].

Большой объем диагностической информации дает контроль и диагностика состояния электродвигателей ВМ путем спектрального анализа потребляемого тока [9–11]. В частности, контроль изоляции асинхронных электродвигателей позволяет своевременно выявлять межвитковые замыкания в обмотке статора [12]. Вихретоковый контроль технического состояния электродвигателя дополняет данные контроля тока в электродвигателях ВМ [13]. Контроль напряженности внешнего магнитного поля асинхронных электродвигателей позволяет своевременно обнаружить обрыв стержней «беличьей клетки», короткие замыкания обмоток, статический и динамический эксцентриситеты ротора [14–17]. Метод акустической диагностики позволяет уточнять данные по качеству изоляции электродвигателей ВМ [18].

#### Анализ текущего состояния вспомогательных машин на примере отечественного электровоза ВЛ-85

Как было отмечено, одной из разновидностей ВМ в подвижном составе железнодорожного транспорта являются МВ. В основном

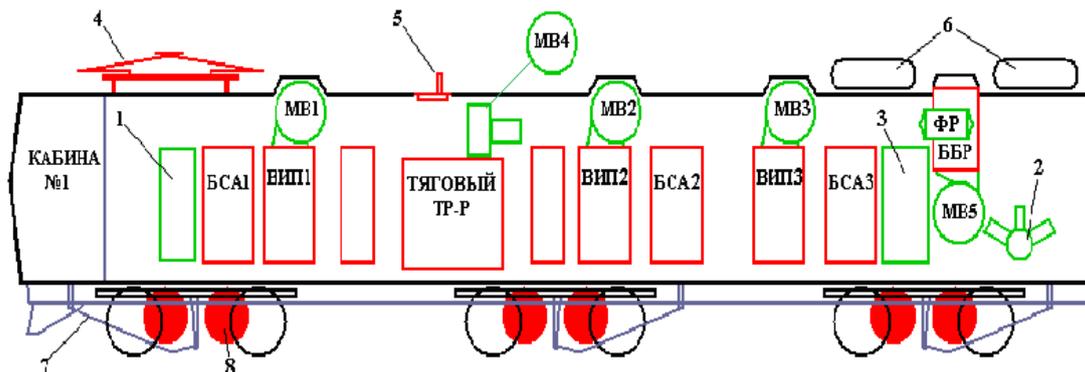


Рис. 1. Расположение оборудования на секции электровоза ВЛ-85:

1 – блок низковольтных аппаратов; 2 – мотор-компрессор; 3 – блок аппаратов вспомогательных машин; 4 – токоприемник; 5 – главный выключатель; 6 – главные резервуары; 7 – наклонная тяга; 8 – тяговый двигатель; ББР – блок балластных резисторов; МВ – мотор-вентиляторы; ФР – фазорасщепитель; ВНП – выпрямительно-инверторный преобразователь; БСА – блок силовых аппаратов

Fig. 1. The location of the equipment on the section of the VL-85 electric locomotive:

1 – block of low-voltage devices; 2 – motor compressor; 3 – block of auxiliary machines; 4 – current collector; 5 – main switch; 6 – main tanks; 7 – inclined thrust; 8 – traction motor; ББР – block of ballast resistors; МВ – motor-fans; ФР – phase splitter; ВНП – rectifier-inverter converter; БСА – power unit

они выполняют функции охлаждения оборудования электровозов. В электровозах ВЛ-85 используются вентиляторы вида ЦВВ 89-15 и Ц8-19 №7,6. Расположение основного оборудования, МВ и других вспомогательных машин секции электровоза ВЛ-85 изображено на рис. 1. График распределения отказов вспомогательных машин электровозов ВЛ-85 в зависимости от межремонтного пробега [4] приведен на рис. 2.

Из графика следует, что большинство отказов МВ наблюдается при сравнительно малых пробегах. До нормативных значений 600 тыс. км пробега между ремонтами дорабатывают всего 20 МВ, т.е. 4% от парка МВ. Это объясняется высокой вибрацией МВ, превышающей нормативные значения [2, 8] и некачественным ремонтом. Обработка приведенного массива значений по отказам МВ с использованием программы статистической обработки данных «Statistica 10,0» показала экспоненциальное распределение с математическим ожиданием  $T_0 = 282,7$  тыс. км и оценкой дисперсии 32,4 тыс. км, т.е. в среднем МВ не дорабатывают и до половины нормативного ресурса.

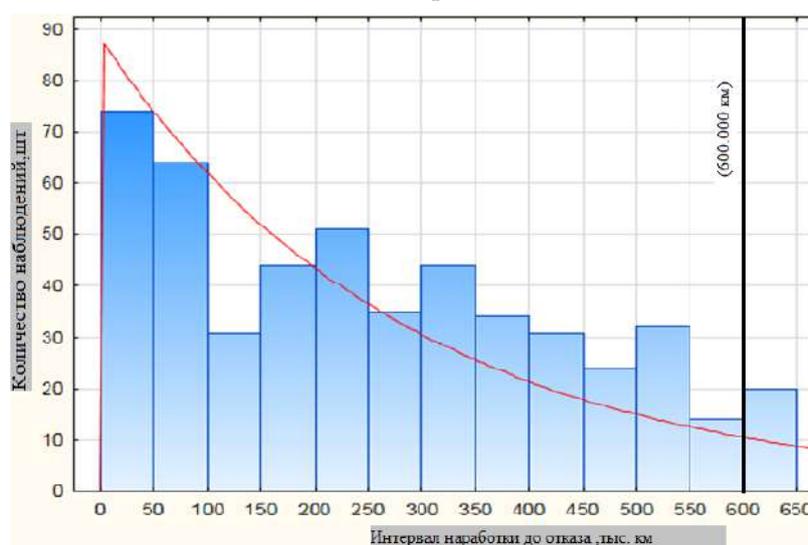
Целями данной статьи являются анализ показателей вибрации МВ электровоза с применением методов математической статистики и выработка рекомендаций по увеличению межремонтного интервала на основе проведенных исследований.

## Выполнение экспериментальных исследований и обсуждение их результатов

Измерение вибрации на подшипниковых опорах МВ проводилось с использованием двухканальных виброизмерительных блоков (ВИБ) – разработки лаборатории технической диагностики Иркутского государственного университета путей сообщения [5]. Вибродатчики ВИБ устанавливаются с использованием магнитов на двух подшипниковых щитах МВ в горизонтальном направлении максимальной вибрации, после чего все МВ секции электровоза включаются в работу на 1 мин. При этом 4–5 аналогичных ВИБ позволяют одновременно снять виброхарактеристики всех МВ секции электровоза при прокрутке их под контактным проводом (рис. 3).

Комплекс входного виброконтроля МВ и разработанная для него программа спектрального анализа «Вибродефект» позволяют решать следующие задачи:

- одновременное измерение вибрации всех МВ секции электровоза в диапазоне 5–5 000 Гц, при этом регистрируются сигналы виброускорения длительностью 5,12 с каждый;
- управление работой ВИБ и всего комплекса осуществляется дистанционно из прохода машинного отсека, что позволяет производить измерения вибрации МВ, находящихся в высоковольтной камере;
- разработанная программа автоматизированной диагностики «Вибродефект» позво-



**Рис. 2.** Распределение отказов вспомогательных машин в зависимости от межремонтного пробега (математическое ожидание  $T_0 = 282,7$  тыс. км, оценка дисперсии 32,4 тыс. км)

**Fig. 2.** Distribution of failures of auxiliary machines depending on the inter-repair mileage (mathematical expectation  $T_0 = 282,7$  thousand km, variance estimate 32,4 thousand km)



**Рис. 3.** Установка двухканального виброизмерительного блока и его датчиков вибрации на МВ2  
**Fig. 3.** Installation of a two-channel vibration measuring unit and its vibration sensors on MV2

База данных значений виброскорости и виброускорения в точках измерений  
 на мотор-вентиляторах электровозов (фрагмент)  
 Database of vibration velocity and vibration acceleration values at the measurement points  
 on the electric locomotive fans motor (fragment)

№ электровоза, № мотор-вентилятора, дата измерения Electric locomotive num- ber, Fan motor no, date of measurement	Среднеквадратичное значение виброскорости, м/с Root-mean-square value of vibration velocity, m/s				Среднеквадратичное значение виброускорения, м/с <sup>2</sup> Root-mean-square value of vibration acceleration, m/s <sup>2</sup>			
	Секция 1 Section 1		Секция 2 Section 2		Секция 1 Section 1		Секция 2 Section 2	
	Датчик 1 Sensor 1	Датчик 2 Sensor 2	Датчик 1 Sensor 1	Датчик 2 Sensor 2	Датчик 1 Sensor 1	Датчик 2 Sensor 2	Датчик 1 Sensor 1	Датчик 2 Sensor 2
№5; МВ-1 (29.10.2018)	6,3	5,76	6,32	8,24	4,45	5,04	3,18	6,13
№5; МВ-2 (29.12.2018)	2,51	2,83	5,73	5,49	2,43	5,11	13,96	4,35
№5; МВ-3 (29.10.2018)	4,32	11,95	10,49	16,46	7,45	6,13	3,87	6,43
№5; МВ-4 (29.10.2018)	7,21	4,53	5,95	11,94	3,02	4,62	6,46	5,87
№91; МВ-1 (29.10.2018)	2,85	19,74	7,57	4,72	4,78	18,52	5,46	8,68
№91; МВ-2 (29.12.2018)	3,84	9,98	4,08	4,95	4,13	5,8	3,87	7,25
№91; МВ-3 (29.10.2018)	4,74	4,59	8,12	5,28	7,28	5,67	7,47	5,08
№91; МВ-4 (29.10.2018)	3,6	3,06	5,98	6,39	11,02	7,08	5,2	8,95
№210; МВ-1 (29.10.2018)	2,02	4,13	11,61	3,62	8,12	7,47	7,61	10,43

ляет проводить спектральный анализ вибрации всех ВМ за несколько секунд и выявлять дефекты ВМ, приводящие к внеплановым ремонтам и отказам;

– программа «Вибродефект» позволяет проводить более подробный анализ каждого вибросигнала, отображать спектры вибросмещения, виброскорости и виброускорения, определять среднеквадратические значения (СКЗ) виброскорости и виброускорения, значения ПИК-фактора, характеризующего импульсность сигнала [3].

Результаты измерений вибрации и диагностики дефектов всех МВ электровоза с рекомендациями по ремонту выдаются и распечатываются в виде итогового протокола.

Таким образом, при проведении входного виброконтроля определяются:

- необходимость ремонта ВМ (по уровню СКЗ виброскорости);
- виды дефектов (по результатам спектрального анализа), которые делятся на устраняемые и неустраняемые без разборки и ремонта ВМ.

К устранимым дефектам относятся: дисбаланс ротора; ослабление крепления ВМ к основанию; несимметрия тока в фазах.

К неустраняемым дефектам без разборки и ремонта ВМ относятся: дефекты подшипников, электрические дефекты ротора и статора.

В результате, при проведении входного виброконтроля в локомотивном депо ст. Нижнеудинск была сформирована база данных виброизмерений МВ электровозов ВЛ-85. На первом этапе обработки данных создана таблица СКЗ виброскорости и виброускорений (табл.) в точках измерений 1 и 2 (подшипниковых опорах) МВ каждого электровоза.

В столбцах таблицы по горизонтали отображаются номера электровозов, МВ и дата измерений, далее номера секций, датчиков (Д1, Д2) и значения СКЗ виброскорости и виброускорения.

Всего в таблицу было занесено 1 333 СКЗ по виброскорости и столько же по виброускорению. Далее построены диаграммы рассеяния данных в координатах  $X$  – виброскорости,  $Y$  – виброускорения. Были исключены заведомо ложные значения массива, которые существенно (в несколько раз) выделялись из общей выборки. Выбросы появились в процессе сбора данных при неправильной установке датчиков на МВ или в результате сбоя аппаратуры при неправильном ее использовании эксплуатационным персоналом. После удаления недостоверных данных был составлен новый массив

значений, диаграмма рассеяния которых показана в координатах «СКЗ виброскорости – СКЗ виброускорения» (рис. 4).

Крайние точки данной диаграммы не являются ложными, так как их временные сигналы и спектры имеют реальные значения и свидетельствуют о характерных дефектах. В итоге, после исключения ложных значений, получился массив из 1 268 измерений виброскорости и виброускорений, что составляет 95 % от общей выборки.

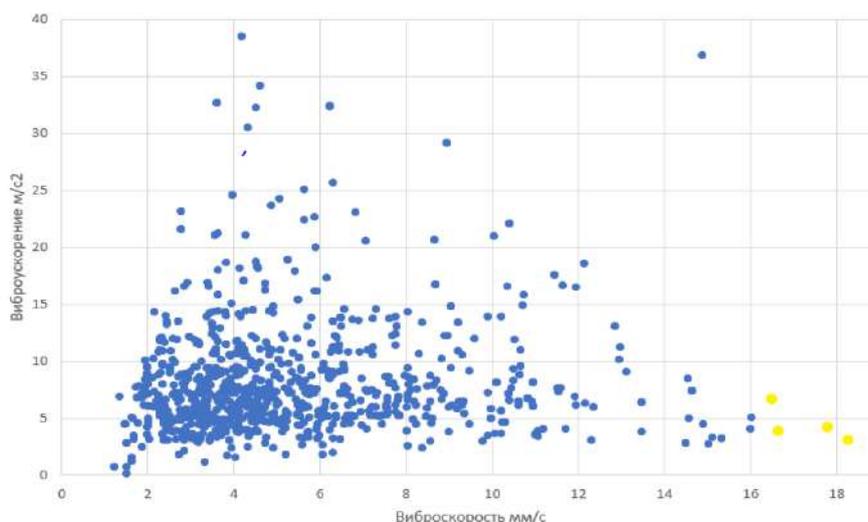
По всему массиву измерений был проведен анализ математического ожидания (МО), среднеквадратического отклонения (СКО), а также аппроксимация распределений виброскорости и виброускорения математическими функциями с помощью программы обработки статистических данных Statistica.

При проверке параметров распределения математическими функциями установлено, что наиболее точно описывает данную выборку логнормальное распределение СКЗ виброскорости (рис. 5) и виброускорения (рис. 6) с плотностью:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\lg x - \mu)^2}{2\mu^2}},$$

где  $\mu$  – параметр масштаба;  $\sigma$  – параметр формы.

Зоны вибрационного состояния по ГОСТ ИСО 10816-3-2002 [2] для машин номинальной мощностью 15–300 кВт (электрических машин



**Рис. 4.** Уточненная диаграмма рассеяния данных измерений в координатах «среднеквадратичное значение виброскорости – среднеквадратичное значение виброускорения»

**Fig. 4.** Revised scattering diagram of measurement data in coordinates «root-mean-square value of vibration velocity – root-mean-square value of vibration acceleration»

с высотой оси вращения вала 160–315 мм) (границы зон – СКЗ виброскорости):

– зона А – вибрация новых машин или машин после капитального ремонта (менее 1,4 мм/с);

– зона В («допустимо») – машины пригодные для эксплуатации без ограничения сроков (менее 2,8 мм/с);

– зона С («требуется принятия мер») – машины непригодные для длительной непрерывной эксплуатации, такие машины могут функционировать ограниченный период времени до начала ремонтных работ (менее 4,5 мм/с);

– зона D («недопустимо») – уровни вибрации в данной зоне могут вызывать серьезные

повреждения машин (более 4,5 мм/с).

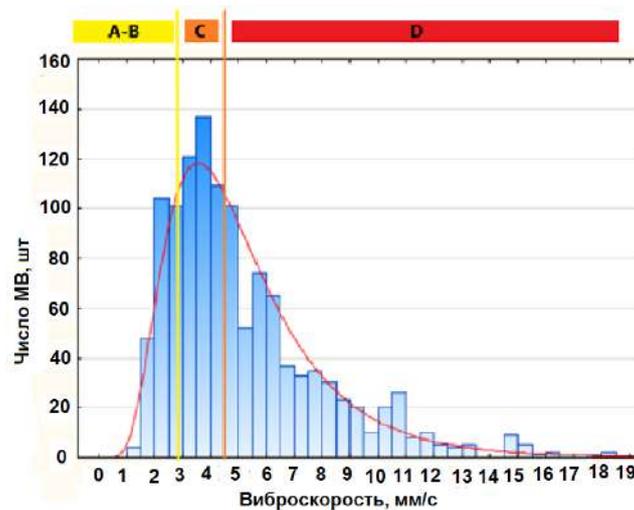
Анализ плотности распределения виброскорости по всему массиву измерений показал следующее:

– доля МВ с допустимой вибрацией (зоны А и В) составляет 21,5 % (273 ед.);

– доля МВ с высокой вибрацией, по которым возможна кратковременная эксплуатация (зона С) – 27,7 % (351 ед.);

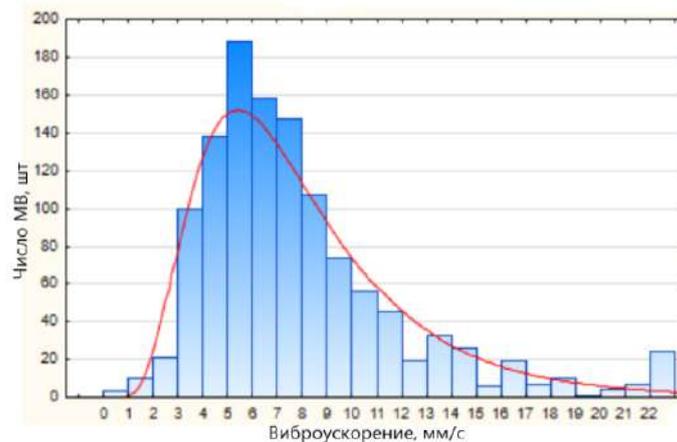
– доля МВ с недопустимой вибрацией (зона D) – 50,8 % от всех МВ по которым измерялась вибрация (644 ед.).

В соответствии с ГОСТ ИСО 10816-3-2002 предельно допустимый уровень виброскорости составляет 4,5 мм/с. Это значит, что



**Рис. 5.** Логнормальная плотность распределения вероятности виброскорости мотор-вентилятора: математическое ожидание ( $\mu$ ) – 5,2 мм/с; среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ) 2,8 мм/с

**Fig. 5.** Lognormal density probability distribution of motor-fan vibration velocity: mathematical expectation ( $\mu$ ) – 5,2 mm/s; standard deviation ( $\sigma$ ) 2,8 mm/s



**Рис. 6.** Плотность распределения вероятности значений виброускорения (логнормальная зависимость): математическое ожидание ( $\mu$ ) – 8,0 м/с<sup>2</sup>; среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ) – 4,65 м/с<sup>2</sup>

**Fig. 6.** Probability distribution density of vibration acceleration values (lognormal dependence): mathematical expectation ( $\mu$ ) – 8,0 m/s<sup>2</sup>; standard deviation ( $\sigma$ ) – 4,65 m/s<sup>2</sup>

среднее значение виброскорости по всему массиву МВ (МО 5,2 мм/с) превышает предельно допустимое значение.

Таким образом, анализ вибрации МВ и ее сопоставление с существующими нормами показал, что половина МВ непригодны к эксплуатации (т.е. с высокой вероятностью могут выйти из строя в любой момент), четверть МВ могут эксплуатироваться кратковременно (до достижения значений виброскорости 4,5 мм/с и более) и четверть МВ пригодна для длительной эксплуатации. Полученные данные по вибрации подтверждают высокий уровень отказов ВМ (см. рис. 2), которые не дорабатывают и половины нормативного пробега между ремонтами.

С учетом среднеучастковой скорости электровоза, среднего времени нахождения в пути было определено время наработки 600 тыс. км – 6 667 ч непрерывной работы МВ (около 9 мес.). Таким образом, каждый квартал необходимо выводить в ремонт 8,3 % МВ.

Рассмотрим возможный алгоритм повышения надежности и увеличения межремонтного пробега вспомогательных машин электровозов:

1. Так как вывести в ремонт 50,8 % от всего парка МВ невозможно, исходя из потребности вывода в ремонт каждый квартал 8,3 % от всего парка МВ, временно верхние границы зон А–С должны быть увеличены в 2 раза до значений 2,8, 5,6 и 9,0 мм/с соответственно.

2. Необходимо повысить качество ремонта МВ, добиться снижения СКЗ виброскорости на выходе из ремонта не выше нор-

мативной величины 1,4 мм/с (зона А по ГОСТ ИСО 10816-3-2002 [2]).

Добиться последнего возможно путем установки в МВ качественных подшипников, проведения динамической балансировки ротора, ликвидации источников электрических дефектов, таких как несимметрия тока в фазах, обрыв стержней «беличьей клетки» асинхронного электродвигателя МВ, межвитковые замыкания обмоток статора, статический и динамический эксцентриситет. Эти дефекты можно выявить путем спектрального анализа вибрации и диагностики дефектов при входном и выходном виброконтроле, а также путем измерения и контроля электрических параметров МВ [5, 17].

Проведем численное моделирование изменения уровня вибрации (СКЗ виброскорости) при реализации предложенного алгоритма увеличения межремонтного пробега МВ. При этом будут моделироваться два взаимно противоположных процесса:

– понижение нормативных требований по выводу МВ в ремонт по предельному уровню вибрации, а именно – временное увеличение нормы недопустимой СКЗ виброскорости (зона С нормы [2]) до 9 мм/с позволит выводить в ремонт каждый квартал 8,3 % от всего парка МВ с очень высокой вибрацией, обеспечит равномерную загрузку ремонтного производства;

– повышение нормативных требований к качеству ремонта, а именно – обеспечение уровня вибрации на выходе из ремонта (СКЗ виброскорости не должно превышать 1,4 мм/с,

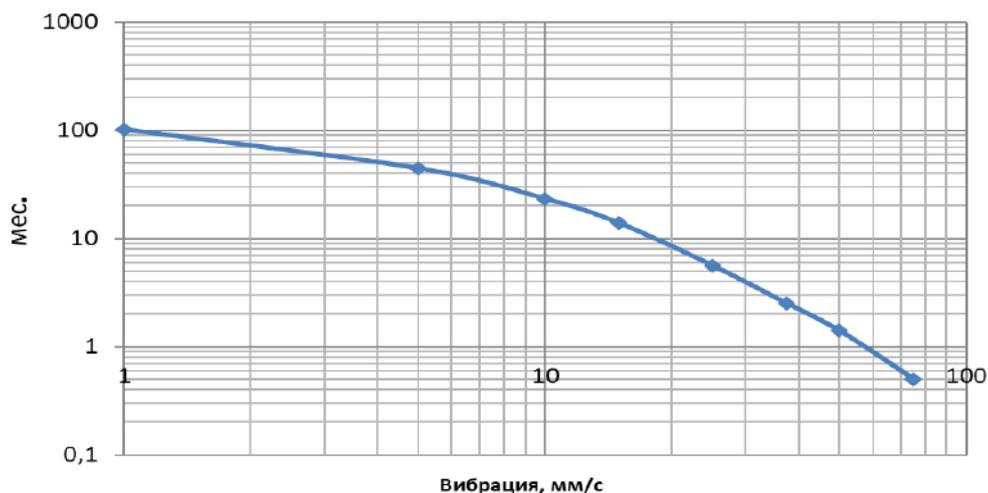


Рис. 7. График зависимости срока службы подшипников от вибрации по статистике CSI в логарифмических координатах

Fig. 7. Dependence graph of bearings service life upon vibration according to CSI statistics in logarithmic coordinates

т.е. допустимой вибрации зоны А по выходу МВ из ремонта) [2].

При моделировании должен быть учтен неравномерный (нелинейный) закон износа МВ, увеличивающийся с повышением вибрации. По данным статистики CSI (США), влияние вибрации на срок службы подшипников машин определяется зависимостью, представленной на рис. 7 [7].

Уровень вибрации значительно и нелинейно влияет на скорость изнашивания и срок остаточного ресурса подшипников (см. рис. 7): от 8 лет (при СКЗ виброскорости 1 мм/с) до 1 недели (при СКЗ виброскорости 75 мм/с).

Для прогноза изменения величины вибрации (а значит и степени износа) МВ примем нормальный закон увеличения СКЗ виброскорости. Увеличение виброскорости МВ, а значит и износа за год возьмем в промежутке 1,2–3,6 мм/с в зависимости от фактической величины вибрации. Соответственно, за месяц это значение будет увеличиваться на 0,3 мм/с для 25 % МВ с максимальной вибрацией; на 0,1 мм/с для 25 % МВ с минимальной вибрацией и на 0,2 мм/с для 50 % остальных МВ (рис. 8).

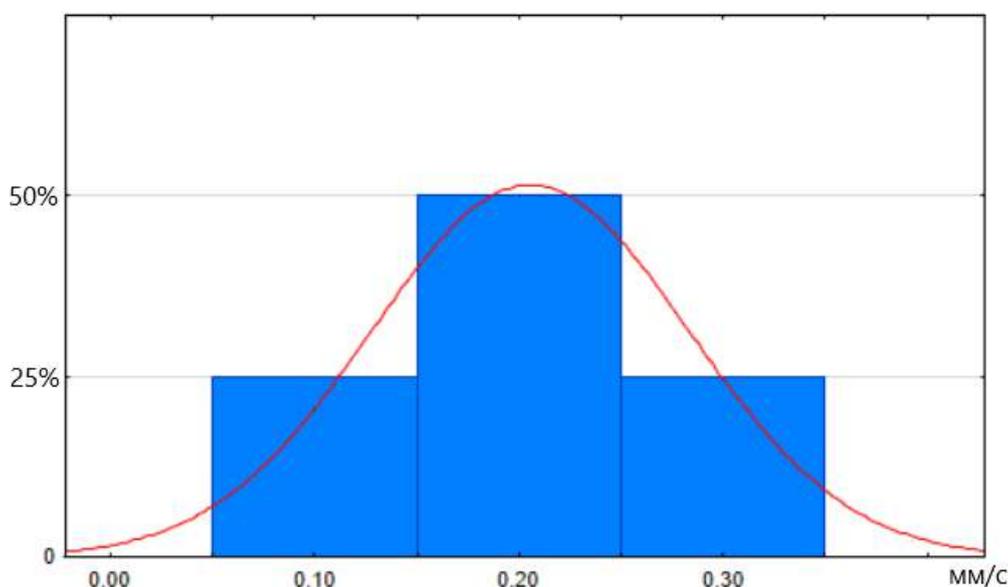
Плотность распределения СКЗ виброскорости по всему массиву МВ в начальный момент времени изображена на рис. 5. Через три

месяца (квартал) 8,3 % МВ будут отремонтированы и их СКЗ виброскорости уменьшиться до 1,4 мм/с. В то же время СКЗ виброскорости остальных МВ увеличатся в зависимости от уровня текущей вибрации на величину 0,3–0,9 мм/с в соответствии с нормальным законом распределения плотности вероятности.

Численное моделирование изменения вибрации МВ по принятому алгоритму показывает, что плотность распределения СКЗ виброскорости МВ через год будет иметь вид, показанный на рис. 9.

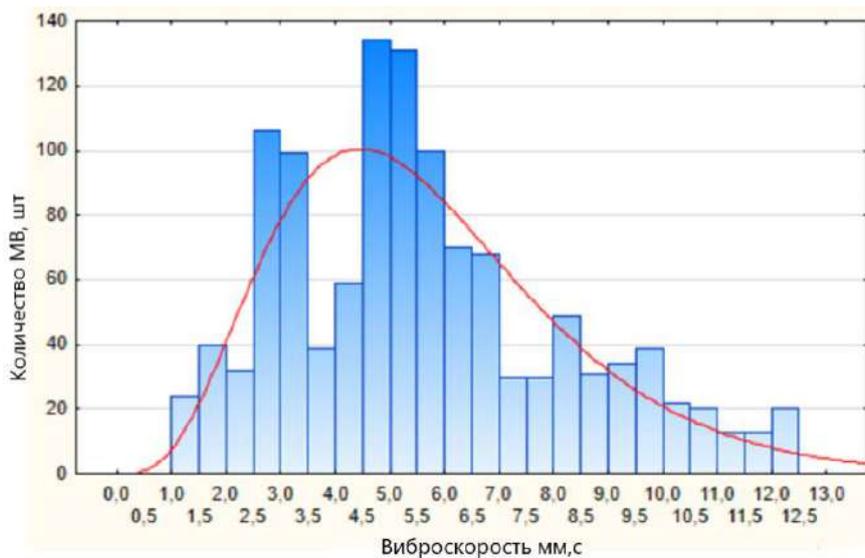
Характеристика распределения изменилась и близка к гамма-распределению: МО ( $\mu$ ) = 5,8 мм/с; СКО ( $\sigma$ ) = 3,2 мм/с. МО и дисперсия несколько увеличились. Число МВ с невысокой вибрацией растет, однако уровень средней вибрации основной массы МВ ввиду износа также увеличился.

Численное моделирование (рис. 10) показывает, что после двух лет реализации алгоритма повышения надежности МВ первоначальное логнормальное распределение и гамма-распределение плотности СКЗ виброскорости приблизились к нормальному распределению, которое имеет характерный двухвершинный вид. Справа распределения сосредоточился массив МВ с высокой вибрацией еще не прошедших ре-

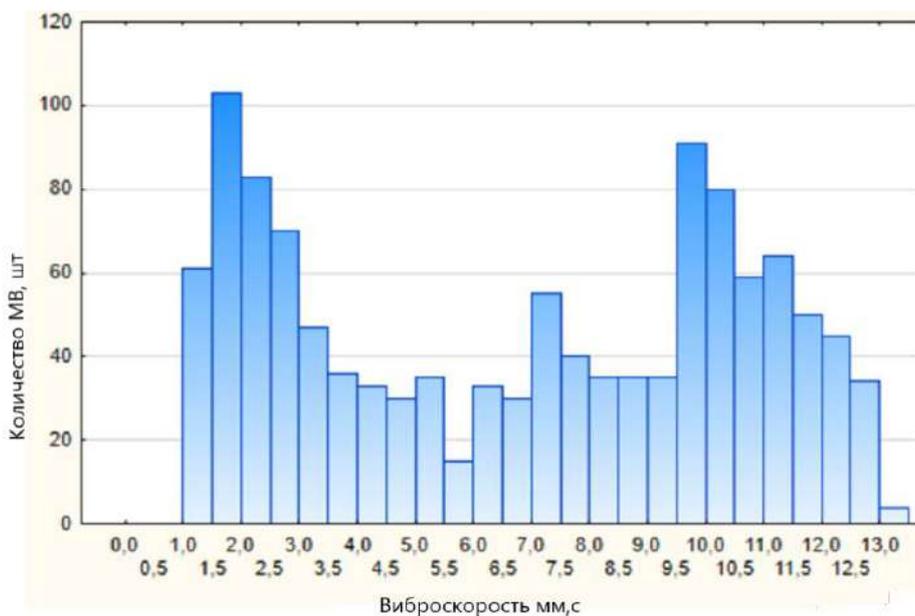


**Рис. 8.** Плотность распределения вероятности увеличения среднеквадратичного значения виброскорости мотор-вентилятора за месяц в зависимости от текущей величины вибрации (степени износа мотор-вентилятора)

**Fig. 8.** The density of the probability distribution of an increase in the root-mean-square value of the vibration velocity of the motor fan per month, depending on the current vibration value (the degree of wear of the motor fan)



**Рис. 9.** Плотность распределения средноквадратичного значения виброскорости парка мотор-вентиляторов через год после реализации алгоритма повышения надежности мотор-вентиляторов  
**Fig. 9.** The distribution density of the root-mean-square value of the vibration velocity of the motor-fan fleet one year after the implementation of the algorithm for improving the reliability of motor-fans



**Рис. 10.** Плотность распределения средноквадратичного значения виброскорости парка мотор-вентиляторов через два года после реализации алгоритма повышения надежности мотор-вентиляторов

(математическое ожидание – 5,8 мм/с, средноквадратичное отклонение – 3,2 мм/с)

**Fig. 10.** The distribution density of the root-mean-square value of the vibration velocity of the motor-fan fleet two years after the implementation of the algorithm for improving the reliability of motor fans (mathematical expectation – 5,8 mm/s, standard deviation – 3,2 mm/s)

монтаж, слева – увеличивающийся массив отремонтированных МВ с невысокой вибрацией.

Через три года реализации повышения надежности плотность распределения СКЗ виброскорости приобрела вид, показанный на рис. 11.

Вид распределения близок к гамма-распределению:  $MO = 2,5$  мм/с,  $СКО = 1,4$  мм/с. Около 40–45 МВ должны выводиться в ремонт ежемесячно. Нормирование вибрации после трех лет реализации данного алгоритма и

далее можно осуществлять в соответствии с ГОСТ ИСО 10816-3-2002 [2].

### Заключение

Таким образом, численное моделирование реализации предложенного в данной статье алгоритма снижения вибрации и повышения надежности работы парка МВ электровозов ВЛ-85, приписанных к ремонтному локомотивному депо «Нижеудинское» доказало свою

осуществимость и эффективность. Это приведет к увеличению межремонтных пробегов МВ, уменьшению неплановых ремонтов, равномерной загрузке ремонтных структур и оборудования. Общее снижение средней вибрации МВ снизит динамические нагрузки на все оборудование электровозов и уменьшит негативное воздействие на здоровье машинистов.

### Список литературы

1. Коробейников А.Б., Сарваров А.С. Анализ существующих методов диагностирования электродвигателей и перспективы их развития // *Электротехнические системы и комплексы*. 2015. № 1 (26). С. 4–9.
2. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15 000 мин<sup>-1</sup>. Введ. 2007–11–01. М. : Стандартинформ, 2007. 14 с.
3. Неразрушающий контроль : справочник. / под ред. В.В. Клюева. Т. 7, кн. 1-2. М. : Машиностроение. 2006. 829 с.
4. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
5. Лукьянов А.В. Проблемы управления техническим состоянием локомотивов по данным неразрушающего контроля и диагностики // *Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте : материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ.* Красноярск, 2005. Т. 2. С. 464–472.
6. Русов В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. Пермь : Вибро-Центр, 2012. 198 с.
7. Ширман А.Р., Соловьёв А.Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М. : Наука, 1996. 276 с.
8. Лукьянов А.В., Понаморёва Ю.В. Исследование вибрации вспомогательных машин пассажирских электровозов // *Молодая наука Сибири*. 2020. № 4 (10). С. 248–256. URL: [https://mnv.irgups.ru/sites/default/files/articles\\_pdf\\_files/ponamoreva\\_lukyanov.pdf](https://mnv.irgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/ponamoreva_lukyanov.pdf) (дата обращения 26.05.2023).
9. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // *Новости электротехники*. 2005. № 1 (31). URL : <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php> (Дата обращения 26.05.2023).
10. Барков А.В., Борисов А.А. Современные возможности диагностирования машин с электроприводом по току двигателя // *Металлургические процессы и оборудование*. 2013. № 1 (31). С. 61–65.
11. Вольдек А.И. Электрические машины. Л. : Энергия, 1978. 832 с.
12. Воробьев Н.П., Суханкин Г.В., Герцен Н.Т. Методы и приборы диагностирования изоляции асинхронных двигателей // *Ползуновский Вестник*. 2011. № 2-2. С. 261–269.
13. Бобров В.В., Хомутов С.О. Использование метода вихретокового контроля для определения технического состояния асинхронных электродвигателей // *Ползуновский Вестник*. 2011. № 2-2. С. 65–71.
14. Сурков Д.В. Электромагнитные способы определения эксцентриситета и несимметрии короткозамкнутой клетки ротора асинхронных двигателей : дис. ... канд. техн. наук. Оренбург, 2008. 126 с.
15. Диагностика и прогнозирование состояния асинхронных двигателей на основе использования параметров их внешнего электромагнитного поля / А.Ю. Алексеенко, О.В. Бродский, В.Н. Веденеев и др. // *Вестник Алтай. гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова*. 2006. № 2. С. 24–27.
16. Исследование внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя / В.Е. Вавилов, Д.Ю. Пашали, И.Ф. Саяхов и др. // *Вестник УГАТУ*. 2016. Т. 20. № 1 (71). С. 122–127.
17. Лукьянов А.В., Мухачев Ю.С., Бельский И.О. Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей // *Системы. Методы. Технологии*. 2014. № 2 (22). С. 61–69.
18. Герцен Н.Т. Акустическая диагностика изоляции обмоток асинхронных двигателей в сельскохозяйственном производстве : дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2007. 152 с.

### References

1. Korobeinikov A.B., Sarvarov A.S. Analiz sushchestvuyushchikh metodov diagnostirovaniya elektrodvigateli i perspektivy ikh razvitiya [Analysis of existing methods for diagnosing electric motors and prospects for their development]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes], 2015, no. 1 (26), pp. 4–9.
2. GOST ISO 10816-3-2002. Vibratsiya. Kontrol' sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmerenii vibratsii na nevrashchayushchikhsya chastyakh. Ch. 3. Promyshlennyye mashiny nominal'noi moshchnost'yu bolee 15 kVt i nominal'noi skorost'yu ot 120 do 15 000 min<sup>-1</sup> [State Standard ISO 10816-3-2002. Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15000 r/min when measured in situ]. Moscow: Standartinform Publ., 2007. 14 p.

3. Nerazrushayushchii kontrol': spravochnik v 8 t. T. 7 (v 2-kh knigakh) [Non-destructive testing: handbook in 8 vol. Vol. 7 (in 2 books)]. Ed. by. Klyuev V.V. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005. 829 p.
4. Shubov I.G. Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin [Noise and vibration of electrical machines]. Leningrad: Ehnergoatomizdat Publ., 1986. 208 p.
5. Luk'yanov A.V. Problemy upravleniya tekhnicheskim sostoyaniem lokomotivov po dannym nerazrushayushchego kontrolya i diagnostiki [Problems of managing the technical condition of locomotives according to non-destructive testing and diagnostics]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Resursoberegayushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation «Resource-saving technologies in railway transport»]. Krasnoyarsk, 2005, vol. 2, pp. 464–472.
6. Rusov V.A. Diagnostika defektov vrashchayushchegosya oborudovaniya po vibratsionnym signalam [Diagnostics of rotating equipment defects by vibration signals]. Perm': Vibro-Tsentr Publ., 2012. 198 p.
7. Shirman A.R., Solov'ev A.B. Prakticheskaya vibrodiagnostika i monitoring sostoyaniya mekhanicheskogo oborudovaniya [Practical vibration diagnostics and monitoring of the state of mechanical equipment]. Moscow: Nauka Publ., 1996. 276 p.
8. Luk'yanov A.V., Ponamoreva Yu.V. Issledovanie vibratsii vspomogatel'nykh mashin passazhirskikh elektrovozov [Investigation of vibration of auxiliary machines of passenger electric locomotives]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2020, no. 4 (10), pp. 248–256.
9. Petukhov V.S., Sokolov V.A. Diagnostika sostoyaniya elektrodvigatelei. Metod spektral'nogo analiza potreblaemogo toka [Diagnostics of the state of electric motors. The method of spectral analysis of the consumed current]. *Novosti elektrotekhniki* [Bulletins of electrical engineering], 2005, no. 1 (31). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php> (Accessed May 26, 2023).
10. Barkov A.V., Borisov A.A. Sovremennye vozmozhnosti diagnostirovaniya mashin s elektroprivodom po toku dvigatelya [Modern possibilities of diagnosing machines with electric motor current]. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie* [Metallurgical processes and equipment], 2013, no. 1 (31), pp. 61–65.
11. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Leningrad: Energiya Publ., 1978. 832 p.
12. Vorob'ev N.P., Sukhankin G.V., Gertsen N.T. Metody i pribory diagnostirovaniya izolyatsii asinkhronnykh dvigatelei [Methods and devices for diagnosing isolation of asynchronous motors]. *Polzunovskii Vestnik* [Bulletin's Polzunov I.I.], 2011, no. 2-2, pp. 261–269.
13. Bobrov V.V., Khomutov S.O. Ispol'zovanie metoda vikhretokovogo kontrolya dlya opredeleniya tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnykh elektrodvigatelei [Using the eddy current control method to determine the technical condition of asynchronous electric motors]. *Polzunovskii Vestnik* [Bulletin's Polzunov I.I.], 2011, no. 2-2, pp. 65–71.
14. Surkov D.V. Elektromagnitnye sposoby opredeleniya ekscentriciteta i nesimmetrii korotkozamknutoi kletki rotora asinkhronnykh dvigatelei [Electromagnetic methods for determining the eccentricity and asymmetry of a short-circuited rotor cage of asynchronous motors]. Ph.D.'s thesis. Orenburg, 2008, 126 p.
15. Alekseenko A.Yu., Brodskii O.V., Vedeneev V.N., Tonkikh V.G., Khomutov S.O. Diagnostika i prognozirovaniye sostoyaniya asinkhronnykh dvigatelei na osnove ispol'zovaniya parametrov ikh vneshnego elektromagnitnogo polya [Diagnostics and prediction of the state of asynchronous motors based on the use of parameters of their external electro-magnetic field]. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I.I. Polzunova* [Bulletin of the Altai State Technical University named after I.I. Polzunov], 2006, no. 2, pp. 24–27.
16. Vavilov V.E., Pashali D.Yu., Sayakhov I.F., Aiguzina V.V. Issledovanie vneshnego magnitnogo polya asinkhronnogo elektrodvigateleya [Investigation of the external magnetic field of an asynchronous electric motor]. *Vestnik UGATU* [Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University], 2016, vol. 20, no. 1 (71), pp. 122–127.
17. Luk'yanov A.V., Mukhachev Yu.S., Bel'skii I.O. Issledovanie kompleksa parametrov vibratsii i vneshnego magnitnogo polya v zadachakh diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigatelei [Investigation of the complex parameters of vibration and external magnetic field in the problems of diagnostics of asynchronous electric motors]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2014, no. 2 (22), pp. 61–69.
18. Gertsen N.T. Akusticheskaya diagnostika izolyatsii obmotok asinkhronnykh dvigatelei v sel'skokhozyaistvennom proizvodstve [Acoustic diagnostics of insulation of windings of asynchronous motors in agricultural production]. Ph.D.'s thesis. Barnaul, 2007. 152 p.

### Информация об авторах

**Лукьянов Анатолий Валерианович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: loukian@inbox.ru.  
**Каимов Евгений Витальевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: Eugen-Kaimov@yandex.ru.

### Information about the authors

**Anatolii V. Luk'yanov**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: loukian@inbox.ru.  
**Evgenii V. Kaimov**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Building Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: Eugen-Kaimov@yandex.ru.

## Исследование влияния контролируемых утечек воздуха на тормозную магистраль грузового поезда

Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов, А.В. Ромашов, Д.О. Емельянов✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉emelyanovdenis1995@mail.ru

### Резюме

Одним из перспективных направлений развития железнодорожного транспорта как отрасли в целом является углубленное изучение и рассмотрение вопросов, направленных на повышение эффективности работы тормозных систем в пассажирских и грузовых поездах. Опыт последних лет демонстрирует четко сложившуюся тенденцию, вектор которой – модернизация тормозных систем поездов, а также отдельных узлов и устройств. Выявление локальных проблемных мест и последующее устранение обнаруженных недостатков в работе пневматических тормозов позволяют с уверенностью говорить о повышении общей надежности автотормозов и росте эффективности их работы. В данной статье авторами рассмотрены утечки, возникающие в тормозной сети поезда, причины их возникновения, а также их влияние на общую обеспеченность поезда автотормозами. При проведении исследования отдельно выделен вопрос плотности тормозной магистрали поезда. Обозначен ряд незначительных на первый взгляд конструктивных недостатков тормозной системы грузового поезда, которые непосредственно отражаются на эффективности ее работы. В ходе проведения анализа в статье была рассмотрена возможность внедрения внешнего устройства регулировки плотности тормозной магистрали поезда путем создания контролируемой утечки. По результатам проведенных опытных испытаний сформирован отчет о работе устройства. Получены данные, позволяющие установить влияние контролируемой непроизводительной локальной утечки сжатого воздуха на работу тормозного оборудования и тормозной системы грузового поезда в целом.

### Ключевые слова

железнодорожный транспорт, утечка сжатого воздуха, плотность тормозной магистрали, тормозное оборудование, опробование тормозов, анализ, подвижной состав

### Для цитирования

Исследование влияния контролируемых утечек воздуха на тормозную магистраль грузового поезда / Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов, А.В. Ромашов, Д.О. Емельянов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78).С. 127–138. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).127-138.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 17.05.2023 г.; поступила после рецензирования: 26.06.2023 г.; принята к публикации: 27.06.2023 г.

## Investigation of the effect of controlled air leaks on the brake line of a freight train

E.Yu. Dul'skii, P.Yu. Ivanov, A.V. Romashov, D.O. Emel'yanov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉emelyanovdenis1995@mail.ru

### Abstract

One of the promising areas of development of railway transport, as an industry in general, is an in-depth study and consideration of issues aimed at the efficiency of braking systems. The recent years' experience demonstrates a clear trend, its vector being the modernization of train braking systems, as well as of individual components and devices. The identification of local problem areas and the subsequent elimination of the identified shortcomings in the operation of pneumatic brakes allow to speak with confidence about improving the overall reliability of auto brakes and the efficiency of their work. In this article, the authors consider leaks that occur in the train's braking network, the causes of their occurrence, as well as their impact on the overall provision of the train with auto brakes. During the study, the issue of the of the train's brake line density was singled out separately. A number of insignificant, at first glance, structural disadvantages of the freight train braking system are indicated, directly affecting the efficiency of its operation. During the analysis, in the article the possibility was considered of introducing an External device for adjusting the density of the train brake line by creating a controlled leak. Based on the results of the experimental tests, a report on the operation of the device was formed. Data have been obtained to establish the effect of controlled, unproductive, local leakage of compressed air on the operation of braking equipment and the braking system of a freight train as a whole.

### Keywords

railway transport, compressed air leakage, brake line density, brake equipment, brake testing, analysis, rolling stock

**For citation**

Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Romashov A.V., Emel'yanov D.O. Issledovanie vliyaniya kontroliruemykh utechek vozdukh na tormoznyuyu magistral' gruzovogo poezda [Investigation of the effect of controlled air leaks on the brake line of a freight train]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 127–138. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).127-138.

**Article Info**

Received: May 17, 2023; Revised: June 26, 2023; Accepted: June 27, 2023.

**Введение**

Для целостного понимания особенностей проверки плотности тормозной магистрали поезда введем и дадим пояснение следующим терминам:

1. Непроизводительная утечка сжатого воздуха – утечка сжатого воздуха, не приводящая к срабатыванию тормозного оборудования в составе поезда.

2. Производительная утечка сжатого воздуха – утечка сжатого воздуха, приводящая к срабатыванию тормозного оборудования в составе поезда.

3. Контролируемая утечка сжатого воздуха – утечка сжатого воздуха, создаваемая машинистом посредством крана машиниста, приводящая к срабатыванию тормозного оборудования в составе поезда.

4. Неконтролируемая утечка сжатого воздуха – утечка сжатого воздуха как в соединениях тормозной магистрали и тормозного оборудования локомотивов и вагонов, так и в самом тормозном оборудовании, которая может быть производительной или непроизводительной.

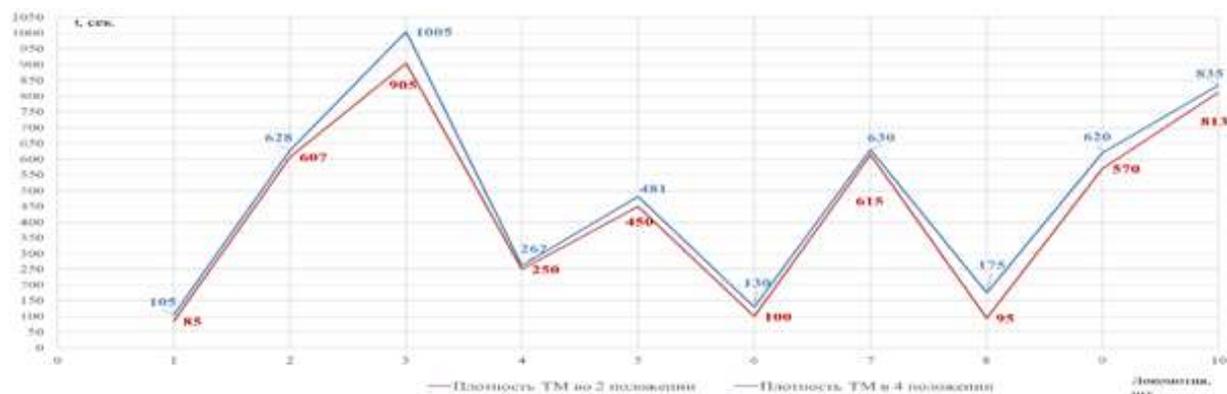
5. Темп утечки сжатого воздуха – падение давления в тормозной магистрали поезда, измеряемое в МПа/мин.

6. Пульсирующая утечка сжатого воздуха

– утечка сжатого воздуха с непостоянным темпом, которая может быть производительной или непроизводительной.

**Исследования плотности тормозной сети поезда**

Одним из основных факторов, обеспечивающих безопасность движения на железнодорожном транспорте, является безотказная и эффективная работа тормозных систем [1]. Опираясь на это, современная наука ставит перед собой задачу математического моделирования тормозных процессов, всесторонне учитывающего ряд факторов, напрямую и косвенно влияющих на характер торможения поезда [2]. Тщательная подготовка и проверка работоспособности тормозных систем перед эксплуатацией является неотъемлемой частью перевозочного процесса [3]. Следовательно, необходимо уделить особое внимание полному и неполному опробованию тормозов при рассмотрении данных вопросов, качество которых напрямую зависит от человеческого фактора [4]. Было проведено исследование технологии сокращенного и полного опробования тормозов, замерены показания плотности тормозной сети поезда во II и IV положениях управляющего органа крана машиниста (далее – во II и



**Рис. 1.** Значения плотности тормозной сети поезда во II и IV положениях управляющего органа крана машиниста

**Fig. 1.** The train's braking network density values in the II and IV position of the operator's crane control body of the operator's crane control body

IV положениях) в 100 справках формы ВУ-45.

В результате выявлено следующее: в поездах от 75 до 100 % оборудованных безрезьбовыми соединениями тормозной магистрали и тормозного оборудования при проведении сокращенного опробования тормозов от локомотивов серии 3ЭС5К, 2ЭС5К плотность тормозной сети поезда во II и IV положениях достигает в среднем 301/330 сек [5] (рис. 1). Это увеличивает время сокращенного опробования тормозов с 17 до 25,5–27 мин., а в отдельных случаях – до 38 мин.

Для устранения рисков возникновения технологического нарушения (превышение нормы времени на торможение) была рассмотрена возможность внедрения внешнего устройства регулировки плотности тормозной магистрали поезда путем создания контролируемой утечки (УКУС-ТМ).

#### **Требования к элементам тормозного оборудования вагонов, применяемых при проектировании и изготовлении УКУС-ТМ**

В ходе разработки прототипа были сформулированы технические требования к элементам тормозной системы вагона, соблюдение которых обеспечивает штатную работу внедряемого устройства.

Наконечник соединительных рукавов, модернизированный для УКУС-ТМ, может изготавливаться из ковкого чугуна марок КЧ30-6-Ф, КЧ33-8-Ф, КЧ35-10-Ф по ГОСТ 1215; высокопрочного чугуна ВЧ40, ВЧ45 по ГОСТ 7293. Допускается изготовление из стали марок 20, 30, 40, 45 по ГОСТ 1050.

При испытаниях по стойкости к воздействию внешних механических воздействующих факторов должны достигаться их максимальные (предельные) значения по ГОСТ 30631.

Изделия с наружным номинальным диаметром до 45 мм, резиноармированные изделия, уплотнители (уплотнения) испытаниям на морозостойкость не подвергают [6]. Их морозостойкость в полной мере гарантирует изготовитель.

Устройство контролируемой утечки систем тормозных магистралей должно работать при качестве сжатого воздуха, соответствующего шестому классу загрязненности по ГОСТ 17433.

При расчетах утечки необходимо учитывать объем сжатого воздуха в тормозной маги-

страли поезда [7], для этого примем средний размер поезда в условных единицах  $m_b = 65$  с объемом тормозной магистрали в одной условной единице  $V_b = 0,0126 \text{ м}^3$  (12,6 л). Таким образом, вычислим объем тормозной магистрали в поезде по формуле (1):

$$V_{\text{ТМ}} = m_b \cdot V_b. \quad (1)$$

$$V_{\text{ТМ}} = 65 \cdot 0,0126 = 8,19 \text{ м}^3 \text{ (8 190 л)}.$$

Срабатывание тормозного оборудования вагонов не происходит при падении давления в тормозной магистрали поезда 0,1 МПа/мин., следовательно, диаметр отверстия не может превышать 1,8 мм.

В результате исследований, подтвержденных многолетней практикой, установлена оптимальная норма утечек из тормозной магистрали поезда – 0,02 МПа/мин.

Замеры плотности на локомотивах серии 2С5К и 3С5К показывают, что плотность тормозной магистрали поезда, оборудованного 75–100 % безрезьбовыми соединениями, составляет в среднем 301 сек во II положении управляющего органа крана машиниста и 330 сек в IV положении [8, 9]. Данная плотность тормозной магистрали поезда возможна при утечке воздуха 0,0102 МПа/мин.

Для контроля утечки воздуха из тормозной магистрали поезда было разработано устройство УКУС-ТМ, создающее утечку воздуха 0,01 МПа/мин.

При расчетах утечки используем известные показатели утечки воздуха из тормозной магистрали поезда, создаваемой при ликвидации сверхзарядки через отверстие диаметром 1,8 мм равное 0,1 МПа/мин. [10].

Непроизводительные утечки сжатого воздуха из тормозной магистрали рассчитываются по формуле (2):

$$m_{\text{ут}} = b \cdot F_y \cdot \sqrt{p_1 / V_1}, \quad (2)$$

где  $m_{\text{ут}}$  – непроизводительные утечки сжатого воздуха, кг/с;  $p_1$  – давление в тормозной магистрали, МПа;  $v_1$  – удельный объем воздуха в воздухопроводе, м<sup>3</sup>/кг;  $F_y$  – сечение выпускного отверстия, м<sup>2</sup>;  $b = 0,686$  – const.

Можно сделать вывод, что непроизводительные утечки сжатого воздуха прямо пропорциональны сечению выпускного отверстия [11].

Сечение отверстия диаметром 1,8 мм составляет 2,54469 мм<sup>2</sup>, следовательно, для утечки 0,01 МПа необходимо отверстие с площадью сечения в 10 раз меньше. Отверстие, близкое к

необходимому сечению, равно  $0,255176 \text{ мм}^2$  при диаметре  $0,57 \text{ мм}$ .

В результате выпускное отверстие диаметром  $0,57 \text{ мм}$  обеспечит постоянную утечку воздуха, не превышающую  $0,01 \text{ МПа/мин}$ .

### **Организация работы парка отправления грузовых поездов с использованием УКУС-ТМ на примере четного парка отправления ст. Тайшет эксплуатационного вагонного депо Тайшет (ВЧДЭ-13)**

После разработки устройства и формирования технических требований к тормозному оборудованию вагона, учитывающих особенности наличия устройства в тормозной системе, авторами статьи даны рекомендации по оптимальной организации работы производственного контингента после внедрения УКУС-ТМ.

После окончания полного опробования автотормозов и устранения выявленных неисправностей осмотрщик-ремонтник каждой группы обязан передать данные по своей группе вагонов оператору для заполнения справки об обеспечении поезда тормозами и исправном их действии, а именно:

- количество ручных тормозов в осях;
- количество (в процентах) в группе вагонов композиционных колодок;
- количество воздухораспределителей, включенных на предварительную величину тормозного нажатия своей группы вагонов;
- количество (в процентах) вагонов с безрезьбовыми соединениями тормозной магистрали и тормозного оборудования [12].

Осмотрщик-ремонтник седьмой (хвостовой) группы дополнительно передает следующие данные:

- номер хвостового вагона;
- величину выхода штока тормозного цилиндра в хвостовом вагоне;
- время отпуска двух хвостовых вагонов;
- окончание технического обслуживания [13].

Подъезжая к составу, машинист останавливает локомотив за  $10\text{--}15 \text{ м}$  от первого вагона. Осмотрщик вагонов или работник, на которого эта обязанность возложена, должен убедиться в исправной работе автосцепки и нормальном положении рычага расцепного механизма автосцепки первого вагона.

До соединения концевых рукавов магистралей между локомотивом и первым вагоном

осмотрщик вагонов или работник, на которого эта обязанность возложена, должен сообщить машинисту следующую информацию:

- состояние тормозной магистрали состава поезда (заряжена или незаряжена);
- наличие в составе грузового поезда пассажирских вагонов, локомотивов и вагонов моторвагонного подвижного состава;
- количество порожних и груженых вагонов и их загрузка;
- вагоны с выключенными тормозами;
- количество (в процентах) вагонов в составе поезда с безрезьбовыми соединениями тормозной магистрали и тормозного оборудования [14].

Помощник машиниста после прицепки локомотива к составу и перехода машиниста в рабочую кабину при выключенном источнике питания электропневматического тормоза (при наличии) по команде машиниста обязан трехкратным открытием крана через концевой рукав продуть тормозную магистраль локомотива со стороны состава, соединить рукава тормозной, а при необходимости и питательной магистралей между локомотивом и первым вагоном, перевести УКУС-ТМ в рабочее положение при наличии в составе поезда  $75\text{--}100 \%$  безрезьбовых соединений тормозной магистрали и тормозного оборудования, открыть концевой кран сначала у локомотива, а затем у вагона.

Головной осмотрщик по сокращенному опробованию тормозов выписывает данные всех осмотрщиков-ремонтников бригады, справку об обеспечении поезда тормозами и исправном их действии с отметкой безрезьбовых соединений в количестве  $75\text{--}100 \%$  [15].

### **Испытание УКУС-ТМ, выполненного в западной горловине нечетного парка отправления ст. Тайшет ВЧДЭ-13**

После проведенных эксплуатационных испытаний, состоящих в пробовании устройства УКУС-ТМ, был составлен подробный отчет с его результатами, а также получена экспертная оценка созданной комиссии по работе данного устройства.

В состав комиссии были включены: главный инженер ВЧДЭ-13 – И.А. Шарафутдинов; начальник технического отдела ВЧДЭ-13 – С.А. Смушкин; мастер ВЧДЭ-13 – А.В. Ромашов. Комиссией был составлен акт о нижеследующем:

1. УКУС-ТМ установлен на головной вагон состава грузовых вагонов (род вагонов – полувагоны, состав однородный, количество осей – 288), на 27 пути ПТО-2 ст. Тайшет с соблюдением правил технической эксплуатации и норм охраны труда (рис. 2).

2. Проведены испытания влияния контролируемой непроизводительной утечки сжатого

воздуха из системы тормозной магистрали состава поезда, запитанной от установки автоматизированной системы диагностики тормозов АСДТ-5К (рис. 3).

3. В ходе испытаний устройства получены и зафиксированы данные по созданным контролируемым утечкам сжатого воздуха, заданных диаметром технологического отверстия (табл. 1).

Таблица 1. Данные испытаний

Table 1. Test data

№	Диаметр технического отверстия, мм Technical hole diameter, mm	Контролируемые параметры тормозной магистрали Controlled parameters of the brake line		
		Плотность, сек Density, sec	Падение плотности от номинального значения Density drop from nominal value	
			Сек Sec	%
1	0	58	0	0
2	1	52	6	10,35
3	2	45	13	22,42
4	3	39	19	32,76
5	5	20	38	65,52



Рис. 2. Фото УКУС-ТМ, установленного на головной вагон состава грузовых вагонов

Fig. 2. Photo of device for controlled leakage of brake line systems mounted on the head wagon of a freight train



Рис. 3. Автоматизированная система диагностики тормозов

Fig. 3. Automated brake diagnostics system

Полученные в ходе испытаний данные зафиксированы в отчете автоматизированной системы диагностики тормозов АСДТ-5К (рис. 4). В ходе испытаний проводилась видео фиксация работы тормозного оборудования.

По окончании испытаний члены комиссии ознакомились с результатами воздействия контролируемой утечки сжатого воздуха из тормозной сети грузового поезда на 27 пути ПТО-2 ст. Тайшет на работу автотормозного оборудования грузовых вагонов.

По результатам совещания комиссия постановила следующее:

1. УКУС-ТМ требует дальнейшей доработки в части изменения конструкции с целью возможности регулирования контролируемой утечки в диапазонах, не приводящих к срабатыванию автотормозного оборудования вагонов.

2. Требуется испытание УКУС-ТМ на подвижном составе с задействованием локомотива и локомотивной бригады, так как установка АСДТ-5К обеспечивает измерение и фиксацию данных о плотности тормозной сети поезда до 90 сек, что не может обеспечить корректность получаемых в ходе испытания данных о процентном снижении плотности тормозной сети поезда (табл. 2).

Учитывая первое опытное испытание УКУС-ТМ на грузовом подвижном составе, опробование устройства можно считать успешным. По предписанию производственной комиссии указаны недоработки, касающиеся расширения функциональной составляющей устройства, а также назначены дальнейшие опытные испытания по внедрению устройства в тормозную систему поезда.

#### **Влияние локальной контролируемой утечки сжатого воздуха на работу тормозного оборудования грузового вагона**

В вопросе эффективности и качества функционирования тормозной системы поезда рассмотрена возможность замены резьбовых соединений в тормозном оборудовании вагонов и локомотивов на безрезьбовые [16]. Предназначение таких соединений заключается в сообщении разобщительных и концевых кранов, запасных резервуаров, авторежимов, тормозных цилиндров, воздухораспределителей с подводящими трубами и самих труб между собой без нарезки резьбы на трубах в тормозных пневматических системах. Они также необходимы для соединения трубопровода тормозной магистрали с одновременным его креплением к раме грузо-

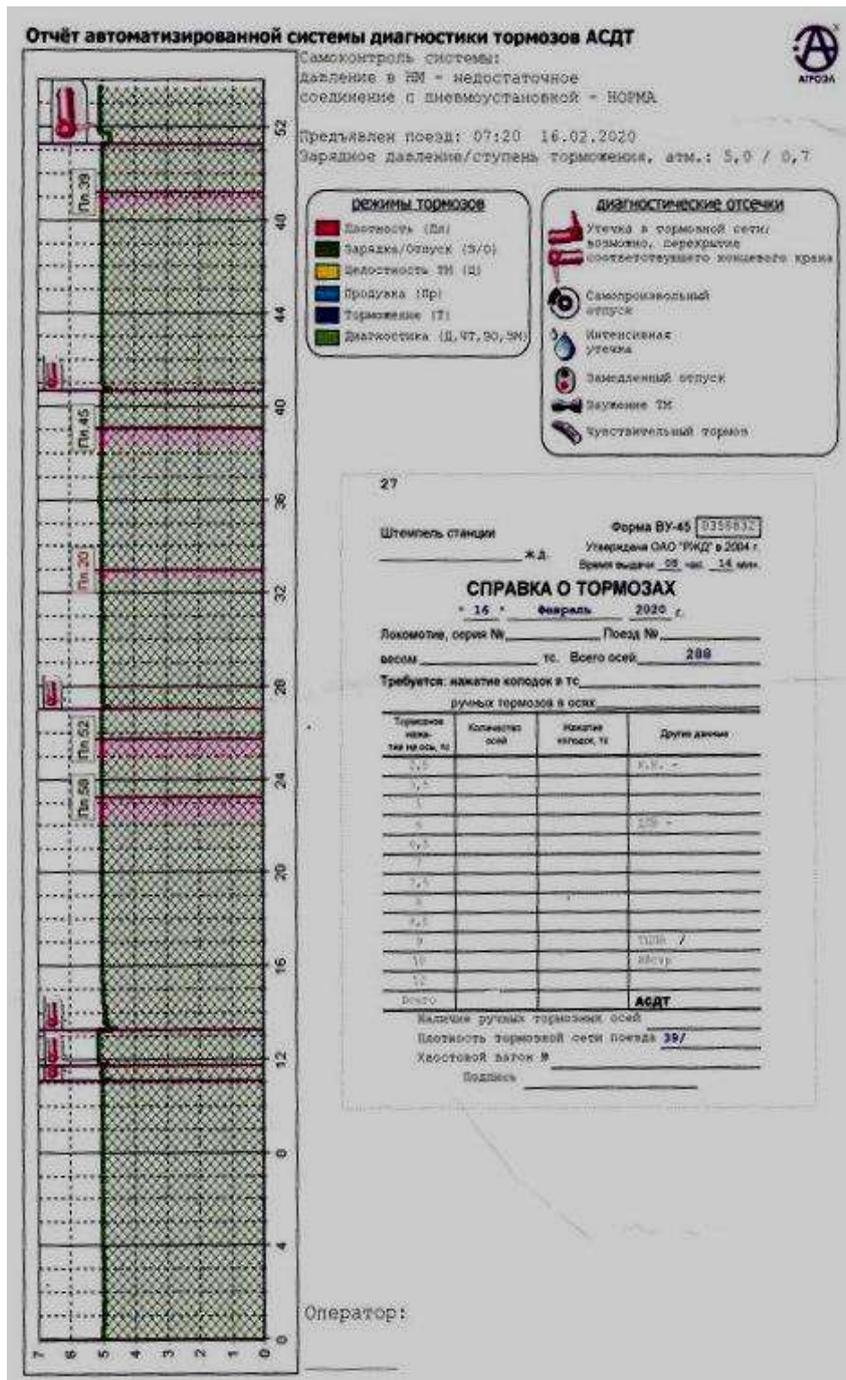


Рис. 4. Отчет автоматизированной системы диагностики тормозов АСДТ-5К

Fig. 4. Report of automated brake diagnostics system ASDT-5K

вого вагона и оборудованию локомотивов [17].

Данные соединения обладают следующими характеристиками:

- интервал рабочих температур окружающего воздуха, не нарушающий работоспособность безрезьбовых соединений, от  $-600\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- соединения безрезьбовые должны со-

хранять работоспособность после кратковременного (4 ч) воздействия температуры  $1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

- назначенный срок службы соединений безрезьбовых – 20 лет;
- назначенный срок службы уплотнительных элементов – 6 лет;
- гарантийный срок эксплуатации и хра-

нения – 6 лет с даты выпуска безрезьбового соединения;

– должна быть обеспечена герметичность материалов деталей при затяжке накладных гаек моментом при максимальном рабочем давлении

1,0 ± 0,02 МПа.

При значительных улучшениях эксплуатационных характеристик и повышении надежности работы тормозной системы поездов в целом, в процессе эксплуатации вскрыт ряд недо-

**Таблица 2.** Сравнительная характеристика соединений  
**Table 2.** Comparative characteristics of joints

Наименование соединения Joint name	Номер соединения Joint sequence number	Наружный диаметр присоединяемых труб, мм External diameter of connected pipes, mm	Момент затяжки накладных гаек соединений безрезьбовых, Н · м Union nuts torque of threadless connections, N · m	Применяемость Applicability
Штуцер Union	4370	27 ± 0,3	150 ± 15	Соединение труб с резервуаром №295 воздухораспределителя грузового вагона Pipe connection with tank No. 295 of freight wagon air distributor
Ниппель Nipple	4371	27 ± 0,3	150 ± 15	Соединение труб с разобщительным краном грузового вагона, запасным резервуаром, тормозным цилиндром, авторежимом Pipe connection with uncoupling valve of a freight wagon, spare tank, brake cylinder, auto mode
Штуцер в сборе Union complete	4374	42 ± 0,4	200 ± 20	Соединения трубопровода тормозной магистрали с концевым краном Brake pipeline connections with end valve
Тройник Tee	4375	42 ± 0,4	200 ± 20	Соединение трубопровода тормозной магистрали с одновременным креплением его на раме грузового вагона и соединением с отводом к воздухораспределителю Brake pipeline connection with its simultaneous fastening on the frame of a freight wagon and connection with a branch to the air distributor
		–	150 ± 15	
Тройник в сборе Tee complete	4375-01	42 ± 0,4	200 ± 20	Соединение трубопровода тормозной магистрали с одновременным креплением его на раме грузового вагона и соединением с разобщительным краном Brake pipeline connection with its simultaneous fastening on the frame of a freight wagon and connection with a branch to the air distributor
		–	150 ± 15	
Ниппель Nipple	4378	–	–	Соединение тройника с разобщительным краном грузового вагона Tee connection with release valve of a freight wagon
Муфта Clutch	4379	42 ± 0,4	200 ± 20	Соединение труб между собой Connecting tubes to each other
Муфта Clutch	4379-1	27 ± 0,3	150 ± 15	Соединение труб между собой Connecting tubes to each other

статков [18]. Так, при высокой плотности, достигнутой безрезьбовыми соединениями (рис. 5), влага в воздухе, поступающем в тормозную систему, не удаляется через естественные микроутечки по причине их отсутствия. В период низких температур воздуха в тормозную систему водный конденсат попадает в виде ледяной пыли и по причине отсутствия естественных (для резьбовых соединений) микроутечек в максимальном количестве попадает в приборы воздухораспределителей вагонов, создавая большую нагрузку на средства фильтрации и тормозное оборудование вагона в целом (вымывание смазочных материалов, ведущее к эрозии металлов и других элементов тормозного оборудования).

Высокая плотность тяговой магистрали приводит к ложному срабатыванию датчика ТМ-418 в пути следования, спровоцированного неисправностями и несовершенством конструкции отдельных вагонов [19].

В поезде с высокой плотностью уравнильный поршень (рис. 6) находится в среднем положении, впускной клапан – в закрытом состоянии, поршень неподвижен и инертен к перемещениям для открытия впускного клапана.

Происходит это по причине того, что уравнильному поршню необходимо преодолеть собственную силу трения со стенками уравнильной камеры крана машиниста усл. № 395 [20]. В стабильном положении возникает сила адгезии между манжетой уравнильного поршня и стенками уравнильной камеры крана машиниста.

В ходе испытаний прототипа УКУС-ТМ, установленного на головной вагон состава грузовых вагонов, запитанного от установки автоматизированной системы диагностики тормозов АСДТ-5К, получены следующие сведения,

позволяющие установить влияние контролируемой непроизводительной локальной утечки сжатого воздуха на работу тормозного оборудования и тормозной системы грузового поезда в целом:

1. Влага в воздухе, поступающем в тормозную систему, интенсивно удаляется через утечку, созданную устройством. В период низких температур воздуха данная влага в виде ледяной пыли также будет удаляться через отверстие, сообщающее тормозную магистраль с окружающим воздухом, снизится нагрузка на средства фильтрации и тормозное оборудование вагона в целом (вымывание смазочных материалов, ведущее к эрозии металлов и других элементов тормозного оборудования) до 60 %.

2. Пульсирующие утечки – утечки, вызванные неисправностями и локальными неисправностями в работе тормозного оборудования отдельных вагонов при искусственно сниженной плотности, не приведут к срабатыванию датчика ТМ 418.

3. В поезде с искусственно сниженной плотностью уравнильный поршень крана машиниста (см. рис. 5) опущен вниз, а впускной клапан открыт для компенсации утечек тормозной магистрали из питательной магистрали локомотива.

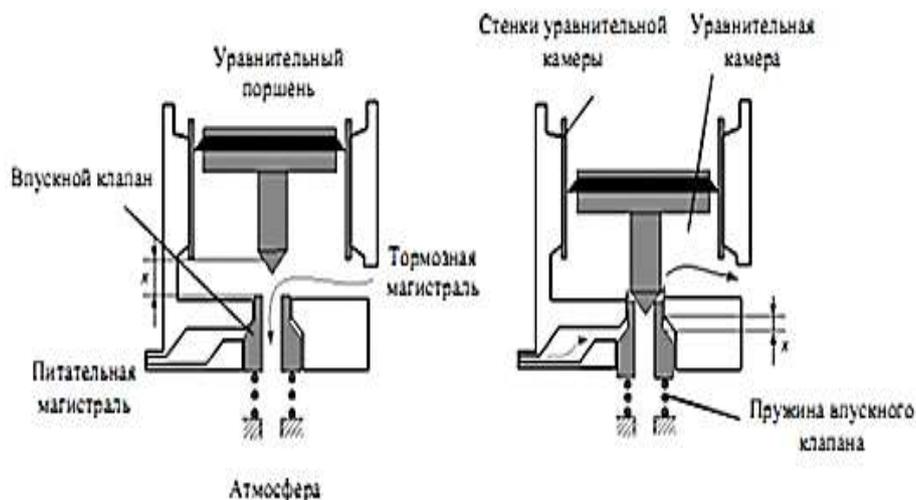
4. Добавочная разрядка для крана машиниста становится дополнительной утечкой, которая без скачкообразного изменения давления компенсируется через открытый впускной клапан.

## Заключение

В данной статье авторами рассмотрены утечки, возникающие в тормозной сети поезда, причины их возникновения, а также их влияние на общую обеспеченность поезда автотормозами. В ходе разработки прототипа были сформированы



**Рис. 5.** Безрезьбовые соединения элементов тормозной сети грузового вагона в разрезе  
**Fig. 5.** Threadless connections of the elements of the braking network of a freight wagon in the section



**Рис. 6.** Уравнительная часть крана машиниста усл. № 395  
( $x$  – величина кольцевого зазора между впускным клапаном и седлом поршня, который реализует сообщение тормозной магистрали с питательной магистралью)

**Fig. 6.** The equalizing part of the crane operator cond. No 395  
( $x$  is the value of the annular gap between the intake valve and the piston seat, which implements the communication of the brake line with the feed line)

рованы технические требования к элементам тормозной системы вагона, соблюдение которых обеспечивает штатную работу внедряемого устройства. После разработки устройства и формирования технических требований к тормозному оборудованию вагона, учитывающих особенности наличия устройства в тормозной системе. Авторами статьи даны рекомендации по оптимальной организации работы производственного

контингента после внедрения УКУС-ТМ. Успешно проведены эксплуатационные испытания, состоящие в апробации работы УКУС-ТМ. В вопросе эффективности и качества функционирования тормозной системы поезда рассмотрена возможность замены резьбовых соединений в тормозном оборудовании вагонов и локомотивов на безрезьбовые соединения.

#### Список литературы

1. Иванов П.Ю., Корсун А.А., Емельянов Д.О. Существующие способы управления тормозным нажатием с повышенной эффективностью // Научные междисциплинарные исследования : сб. ст. XV междунар. науч.-практ. конф. Саратов, 2021. С. 28–36.
2. Математическая модель работы тормозной системы поезда в процессе торможения с учетом динамики коэффициента трения колодки о колесо и сцепления с рельсом в компьютерной среде / А.А. Корсун, П.Ю. Иванов, С.П. Круглов и др. // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2022. № 2 (86). С. 104–113.
3. Мануилов Н.И., Иванов П.Ю., Дульский Е.Ю. Анализ влияния человеческого фактора на безотказную работу тормозного оборудования поездов // Наука вчера, сегодня, завтра. 2016. № 12-2 (34). С. 48–57.
4. Карвацкий Б.Л. Общая теория автотормозов. М. : Трансжелдориздат, 1947. 300 с.
5. Пат. 2744643 Рос. Федерация. Способ опробирования автотормозов в грузовых поездах и устройство для его реализации / А.В. Ромашов, Л.В. Мартыненко, В.Н. Железняк и др. № 2019139509 ; заявл. 03.12.2019 ; опубл. 12.03.2021, Бюл. № 8. 11 с.
6. Об утверждении правил по охране при техническом обслуживании и ремонте грузовых вагонов : распоряжение ОАО «РЖД» № 2423/р от 16.11.2018 г. (ред. 30.09.2022). Доступ из справ.-прав. системы АСПИЖТ в локал. сети.
7. Американские железнодорожные энциклопедии: вагоны / под ред. П.И. Травина. М. : Трансжелдориздат, 1937. 844 с.
8. Иноземцев В.Г., Казаринов В.М., Ясенцев В.Ф. Автоматические тормоза. М. : Транспорт, 1981. 464 с.
9. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава : утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества : протокол от 6-7 мая 2014 г. № 60 (приложение № 18). Доступ из справ.-прав. системы АСПИЖТ в локал. сети.
10. Крылов В.П., Крылов В.В. Автоматические тормоза подвижного состава. М. : Транспорт, 1983. 360 с.
11. Пархомов В.Т. Устройство и эксплуатация тормозов. М. : Транспорт, 1994. 208 с.
12. Ачбегов Н.А., Фокин М.Д., Ясенцев В.Ф. Электропневматические тормоза. М. : Транспорт, 1974. 232 с.
13. Иноземцев В.Г., Абашкин П.В. Тормозное и пневматическое оборудование подвижного состава. М. : Транспорт, 1984. 344 с.

14. Общее руководство по ремонту тормозного оборудования вагонов 732-ЦВ-ЦЛ : утв. на 54-м заседании Совета по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества (п. п. 29.3 п. 1 протокола от 18-19.05.2011 г.). Доступ из справ.-прав. системы АСПИЖТ в локал. сети.
15. Афонин Г.С., Барщеников В.Н., Кондратьев Н.В. Автоматические тормоза подвижного состава. М. : Академия, 2010. 317 с.
16. Асадченко В.Р. Расчет пневматических тормозов железнодорожного подвижного состава. М. : Маршрут, 2004. 120 с.
17. Венцевич Л.Е. Тормоза подвижного состава железных дорог. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2010. 560 с.
18. Крылов В.И., Клыков Е.В., Ясенцев В.Ф. Тормоза подвижного состава. М. : Транспорт, 1980. 271 с.
19. Асадченко В.Р. Автоматические тормоза подвижного состава. М. : Маршрут, 2006. 392 с.
20. Астахов П.Н., Гребенюк П.Т., Скворцова А.И. Справочник по тяговым расчетам. М. : Транспорт, 1973. 256 с.

### References

1. Ivanov P.Yu., Korsun A.A., Emel'yanov D.O. Sushchestvuyushchie sposoby upravleniya tormoznym nazhatiem s povyshennoy effektivnost'yu [Existing methods of brake pressure control with increased efficiency]. *Sbornik statei XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnye mezhdistitsiplinarnye issledovaniya»* [Proceedings of XV International Scientific and Practical Conference «Scientific interdisciplinary research»]. Saratov, 2021, pp. 28–36.
2. Korsun A.A., Ivanov P.Yu., Kruglov S.P., Osipov D.V., Emel'yanov D.O. Matematicheskaya model' raboty tormoznoi sistemy poezda v protsesse tormozheniya s uchetom dinamiki koeffitsienta treniya kolodki o koleso i stsepleniya s rel'som v komp'yuternoi srede [A mathematical model of the operation of the train braking system during braking, taking into account the dynamics of the friction coefficient of the pad on the wheel and the coupling with the rail in a computer environment]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2022, no. 2 (86), pp. 104–113.
3. Manuilov N.I., Ivanov P.Yu., Dul'skii E.Yu. Analiz vliyaniya chelovecheskogo faktora na bezotkaznyuyu rabotu tormoznogo oborudovaniya poezdov [Analysis of the influence of the human factor on the trouble-free operation of train braking equipment]. *Nauka vchera, segodnya, zavtra* [Science yesterday, today, tomorrow], 2016, no. 12-2 (34), pp. 48–57.
4. Karvatskii B.L. Obshchaya teoriya avtotormozov [The general theory of auto brakes]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1947. 300 p.
5. Romashov A.V., Martynenko L.V., Zheleznyak V.N., Kushkov M.G., Sosnov N.Yu. Patent RU 2744643 C1, 12.03.2021.
6. Rasporyazhenie OAO «RZhD» № 2423/r от 16.11.2018 г (red. 30.09.2022) «Ob utverzhdenii pravil po okhrane truda pri tekhnicheskoy obsluzhivaniy i remonte gruzovykh vagonov» [Order of JSC «Russian Railways» No 2423/r dated November 16, 2018 «On approval of the rules on labor protection during maintenance and repair of freight wagons» (ed. September 30, 2022)].
7. Amerikanskije zheleznodorozhnye entsiklopedii: vagony [American railway encyclopedias: wagons]. Ed. By Travin P.I. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1937. 844 p.
8. Inozemtsev V.G., Kazarinov V.M., Yasentsev V.F. Avtomaticheskie tormoza [Automatic brakes]. Moscow: Transport Publ., 1981. 464 p.
9. Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniya tormoznogo oborudovaniya i upravleniya tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: utv. Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva, protokol ot 6-7 maya 2014 g № 60 (prilozhenie № 18) [Rules for the maintenance of brake equipment and brake control of railway rolling stock : approved by the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States, Protocol no 60, dated May 6–7, 2014 (Annex no 18)].
10. Krylov V.P., Krylov V.V. Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava [Automatic brakes of rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1983. 360 p.
11. Parkhomov V.T. Ustroystvo i ekspluatatsiya tormozov [Device and operation of brakes]. Moscow: Transport Publ., 1994. 208 p.
12. Achbegov N.A., Fokin M.D., Yasentsev V.F. Elektropnevmaticheskie tormoza [Electropneumatic brakes]. Moscow: Transport Publ., 1974. 232 p.
13. Inozemtsev V.G., Abashkin P.V. Tormoznoe i pnevmaticheskoe oborudovanie podvizhnogo sostava [Brake and pneumatic equipment of rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1984. 344 p.
14. Obshchee rukovodstvo po remontu tormoznogo oborudovaniya vagonov 732-TsV-TsL: utv. na 54-m zasedanii Soveta po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv – uchastnikov Sodruzhestva (p.p. 29.3 p. 1 protokola ot 18-19.05.2011 g.) [General manual for the repair of braking equipment of wagons 732-TsV-TsL : approved at the 54th meeting of the Council for Railway Transport of the Commonwealth Member States (item 29.3 item 1 of the Protocol dated May 18–19, 2011)].
15. Afonin G.S., Barshchenkov V.N., Kondrat'ev N.V. Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava [Automatic brakes of rolling stock]. Moscow: Akademiya Publ., 2010. 317 p.
16. Asadchenko V.R. Raschet pnevmaticheskikh tormozov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Calculation of pneumatic brakes of rolling stock]. Moscow: Marshrut Publ., 2004. 120 p.
17. Ventsevich L.E. Tormoza podvizhnogo sostava [Brakes of rolling stock of railways]. Moscow: UMTs ZhDT Publ., 2010. 560 p.
18. Krylov V.I., Klykov E.V., Yasentsev V.F. Tormoza podvizhnogo sostava [Brakes of rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1980. 271 p.
19. Asadchenko V.R. Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava [Automatic brakes of rolling stock]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 392 p.
20. Astakhov P.N., Grebenyuk P.T., Skvortsova A.I. Spravochnik po tyagovym raschetam [Handbook of traction calculations]. Moscow: Transport, 1973. 255 p.

**Информация об авторах**

*Дульский Евгений Юрьевич*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: e.dulskiy@mail.ru.

*Иванов Павел Юрьевич*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: savl.ivanov@mail.ru.

*Ромашов Антон Викторович*, аспирант кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: Patifonik@bk.ru.

*Емельянов Денис Олегович*, аспирант кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: emel'yanovdenis1995@mail.ru.

**Information about the authors**

*Evgenii Yu. Dul'skii*, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: e.dulskiy@mail.ru.

*Pavel Yu. Ivanov*, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: savl.ivanov@mail.ru.

*Anton V. Romashov*, Ph.D. student of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: Patifonik@bk.ru.

*Denis O. Emel'yanov*, Ph.D. student of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: emel'yanovdenis1995@mail.ru.

## Исследование показателей эффективности перевозки грузов железнодорожным транспортом вероятностным анализом безубыточности

Ю.М. Краковский✉, И.П. Кудряшов, В.А. Начигин

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉yuri.krakovskiy@yandex.ru

### Резюме

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение вероятностного анализа безубыточности на основе метода Монте-Карло для оценки показателей эффективности перевозки грузов железнодорожным транспортом. Исходными данными для расчета этих показателей являются: грузооборот; постоянные затраты; переменные затраты на единицу грузооборота; средняя цена единицы грузооборота; размер инвестиций. Для оценки эффективности перевозки грузов в статье выбраны: точка безубыточности, операционная прибыль и рентабельность инвестиций. Программное обеспечение вероятностного анализа безубыточности создано на основе метода Монте-Карло с использованием языка программирования Python, описаны его функциональные возможности. В программном обеспечении существует возможность проводить тестирование моделей исходных данных, выводить результаты тестирования, а также результаты обработки выборочных значений, полученных методом Монте-Карло. Особенностью исследования на основе вероятностного анализа безубыточности является учет неопределенности перевозочного процесса железнодорожным транспортом, что приводит к случайности исходных данных и показателей эффективности. Тестирование и апробация созданного программно-алгоритмического обеспечения проведены по данным одной из железных дорог ОАО «РЖД». Учитывая конфиденциальность исходных сведений, они представлены в условных единицах. Тестирование программного обеспечения показало высокое качество моделирования исходных данных методом Монте-Карло, так как все значения математических ожиданий попали в доверительные интервалы, полученные по выборочным данным. Созданное программно-математическое обеспечение на основе метода Монте-Карло повысит качество принятия управленческих решений за счет определения количественных значений показателей эффективности.

### Ключевые слова

перевозка грузов, железнодорожный транспорт, показатели эффективности, вероятностный анализ безубыточности, метод Монте-Карло

### Для цитирования

Краковский Ю.М. Исследование показателей эффективности перевозки грузов железнодорожным транспортом вероятностным анализом безубыточности / Ю.М. Краковский, И.П. Кудряшов, В.А. Начигин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2 (78). С. 139–144. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).139-144.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 6.02.2023 г.; поступила после рецензирования: 20.03.2023 г.; принята к публикации: 22.03.2023 г.

## Research of the efficiency indicators of railway cargo transportation by probabilistic break-even analysis

Yu.M. Krakovskii✉, I.P. Kudryashov, V.A. Nachigin

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation,

✉yuri.krakovskiy@yandex.ru

### Abstract

Algorithmic and software for probabilistic break-even analysis based on the Monte Carlo method for evaluating the efficiency indicators of cargo transportation by rail has been developed. The initial data for calculating these indicators are: cargo transportation; fixed costs; variable costs per unit of cargo transportation; average price of a unit of cargo transportation; the amount of investment. To assess the efficiency of cargo transportation, the following indicators are selected in the article: break-even point, operating profit, investment profitability. A software for probabilistic break-even analysis based on the Monte Carlo method using the Python programming language has been developed. The functionality of the created software is described. In the software, it is possible to test the initial data models, output the test results, as well as the results of processing sample values obtained by the Monte Carlo method. A feature of this study based on a probabilistic break-even analysis is the consideration of the uncertainty of the railway transportation process, which leads to the randomness of the initial data and performance indicators. Testing and approbation of the developed software and algorithmic support was carried out according to one of the railways of

JSC «RZD». Given the confidentiality of the initial data, they are presented in conventional units. Software testing showed high quality of initial data simulation by the Monte Carlo method, since all values of mathematical expectations fell within the confidence intervals obtained from sample data. The developed mathematical software based on the Monte Carlo method will improve the quality of managerial decision-making by determining the quantitative values of performance indicators.

### Keywords

cargo transportation, railway transport, performance indicators, probabilistic break-even analysis, Monte Carlo method

### For citation

Krakovskii Yu.M., Kudryashov I.P., Nachigin V.A. Issledovanie pokazatelei effektivnosti perevozki грузов zheleznodorozhnyim transportom veroyatnostnym analizom bezubytochnosti [Research of the efficiency indicators of railway cargo transportation by probabilistic break-even analysis]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 139–144. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).139-144.

### Article info

Received: February 6, 2023; Revised: March 20, 2023; Accepted: March 22, 2023.

### Введение

Вопросы перевозки грузов железнодорожным транспортом имеют важное значение для развития экономики РФ. Исследования в этом направлении во многом связаны с необходимостью обеспечения безопасности перевозочного процесса, поэтому ОАО «РЖД» уделяет большое внимание мониторингу, диагностике, надежности и технологичности инфраструктурного комплекса дорог [1–5].

Важной задачей в ОАО «РЖД» является возможность увеличения объемов железнодорожных перевозок на каждом участке пути. Эта задача реализуется за счет рациональной организации «окон», необходимых для выполнения ремонтно-восстановительных работ, внедрением комплексных полигонных технологий, улучшением систем интервального регулирования движения поездов и др. [6–8].

Управленческие подразделения железных работ следят за показателями эффективности (ПЭ) перевозочного процесса и используют их либо в задачах прогнозирования базовых показателей [9–12], либо при прогнозировании экономических показателей: операционной прибыли, рентабельности инвестиций и т.д. [13].

Данное исследование посвящено второму направлению. Учитывая, что перевозка грузов осуществляется в условиях неопределенности, при оценке ПЭ предложено использовать вероятностный анализ безубыточности (ВерАБ), основанный на методе Монте-Карло (далее – МетМК).

Исходными данными для вычисления ПЭ на основе МетМК являются:  $G$  – эксплуатационный грузооборот, т·км;  $X_p$  – переменные затраты на единицу грузооборота, руб./ т·км;  $X_c$  – постоянные затраты, руб.;  $C_g$  – цена единицы

перевезенного грузооборота, руб./ т·км;  $In$  – размер инвестиций, руб.

В условиях неопределенности эти исходные данные являются случайными величинами, для которых экспертным путем выбираются вероятностные модели в виде функций распределения. При ВерАБ, используя МетМК, моделируются значения исходных данных, далее по ним рассчитываются выборочные значения ПЭ.

На следующем этапе выборочные значения ПЭ обрабатываются с использованием стандартных средств математической статистики [13, 14]. Подобный подход апробирован при управлении грузовыми перевозками железнодорожным транспортом [12, 13], а также в сфере производства сельскохозяйственной продукции [15, 16].

Целью работы является разработка и апробация программно-математического обеспечения для исследования процесса перевозки грузов железнодорожным транспортом МетМК.

### Программно-алгоритмическое обеспечение для решаемой задачи

В качестве основных ПЭ процесса перевозки грузов предлагаются следующие модели:

– точка безубыточности (ТБ) –

$$G_0 = \frac{(X_c - In)}{(C_g - X_p)}, \text{ т·км}; \quad (1)$$

– операционная прибыль (ОП) –

$$OPr = (C_g - X_p) \cdot G - (X_c - In), \text{ руб.}; \quad (2)$$

– рентабельность инвестиций (РИ) –

$$RI = (OPr / In) \cdot 100, \%. \quad (3)$$

Вследствие случайности исходных данных эти показатели также являются случайными

ми величинами. При использовании МетМК для них создаются выборки объема  $n$ , по которым определяются точечные и интервальные оценки неизвестных математических ожиданий и гистограммы частот исследуемых ПЭ. Дополнительно для ОП и РИ определяются риски, которые оцениваются двумя показателями: коэффициент вариации (%); вероятность специального события.

Для РИ эта вероятность равна

$$R_r = P_r(RI < RI_3), \quad (4)$$

где  $RI_3$  – заданное значение показателя РИ. Для ОП эта вероятность находится аналогично (4). Заданное значение в этом случае может быть 0, тогда этот риск оценивает вероятность убытка.

Для неизвестных значений (4) помимо точечных оценок находятся интервальные оценки.

При использовании МетМК необходимо, чтобы эксперты выбрали вероятностные модели для исходных данных с точностью до значений их параметров. Так как эта статья носит исследовательский характер, то выбран список вероятностных моделей, приведенный ниже:

- логарифмически нормальное распределение –  $Ln(a,b)$ ;
- нормальное распределение –  $N(a,b)$ ;
- распределение Бирнбаума – Саундерса –  $BS(a,b)$ .

Для каждого исходного показателя по реальным данным железной дороги оценивается математическое ожидание ( $\bar{x}$ ). Так как выбранные вероятностные модели имеют два параметра ( $a$  и  $b$ ), то экспертами дополнительно задается коэффициент вариации ( $kv$ ). Затем методом моментов определяются значения параметров, которые используются в моделях при моделировании исходных данных.

В качестве примера приведем эту технологию для распределения  $BS(a,b)$ . Параметры  $a$  и  $b$  методом моментов для этого распределения равны:

$$b = \left( \frac{\bar{x} + (\bar{x}^2 + 3D_x)^{\frac{1}{2}}}{2D_x} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad a = b \cdot \bar{x} - \frac{0,5}{b}; \quad (5)$$

$$D_x = (kv \cdot \bar{x})^2.$$

Модель моделирования случайной величины равна:

$$x = \frac{a}{b} + \frac{1}{2} \left( \frac{z}{b} \right)^2 + \frac{z}{b} \sqrt{\frac{a}{b} + \frac{1}{4} \left( \frac{z^2}{b} \right)}, \quad z \rightarrow N(0, 1). \quad (6)$$

Запись  $N(0, 1)$  обозначает, что величина  $z$  имеет нормированный нормальный закон. В модели (6) параметры ( $a$  и  $b$ ) определяются по формулам (5).

Программное обеспечение создано с применением наиболее популярного в последние годы языка программирования Python. Этот язык популярен, потому что он хорошо осваивается и имеет множество встроенных сторонних библиотек [17, 18].

Функциональные возможности созданного программного обеспечения позволяют моделировать исходные данные, проводить тестирование результатов моделирования, выводить результаты тестирования, а также результаты обработки выборочных значений, полученных МетМК.

### Апробация алгоритмического и программного обеспечения вероятностного анализа безубыточности грузовых перевозок

Опираясь на литературные источники [12], в качестве вероятностных моделей (ВМ) для исходных данных выбраны следующие двухпараметрические законы с точностью до значений числовых характеристик (табл.). Эти данные связаны с железной дорогой ОАО «РЖД», но учитывая их конфиденциальность, они даны в условных единицах (усл. ед.). Объ-

Описание исходных данных  
Description of the source data

Исходные данные Initial data	ВМ	$\bar{x}$ , усл. ед. conv. unit	$kv$	$x_0$ , усл. ед. conv. unit	$kv_0$	$x_1$ , усл. ед. conv. unit	$x_2$ , усл. ед. conv. unit
$G$	$BS(a,b)$	156,6	0,10	156,3	0,11	156,0	156,7
$Xp$	$N(a,b)$	342,9	0,07	343,2	0,07	342,7	343,6
$Xc$	$N(a,b)$	21 281,4	0,10	21 276,0	0,10	21 234,4	21 317,5
$Cg$	$Ln(a,b)$	195,6	0,07	195,4	0,07	195,1	195,7
$In$	$N(a,b)$	11 500,0	0,10	11 510,0	0,10	11 487,4	11 532,5

ем выборок в исследовании равен 10 000, этот объем обеспечивает требуемую точность вычислений в пределах одного процента.

Дополнительно в таблице приведено:  $x_0$  – точечная оценка математического ожидания;  $kv_0$  – точечная оценка коэффициента вариации;  $(x_1, x_2)$  – доверительный интервал для математического ожидания. Из приведенных данных видно, что все математические ожидания попали в их доверительные интервалы, а оценки коэффициентов вариации близки с их значениями. Это подтверждает высокое качество моделирования исходных данных.

При использовании этих исходных данных МетМК были получены следующие результаты для ТБ: оценка математического ожидания равна 68,8 усл. ед.; доверительный интервал для неизвестного математического ожидания равен 68,6–69,0.

На рис. 1 приведена гистограмма частот для ТБ, которая имеет заметную асимметрию.

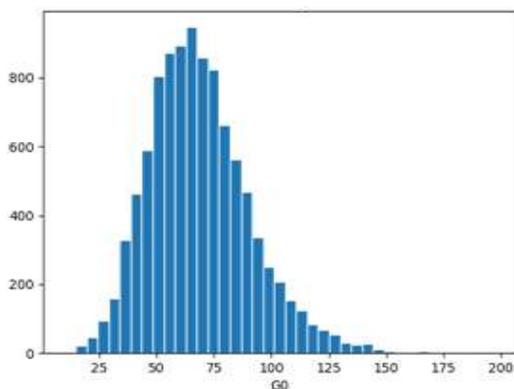


Рис. 1. Гистограмма частот для точки безубыточности

Fig. 1. Frequency histogram for the break-even point

Подставляя в формулу (1) значения математических ожиданий исходных данных, получим расчетное значение ТБ, равное 66,4 усл. ед. Это значение не попадает в полученный доверительный интервал, что связано с асимметричностью распределения ТБ.

Для ОП получены следующие результаты: оценка математического ожидания равна 13 324,6 усл. ед.; доверительный интервал для неизвестного математического ожидания равен 13 217,7–13 431,5.

На рис. 2 приведена гистограмма частот для ОП, которая практически не имеет асимметрии, но наблюдается большой разброс значений. Риск как коэффициент вариации равен

41,0 %, хотя коэффициенты вариаций исходных данных не более 10 %.

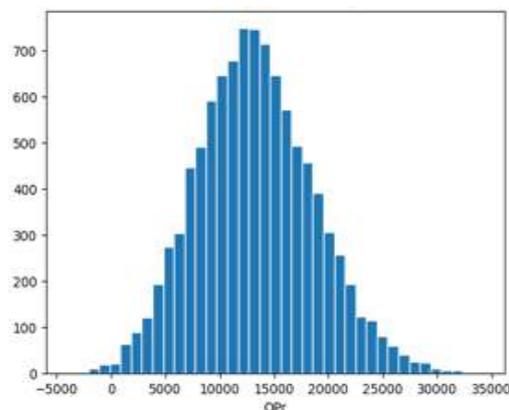


Рис. 2. Гистограмма частот для операционной прибыли

Fig. 2. Frequency histogram for operating profit

Подставляя в формулу (2) значения математических ожиданий исходных данных, получим расчетное значение ОП, равное 13 285,8 усл. ед.

Это значение попадает в полученный доверительный интервал, что связано с симметричностью распределения ОП.

Точечная оценка риска как вероятности специального события при заданном значении 6 642,9 усл. ед. (50 % от расчетного значения) равна 0,105, а доверительный интервал для этого риска равен 0,099–0,111. Меняя заданное значение, можно вычислять точечную и интервальную оценки риска, что является положительной стороной созданного программно-алгоритмического обеспечения.

Для РИ получены следующие результаты: оценка математического ожидания равна 116,9 %; доверительный интервал для неизвестного математического ожидания равен 116,0–118,0.

На рис. 3 приведена гистограмма частот для РИ, которая имеет незначительную асимметрию и большой разброс значений. Риск как коэффициент вариации равен 42,4 %, хотя коэффициенты вариаций исходных данных не превышают 10 %.

Подставляя в формулу (3) значения математических ожиданий исходных данных, получим расчетное значение РИ – 115,5 %. Это значение попадает в полученный доверительный интервал, что связано с симметричностью распределения РИ.

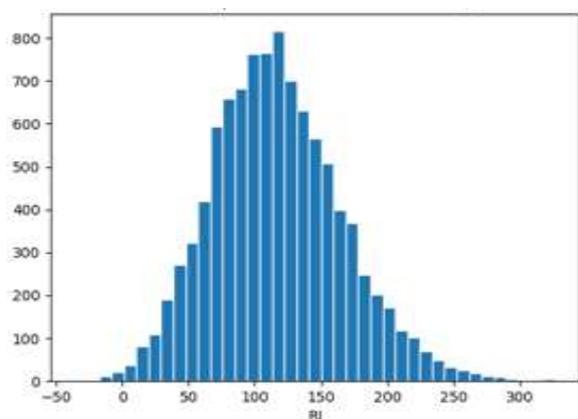


Рис. 3. Гистограмма частот для рентабельности инвестиций

Fig. 3. Frequency histogram for return on investment

Точечная оценка риска как вероятности специального события при заданном значении 57,8 % (50 % от расчетного значения) равна 0,108, а доверительный интервал для этого риска равен 0,102–0,114.

Меняя заданное значение, можно вычислять точечную и интервальную оценки риска.

### Заключение

Создано программно-алгоритмическое обеспечение по вычислению показателей эффективности процесса перевозки грузов железнодорожным транспортом на основе вероятностного анализа безубыточности.

Проведены тестирование и апробация этого программного обеспечения по исходным данным железной дороги ОАО «РЖД». Тестирование показало высокое качество моделирования исходных данных МетМК, так как все значения математических ожиданий попали в доверительные интервалы, полученные по выборочным данным.

Получены числовые данные по показателям эффективности в виде ТБ, ОП и РИ, включая риски по двум показателям: коэффициенту вариации и вероятности специального события.

### Список литературы

1. Бирюзов В.П. Об основных направлениях развития систем диагностики и мониторинга путевого хозяйства до 2025 г. // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 4. С. 4–8.
2. Бугаенко В.М. Мониторинг и диагностика инфраструктуры скоростных мобильных комплексов // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 4. С. 12–16.
3. Антипов А.Г., Марков А.А. Новые возможности магнитодинамического метода контроля рельсов // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 8. С. 27–32.
4. Ковалев И.А., Колокольников В.С. Влияние отказов технических средств на выполнение графика движения поездов // Транспорт Урала. 2014. № 2 (41). С. 54–57.
5. Комплексный анализ состояния рельсового пути с помощью нового вагона-дефектоскопа АВИКОН–03М / А.А. Марков, П.Г. Политай, С.П. Маховиков и др. // В мире неразрушающего контроля. 2013. № 3 (61). С. 74–79.
6. Осминин А.Т., Мехедов М.И., Медников Д.В. Обеспечение интероперабельности перевозок // Железнодорожный транспорт. 2019. № 7. С. 11–17.
7. Розенберг Е.Н., Аношкин В.В. Перспективы роста пропускной способности участков // Железнодорожный транспорт. 2020. № 3. С. 4–7.
8. Сотников Е.А., Мехедов М.И., Холодняк П.С. Интенсификация роста загруженных направлений сети железных дорог // Железнодорожный транспорт. 2020. № 3. С. 11–14.
9. Попова Н.Н., Краковский Ю.М. Обобщенное прогнозирование показателей грузовых перевозок железнодорожным транспортом на основе сценарного подхода // Вестник РГУПС. 2020. № 3 (79). С. 132–138.
10. Маловецкая Е.В., Козловский А.П. Анализ моделей и принципов системного моделирования при построении прогнозных моделей погрузки грузов // International journal of open information technologies. 2020 Т. 8. № 12. С. 39–48.
11. Крамынина Г.Н. Разработка многофакторной модели для прогнозирования грузооборота на Восточно-Сибирской железной дороге // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 3. С. 38–41.
12. Попова Н.Н., Краковский Ю.М. Прогнозирование грузооборота с учетом факторных моделей // Актуальные вопросы аграрной науки. 2019. № 32. С. 63–69.
13. Краковский Ю.М., Каргапольцев С.К., Начигин В.А. Моделирование перевозочного процесса железнодорожным транспортом: анализ, прогнозирование, риски. СПб. : ЛИТЕО, 2018. 240 с.
14. Кельтон В.Д., Лоу А.М. Имитационное моделирование. СПб. : Питер : Киев : Изд. группа BHV, 2004. 847 с.
15. Холлендер М., Вульф Д. Непараметрические методы статистики. М. : Финансы и статистика, 1983. 518 с.
16. Куликов В.Е. Теоретические проблемы моделирования хозяйственной деятельности сельскохозяйственных предприятий в условиях неопределенности // Экономика и управление: проблемы, анализ тенденций и перспектив развития : сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2018. С. 118–126.
17. Доусон М. Програмуємо на Python. СПб. : Питер, 2014. 416 с.
18. Поляков К.Ю. Программирование. Python. C++. Ч. 1. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2019. 144 с.

## References

1. Biryuzov V.P. [On the main directions of development of diagnostic and monitoring systems of the track economy until 2025]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Path and track facilities], 2016, no. 4, pp. 4–8.
2. Bugaenko V.M. Monitoring i diagnostika infrastruktury skorostnykh mobil'nykh kompleksov [Monitoring and diagnostics of infrastructure of high-speed mobile complexes]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Track and track facilities], 2015, no. 4, pp. 12–16.
3. Antipov A.G., Markov A.A. Novye vozmozhnosti magnitodinamicheskogo metoda kontrolya rel'sov [New possibilities of the magnetodynamic method of rail control]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Track and track facilities], 2016, no. 8, pp. 27–32.
4. Kovalev I.A., Kolokolnikov V.S. Vliyaniye otkazov tekhnicheskikh sredstv na vypolneniye grafika dvizheniya poezdov [Influence of failures of technical means on the fulfillment of the train schedule]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2014, no. 2(41), pp. 54–57.
5. Markov A.A., Politai P.G., Makhovikov S.P., Alekseev D.V., Kuznetsova E.A. Kompleksnyi analiz sostoyaniya rel'sovogo puti s pomoshch'yu novogo vagona-defektoskopa AVIKON-03M [Comprehensive analysis of the condition of the rail track using the new AVICON-03M flaw detector wagon]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya* [In the world of non-destructive testing], 2013, no. 3(61), pp. 74–79.
6. Os'minin A.T., Mekhedov M.I., Mednikov D.V. Obespecheniye interoperabel'nosti perevozk [Ensuring the interoperability of transportation]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2019, no. 7, pp. 11–17.
7. Rosenberg E.N., Anoshkin V.V. Perspektivy rosta propusknoi sposobnosti uchastkov [Growth prospects of the capacity of sites]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2020, no. 3, pp. 4–7.
8. Sotnikov E.A., Mekhedov M.I., Holodnyak P.S. Intensifikatsiya rosta zagruzhennykh napravlenii seti zheleznykh dorog [Intensification of the growth of the busiest lines of a network of Railways]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2020, no. 3, pp. 11–14.
9. Popova N.N., Krakovskii Yu.M. Obobshchennoye prognozirovaniye pokazatelei gruzovykh perevozk zheleznodorozhnym transportom na osnove stsenarnogo podkhoda [Generalized forecasting of freight transport indicators by rail based on a scenario approach]. *Vestnik RGUPS* [Bulletin of the Rostov State Transport University], 2020, no. 3(79), pp. 132–138.
10. Malovetskaya E.V., Kozlovskii A.P. Analiz modelei i printsipov sistemnogo modelirovaniya pri postroenii prognoznnykh modelei pogruzki gruzov [Analysis of models and principles of system modeling in the construction of forecast models of cargo loading]. *International journal of open information technologies*, 2020, vol. 8, no. 12, pp. 39–48.
11. Kramynina G.N. Razrabotka mnogofaktornoi modeli dlya prognozirovaniya gruzooborota na Vostochno-Sibirskoi zheleznoi doroze [Development of a multi-factor model for forecasting cargo turnover on the East Siberian Railway]. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technologies and techniques], 2022, no. 3, pp. 38–41.
12. Popova N.N., Krakovskii Yu.M. Prognozirovaniye gruzooborota s uchetom faktornykh modelei [Cargo turnover forecasting taking into account factor models]. *Aktual'nye voprosy agrarnoi nauki* [Actual issues of agrarian science], 2019, no. 32, pp. 63–69.
13. Krakovskii Yu.M., Kargapol'tsev S.K., Nachigin V.A. Modelirovaniye perevozochnogo protsessa zheleznodorozhnym transportom: analiz, prognozirovaniye, riski [Modeling of the transport process by rail: analysis, forecasting, risk]. Saint Petersburg: LITEO Publ., 2018. 240 p.
14. Kelton W. David, Low Averill M. [Simulation modeling and analysis]. Saint. Petersburg: Piter Publ.: Kiev: Izdatel'skaya gruppa BHV Publ., 2004. 847 p.
15. Hollander M., Wolfe D.A. *Neparametricheskie metody statistiki* [Nonparametric statistical methods]. Moscow: Finansy i Statistika Publ., 1983. 518 p.
16. Kulikov V.E. Teoreticheskie problemy modelirovaniya khozyaystvennoi deyatel'nosti sel'skokhozyaystvennykh predpriyatii v usloviyakh neopredelennosti [Theoretical problems of modeling the economic activity of agricultural enterprises in conditions of uncertainty]. *Sbornik materialov III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Ekonomika i upravlenie: problemy, analiz tendentsii i perspektiv razvitiya»* [Proceedings of the III International Scientific-Practical Conference «Economics and management: problems, analysis of trends and development prospects»]. Novosibirsk, 2018. pp. 118–126.
17. Dawson M. *Programmiruemye na Python* [Programming in Python]. Saint Petersburg: Piter Publ., 2014. 416 p.
18. Polyakov K.Yu. *Programmirovaniye. Python. C++*. Ch. 1. [Programming. Python. C++. Part 1]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2019. 144 p.

## Информация об авторах

**Краковский Юрий Мечеславович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: yuri.krakovskiy@yandex.ru.

**Кудряшов Игорь Павлович**, кафедра информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: igorkudryashov7k@gmail.com.

**Начигин Владимир Александрович**, кандидат технических наук, начальник Инновационно-технологического центра развития Восточного полигона, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: nachiginv@yandex.ru.

## Information about the authors

**Yurii M. Krakovskii**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: yuri.krakovskiy@yandex.ru.

**Igor' P. Kudryashov**, Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: igorkudryashov7k@gmail.com.

**Vladimir A. Nachigin**, Ph.D. in Engineering Science, Head of the Innovation and Technological Development Center of the Eastern Polygon, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: nachiginv@yandex.ru.

## Оценка влияния ходовой части грузового вагона на рельсошпальную решетку в процессе эксплуатации с помощью тензометрических датчиков

К.В. Арефьева, Л.В. Мартыненко✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉liuba.martinenko@yandex.ru

### Резюме

В настоящее время безопасность движения и соблюдение графика движения поездов являются основными целями деятельности ОАО «РЖД». Для их достижения необходимо выполнить ряд задач по своевременному выявлению и устранению технически неисправных вагонов, вышедших из строя в результате больших динамических нагрузок в процессе эксплуатации. Данное исследование проводится для определения этих нагрузок с помощью тензометрических датчиков, установленных на колесных парах вагона, а также для предотвращения наступления аварийных ситуаций на дороге. При проведении испытаний вагонов на предмет надежности и безопасности при различных скоростях движения и степени загрузки основными измеряемыми величинами являются уровни воздействия на путь системы вертикальных и боковых нагрузок, передаваемых колесной парой железнодорожному полотну. Измерения деформаций колесной пары вагона проводят при помощи тензорезисторов, которые приклеиваются на колеса. Подготовка образцов сталей для изготовления компенсационных датчиков для дистанционного измерения напряженно-деформированного состояния узлов железнодорожной колесной пары осуществляется в целях реализации программы, направленной на повышение ОАО «РЖД» безопасности движения, а также для выполнения мер по модернизации и внедрению технических средств диагностики подвижного состава и пути в целом. Применение тензометрических колесных пар, позволяющих в непрерывном движении проводить измерения вертикальных и боковых сил в зоне контакта колеса с рельсом, является именно одной из таких мер.

### Ключевые слова

безопасность движения, аварийные ситуации, тензометрические датчики, системы вертикальных и боковых нагрузок, тензорезисторы, деформации колесной пары

### Для цитирования

Арефьева К.В. Оценка влияния ходовой части грузового вагона на рельсошпальную решетку в процессе эксплуатации с помощью тензометрических датчиков / К.В. Арефьева, Л.В. Мартыненко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2 (78). С. 145–155. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).145-155.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 10.11.2022 г.; поступила после рецензирования: 10.03.2023 г.; принята к публикации: 14.03.2023 г.

## Assessment of the Impact of a freight wagon undercarriage on the rail-sleeper grid during operation using strain gauges

K.V. Aref'eva, L.V. Martynenko✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉liuba.martinenko@yandex.ru

### Abstract

Currently, traffic safety and compliance with the train schedule are the main objectives of JSC «Russian Railways». To achieve the main goal, it is necessary to perform a number of tasks for the timely identification and elimination of technically defective wagons that have failed under high dynamic loads during operation. This study is carried out in order to determine such loads using strain gauges installed on the wheelsets of the wagon, as well as to prevent the occurrence of accidents on the road. When testing wagons for reliability and safety at various speeds of movement and loads, one of the main measured values are the levels of impact on the track of the system of vertical and lateral loads transmitted by the wheel set to the railway track. Measurements of deformations of the wheelset of the wagon are carried out using strain gages that are glued to the wheels. The preparation of steel samples for the manufacture of compensation sensors for remote measurement of the stress-strain state of railway wheelset units is carried out in order to implement a program aimed at improving traffic safety of JSC «Russian Railways» and carry out measures to modernize and introduce technical diagnostic tools for rolling stock and track as a whole. The use of strain gauge wheelsets, which allow to measure vertical and lateral forces in the area close to the wheel-rail contact zone in the continuous movement mode is one of such measures.

### Keywords

traffic safety, emergency situations, strain gauges, vertical and lateral load systems, strain gages, deformations of the wheel set

### For citation

Aref'eva K.V., Martynenko L.V. Otsenka vliyaniya khodovoi chasti gruzovogo vagona na rel'soshpal'nyuyu reshetku v protsesse ekspluatatsii s pomoshch'yu tenzometricheskikh datchikov [Assessment of the impact of a freight wagon undercarriage on the

rail-sleeper grid during operation using strain gauges]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 145–155. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).145-155.

### Article Info

Received: November 11, 2022; Revised: March 10, 2023; Accepted: March 14, 2023.

### Введение

Преимуществом железнодорожного транспорта является универсальность, нормированный скоростной режим движения, способность доставлять груз за минимально короткий срок, а также ответственность за целостность доставки груза адресату. При перечисленных преимуществах перевозочного процесса играет большую роль высокая загруженность железнодорожных путей, через которые каждые сутки проходят миллионы тонн брутто груза. Сохранять удовлетворительное состояние пути и самих вагонов не всегда получается, так как загруженность данных объектов не позволяет своевременно производить технический осмотр ввиду отсутствия времени при стоянке вагонов, которое сократили до минимума, а пути при постоянном перевозочном процессе без технических окон просто не удастся проверить в полном объеме.

Техническое обслуживание является одним из важных требований к объекту перевозочного процесса, т.е. обеспечение исправным подвижным составом. Основные задачи подразделений в сфере обслуживания – подготовка вагонов под погрузку грузов и обеспечение безаварийной работы вагонов в пути следования. За последнее время произошли существенные изменения в организации работы железнодорожного транспорта, а именно, изменились производственная деятельность инфраструктуры и форма собственности на предприятиях.

Безопасность является основой для процесса пассажирских перевозок и грузового движения, поэтому высокая степень надежности определяет техническое состояние системы «колесо – рельс», так как в процессе эксплуатации данная система меняет свои качественные и количественные показатели, что требует дополнительного исследования и оценки функционирования этой системы в различных ситуациях [1].

На сегодняшний день количество сходов увеличивается. На их возникновение влияют неисправности и (или) отказы буксовых узлов, колесных пар, несовершенство тормозных систем, а также малоразвитая система земляного полотна, вследствие чего происходят отказы по пути [2]. Сам процесс схода зависит от множества факто-

ров, которые в их вероятностном сочетании изучены еще недостаточно. Большая нагрузка на рельсовые нити и вагон в целом приводит не только к увеличению дефектов, но и к их общей работе при движении. Данная работа обусловлена неправильной эксплуатацией, включающей в себя нарушения технологических процессов, в том числе выпуск вагонов из ремонта с критически допустимыми размерами в эксплуатации, но не допустимыми по сочетанию между собой. Отказы происходят при увеличенном взаимодействии указанных отклонений в пути следования. Нагрузка, приходящаяся на отдельные детали, может существенно отличаться в эксплуатации и вызывать дополнительные напряженно-деформированные состояния, которые усиливают внутренне напряжение металла. Данное напряжение можно оценить с помощью специализированных стендов, колесных пар и тензодатчиков, которые показывают силу воздействия при различных условиях эксплуатации. Считывание информации с этих устройств позволяет сориентироваться при начальной эксплуатации и через определенный промежуток времени, когда появляются отклонения, сопряженные с увеличением численных силовых значений, возникающие изначально на опасных участках, а после фиксируемые на протяжении следования состава [3].

Эффективность деятельности служб вагонного хозяйства определена согласно Методике о комплексной оценке работы предприятий вагонного хозяйства дирекций инфраструктуры. В данной методике изложен алгоритм расчетов, а также приведены показатели оценки эффективности служб вагонного хозяйства, эксплуатационных вагонных депо, пунктов технического обслуживания. По результатам оценки из 15 служб вагонного хозяйства первое место заняла служба вагонного хозяйства Московской дирекции инфраструктуры. Второе место в рейтинге у службы вагонного хозяйства Юго-Восточной дирекции. Третье место досталось службе вагонного хозяйства Красноярской дирекции. Проведена комплексная оценка деятельности эксплуатационных вагонных депо (ВЧДЭ) и пунктов технического обслуживания грузовых вагонов (ПТО) на основании качественных и количественных показате-

лей, а также данных из информационных систем. Из 45 ПТО сортировочных станций первое место заняла ПТО Батайск-Юг Северо-Кавказкой дирекции инфраструктуры с общей суммой 100 баллов, второе место – ПТО Орехово-Зуево Московской дирекции. Из 176 ПТО грузовых станций на сети первое место разделили 56 ПТО с общей суммой по 100 баллов. Результаты рейтинга служб сведем в табл. 1 [4].

**Таблица 1.** Рейтинг служб вагонного хозяйства  
**Table 1.** Rating of wagon services

Место Place	Служба вагонного хозяйства Wagon service	Баллы Score
1	Московская Moscow	11,64
2	Юго-Восточная South East	10,99
3	Красноярская Krasnoyarsk	10,72
4	Куйбышевская Kuibyshev	10,70
5	Дальневосточная Far East	10,49
6	Горьковская Gor'kovskaya	10,03
7	Приволжская Privolzhskaya	9,94
8	Забайкальская Zabaykalskaya	9,94
9	Северо-Кавказская North Caucasian	9,87
10	Северная Northern	9,85
11	Свердловская Sverdlovskaya	9,71
12	Восточно-Сибирская East Siberian	9,67
13	Западно-Сибирская West Siberian	8,43
14	Октябрьская Oktyabr'skaya	6,20
15	Южно-Уральская South Urals	5,85

### Отказы технических средств

Производственная деятельность вагонного хозяйства оказывает значительное влияние на результаты работы ОАО «РЖД» в целом. С целью повышения эффективности перевозок необходимо снизить отказы технических средств первой и второй категорий. Отказы первой категории – отказы, приведшие к задержке пассажирского, пригородного или грузового поезда на перегоне (станции) на 1 ч и более либо приведшие к транспортным происшествиям или событиям, связанным с нарушением правил безопасности движе-

ния и эксплуатации железнодорожного транспорта. Отказы второй категории – отказы, приведшие к задержке пассажирского, пригородного или грузового поезда на перегоне (станции) продолжительностью от 6 мин. до 1 ч либо к ухудшению эксплуатационных показателей. На рис. 1 представлена динамика отказов технических средств первой и второй категорий по вагонному хозяйству за последние семь лет. Количество отказов постоянно снижалось с 2015 г. и до настоящего времени сократилось почти в 7 раз.



**Рис. 1.** Динамика отказов технических средств по вагонному хозяйству в 2015–2022 гг.

**Fig. 1.** Dynamics of failures of technical equipment in the rolling stock in 2015–2022



**Рис. 2.** Образцы сталей для изготовления компенсационных датчиков

**Fig. 2.** Samples of steels for manufacturing compensation sensors



**Рис. 3.** Изготовление компенсационных датчиков с применением тензорезисторов

**Fig. 3.** Production of compensation sensors using strain gauges

Конструкция ходовой части грузового вагона включает в себя множество элементов, однако наиболее ответственными является колесная пара. В целях реализации программы, направленной на повышение безопасности движения, ОАО «РЖД» осуществляет меры по модернизации и внедрению технических средств диагностики подвижного состава и пути в целом [5]. Один из вариантов по внедрению и модернизации является применение тензометрических колесных пар, позволяющих в непрерывном движении проводить измерения вертикальных и боковых сил в зоне, близкой к зоне контакта колеса с рельсом.

### Компенсационные датчики

Надежный способ получить ответ о том, как материалы справляются с реальным напряжением, – это использовать тензорезисторы, которые позволяют измерить даже самые незначительные изменения (за счет своей «аналоговости» они имеют практически бесконечную чувствительность).

Тензорезистором можно назвать датчик, который преобразует собственную деформацию в изменение собственных электрических характеристик, а поскольку его собственная деформация практически равна поверхностной деформации испытуемого материала, то можно сказать так: тензорезистор – это датчик, преобразующий поверхностную деформацию испытуемого материала в изменение собственных электрических характеристик.

При проведении испытаний вагонов на предмет надежности и безопасности при различных скоростях движения и степени загрузки

основными измеряемыми величинами являются уровни воздействия на путь системы вертикальных и боковых нагрузок, передаваемых колесной парой железнодорожному полотну [6]. Измерение деформаций колесной пары вагона проводят при помощи тензорезисторов, которые приклеиваются на колеса. Подготовка образцов сталей для изготовления компенсационных датчиков изображена на рис. 2.

Конструкция резистивного тензодатчика представляет собой упругий элемент, на котором зафиксирован тензорезистор (рис. 3).

Под действием силы (веса груза) происходит деформация упругого элемента вместе с тензорезистором. В результате изменения сопротивления тензорезистора можно судить о силе воздействия на датчик, а, следовательно, и о весе груза. Принцип измерения веса при помощи тензодатчиков основан на уравнивании массы взвешиваемого груза с упругой механической силой тензодатчиков и последующего преобразования этой силы в электрический сигнал для дальнейшей обработки.

Измерение деформаций колесной пары вагона проводят при помощи тензорезисторов, которые приклеиваются на колеса. Нанесение разметки под тензорезисторные датчики на элементах колесной пары показано на рис. 4. На рис. 5 представлены наклеенные тензодатчики в соответствии с разметкой. Далее представлена схема приложения нагрузок на колесную пару, а также расположение тензометрических датчиков на оси колесной пары и опорной части колеса на рельс (рис. 6).



а



б

**Рис. 4.** Нанесение разметки под тензорезисторные датчики на элементах колесной пары:

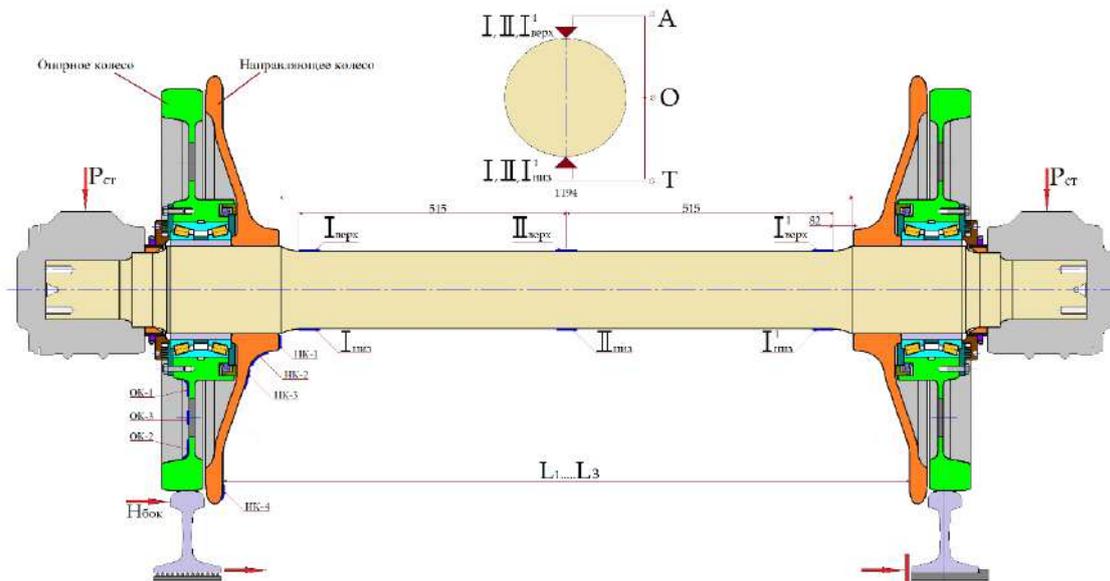
а – правая нижняя часть оси; б – середина оси

**Fig. 4.** Application of markings for strain-gauge sensors on the elements of the wheelset:

а – the right lower part of the axis; б – the middle of the axis



**Рис. 5.** Наклеивание тензорезисторных датчиков:  
*a* – направляющее правое колесо (четыре датчика); *б* – направляющее левое колесо (три датчика)  
**Fig. 5.** Gluing strain gauge sensors on:  
*a* – steering right wheel (four sensors); *b* – steering left wheel (three sensors)



**Рис. 6.** Схема испытательных нагрузок на стенде  
**Fig. 6.** Scheme of test loads on the stand

Самая большая проблема – передача данных с тензорезисторов при движении поезда [7]. Подключить датчики с помощью проводов не представляется возможным. Использовать для измерений контактные токосъемники – нецелесообразно из-за их ненадежности и качества контакта (малейшее изменение сопротивления в контактах влияет на результат измерений). Существуют портативные регистраторы с записью данных с датчиков на карту памяти и питанием от аккумулятора. Такие системы не позволяют контролировать результаты измерений в реальном времени и ограничены по времени работы.

Для измерения деформаций на колесной паре лучше всего подходит мостовой метод, характеризующийся наличием мостовой ветви между двумя точками схемы, не соединенными непосредственно с источником электрической энергии [8, 9]. В основу мостовой схемы положена схема моста Уинстона. Для определения зон минимального взаимного влияния вертикальных и боковых сил применялась конечно-элементная модель колесной пары с использованием программного комплекса Nastran [10]. В узлах конечно-элементной сетки, расположенных в радиальном сечении колеса, с помощью специальной

опции MSC. Fatigue размещены виртуальные датчики с базой 10×5 мм для оптимизации обработки информации. Общее количество тензорезисторов в модели – 54. Виртуальные датчики деформаций позволяли определять напряженно-деформированное состояние диска колеса при приложении вертикальных и боковых сил [11]. По результатам моделирования тензометрической колесной пары на стенде определены зоны минимального взаимного влияния от вертикальных сил на боковые и наоборот. В качестве основной схемы соединения тензорезисторов на входе измерительных каналов выбран полумост из двух активных тензорезисторов, размещенных на измерительных диаметрах, которые при вращении колеса поочередно входят в зону контактирования и воспринимают деформацию поверхности диска колеса, пропорциональную действующим силам [12]. При такой схеме включения тензорезисторов обеспечивается максимальная чувствительность при минимальных погрешностях измерений, связанных с необходимостью температурной компенсации. Кроме того, вы-

бранный способ соединения тензорезисторов обеспечивает самый простой контроль балансировки (контроль нулей) измерительных каналов. Места размещения тензорезисторов на дисках колес тензометрической колесной пары выбраны на основании расчетных данных о напряженном состоянии диска колеса под действием внешних нагрузок различных направлений и результатов экспериментальной проверки напряженного состояния диска на специальном стенде АО «ВНИИЖТ», где колесные пары нагружали внешними силами различных уровней и направлений (табл. 2) [13]. Подготовка тензорезисторов к наклейке, их наклейка в предварительно выбранных местах, соединение в измерительные полумосты, изоляция от влаги и механических повреждений были выполнены по технологии АО «ВНИКТИ», обеспечивающей возможность длительной и надежной работы измерительных схем без замены и ремонта в условиях работы колесных пар под вагоном [14].

В этой системе данные передаются непрерывно в режиме реального времени и с

**Таблица 2.** Значения боковых и вертикальных нагрузок на колесную пару, определенных тензометрическими датчиками, при различных расстояниях между внутренними гранями ободьев колес

**Table 2.** The values of lateral and vertical loads on the wheelset, determined by strain gauges, at different Distances between the inner faces of the wheel rims

Режим Нагрузок Loading mode	Датчики Sensors	Вертикальная нагрузка на одну буксу Р (тс) Vertical load on one box R (t power)	Боковая нагрузка Н (тс) Lateral load N (t power)	Внутреннее расстояние, мм Internal distance, mm			Эквивалентная вертикальная сила для определения изгибающего момента в подошве рельса, кН Equivalent vertical force to determine the bending moment at the foot of the rail, kN
				$L_1$	$L_2$	$L_3$	
(1) 07.07.2016	Правое колесо Right wheel ОК-1 ОК-2	4,5	2,5	1 441,5	1 441,2	1 441,5	227
(2) 07.07.2016	ОК-1 ОК-2	7,0	4,0	1 441,5	1 440,5	1 441,5	251
(3) 07.07.2016	ОК-1 ОК-2	10,0	7,3	1 441,5	1 439,8	1 441,0	281
(1) 08.07.2016	Левое колесо Left wheel НК-2 НК-3	4,5	2,5	1 441,5	1 440,0	1 441,0	207
(2) 08.07.2016	НК-2 НК-3	7,0	4,0	1 441,0	1 439,8	1 441,0	231
(3) 08.07.2016	НК-2 НК-3	10,0	7,3	1 441,0	1 439,7	1 440,9	260

высокой частотой опроса датчиков. Головное устройство, т.е. компьютер, может совершенно спокойно располагаться на вагоне для приема и обработки информации непосредственно с датчиков. Посредником в этой системе выступает телеметрический тензоусилитель, который преобразует сигналы в частотные импульсы и передает их непосредственно на компьютер [15].

При помощи одного модуля усилителя можно контролировать до четырех датчиков. Тензоусилители телеметрические размещены рядом с датчиками. Выходной сигнал усилителя МТР-NT представляет собой поразрядный РСМ-сигнал, который модулируется для беспроводной передачи и может передаваться на расстоянии до 5 м. Он предназначен для скорости передачи данных до 10 Мбит/с [16, 17].

### Методика определения напряжений на основной площадке земляного полотна по результатам измерений тензодатчиков

Расчетные напряжения шпалы (рис. 7) определяются на основании текущих значений боковых сил ( $F_{6L}$  и  $F_{6R}$ ), действующих на тензометрическую колесную пару со стороны рельсов по максимально вероятной боковой силе, действующей от колеса на рельс (с вероятностью 0,994) [18–20].

Силы можно рассчитать по формулам (1):

$$Y_{6L} = F_{6L}(0,994), Y_{6R} = F_{6R}(0,994), \quad (1)$$

где  $Y_{6L}$ ,  $Y_{6R}$  – максимально вероятная боковая сила, действующая от левого и правого колес на рельс (с вероятностью 0,994), Н;

$$\sigma_h = \sigma_h' + \sigma_{hc}' + \sigma_h'',$$

где  $\sigma_h'$  – напряжения на основной площадке, вызванные давлением основной расчетной

шпалы (под ее подрельсовым сечением) (МПа), вычисляются по формуле (2):

$$\sigma_h' = r_1 \cdot [2,55 \cdot b \cdot h \cdot b_2 + 4h_2 + (0,635 \cdot (b_2 \cdot h - b \cdot 324h_3) - 1,275 \cdot b \cdot h \cdot b_2 + 4h_2) \cdot m] \cdot \sigma_6, \quad (2)$$

где  $r_1$  – параметр учета влияния материала шпал на напряжения (принимают равным 0,8 для деревянных шпал);  $b$  – ширина нижней постели шпалы, м;  $h$  – толщина балластного слоя под шпалой, м;  $m$  – переходный коэффициент от осредненного по ширине шпалы давления на балласт к давлению под осью шпалы (принимается в пределах 1 ... 2), вычисляется по формуле (3):

$$m = 0,89\sigma_6 + 0,435, \quad (3)$$

где  $\sigma_6$  – напряжение под расчетной шпалой на балласте, МПа;  $\sigma_{hc}'$ ,  $\sigma_h''$  – напряжения под соседними шпалами (МПа), вычисляемые по формуле (4):

$$\sigma_{hc}' + \sigma_h'' = r_1 \pi A \sigma_6 \quad (4)$$

где  $A$  – параметр, зависящий от ширины нижней постели шпалы  $b$  и толщины балластного слоя  $h$ , вычисляемый по формуле (5):

$$A = [\theta_1 - \theta_2 + 0,5 \cdot (\sin(\theta_1) - \sin(\theta_2))], \quad (5)$$

где  $\theta_1$  – угол отклонения шпалы по расчетному сечению, град;  $\theta_2$  – угол отклонения шпалы по основной площадке, град.

$$\theta_1 = \arctg l_{ш} + 0,5 \cdot bh, \theta_2 = \arctg l_{ш} + 0,5 \cdot bh,$$

где  $l_{ш}$  – расстояние между осями шпал, м. Напряжения в балласте (аналогично для соседних шпал, полагая их расчетными) под расчетной шпалой (МПа), вычисляются по формуле (6):

$$\sigma_6 = k \cdot l_{ш} \cdot 10 - 62 \cdot \Omega \cdot \alpha \cdot P_{экр}, \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент относительной жесткости рельсового основания, м<sup>-1</sup>;  $\Omega \alpha$  – площадь полшпалы с учетом поправки на ее изгиб, м<sup>2</sup>;  $P_{экр}$  – эквивалентная вертикальная сила, вы-

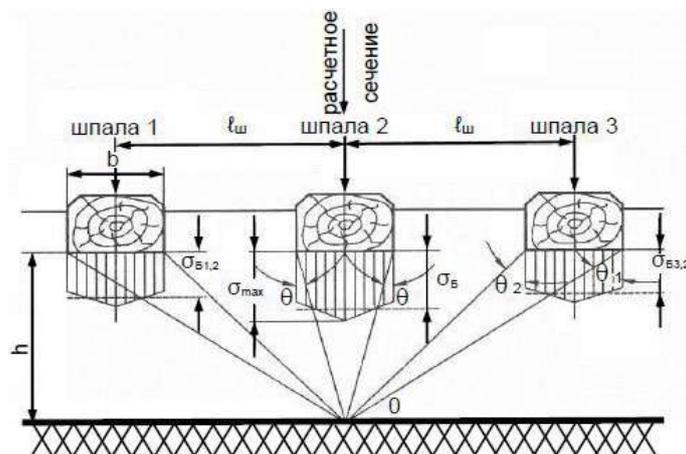


Рис. 7. Расчетная схема определения напряжений на основной площадке земляного полотна  
Fig. 7. Calculation scheme for determining stresses on the main subgrade area

числяемая по формуле (7) для определения давления на шпалу и упругого прогиба от системы сил, Н:

$$P_{\text{эв}} = P_{\text{ср}} + \lambda \cdot S, \quad (7)$$

где  $P_{\text{ср}}$  – среднее значение вертикальной нагрузки на путь (Н), которое вычисляется по формуле  $P_{\text{ср}} = P_{\text{ст}} + P_{\text{рсп}}$ , где  $P_{\text{ст}}$  – статическая нагрузка колеса на рельс, принимаем 115 000 Н;  $P_{\text{рсп}}$  – среднее значение динамической силы от колеса на рельс при вертикальных колебаниях кузова на рессорах, Н;  $\lambda$  – нормирующий множитель, определяющий появление максимальной динамической нагрузки (для уровня вероятности 0,994 нормируемый множитель принимают равным 2,5);  $S$  – среднее квадратичное отклонение вертикальной динамической нагрузки колеса на рельс, Н.

Среднее значение динамической силы от колеса на рельс при вертикальных колебаниях кузова на рессорах вычисляют по формуле (8):

$$P_{\text{рсп}} = 0,75 \cdot P_p, \quad (8)$$

где  $P_p$  – максимальная динамическая сила от колеса на рельс при вертикальных колебаниях кузова на рессорах, принимаем 91 480 Н.

Среднее квадратичное отклонение вертикальной динамической силы от колеса на рельс  $S$  (Н), вычисляется по формуле (9) композиции законов распределения его составляющих:

$$S = \sqrt{S_{p_2}^2 + S_{\text{шп}_2}^2 + 0,95 \cdot S_{\text{шк}_2}^2 + 0,05 \cdot S_{\text{шк}_2}^2}, \quad (9)$$

где  $S_p$  – среднее квадратичное отклонение дополнительного вертикального воздействия на путь от работы рессорного подвешивания (Н), вычисляется как  $S_p = 0,08 \cdot P_p$ ;  $S_{\text{шп}}$  – среднее квадратичное отклонение дополнительных инерционных вертикальных сил от неровности пути (Н), вычисляется по формуле (10):

$$S_{\text{шп}} = 2,034 \cdot 10^{-5} L_{\text{шп}} P_{\text{ср}} \sqrt{Ukq}, \quad (10)$$

где  $L$  – коэффициент, учитывающий тип рельса, шпал и балласта, принимаем 1,1;  $U$  – модуль упругости рельсового основания, принимаем 18 МПа;  $q$  – неподдресоренный вес, приходящийся на одно колесо, у состава, движущегося со скоростью 90 км/ч по пути с рельсами Р50, деревянными шпалами и щебеночным балластом, наибольшая сила составляет 207 000 Н;  $S_{\text{шк}}$  – среднее квадратичное отклонение дополнительного инерционного вертикального усилия на рельсы от влияния непрерывной неровности на

колесе (Н), вычисляется по формуле (11):

$$S_{\text{шк}} = 6,739 \cdot 10^{-3} \alpha_0 UV \sqrt{qdkU} - 326kq \cdot 10^{-6}, \quad (11)$$

где  $d$  – диаметр колеса по кругу катания, 0,95 м;  $\alpha_0$  – коэффициент, характеризующий отношение необдресоренной массы колеса и массы пути, участвующей во взаимодействии (0,433);  $V$  – скорость движения вагона, принимаем 25 м/с;  $S_{\text{шк}}$  – среднее квадратичное отклонение дополнительного вертикального усилия от влияния изолированной неровности на колесе, Н (для скорости движения более 20 км/ч), вычисляется по формуле (12):

$$S_{\text{шк}} = 0,735 \cdot \alpha_0 Uke \cdot 10^6, \quad (12)$$

где  $e$  – глубина плавной изолированной неровности на колесе (принимают равной  $6,7 \cdot 10^{-4}$  м для вагонов с подшипниками качения).

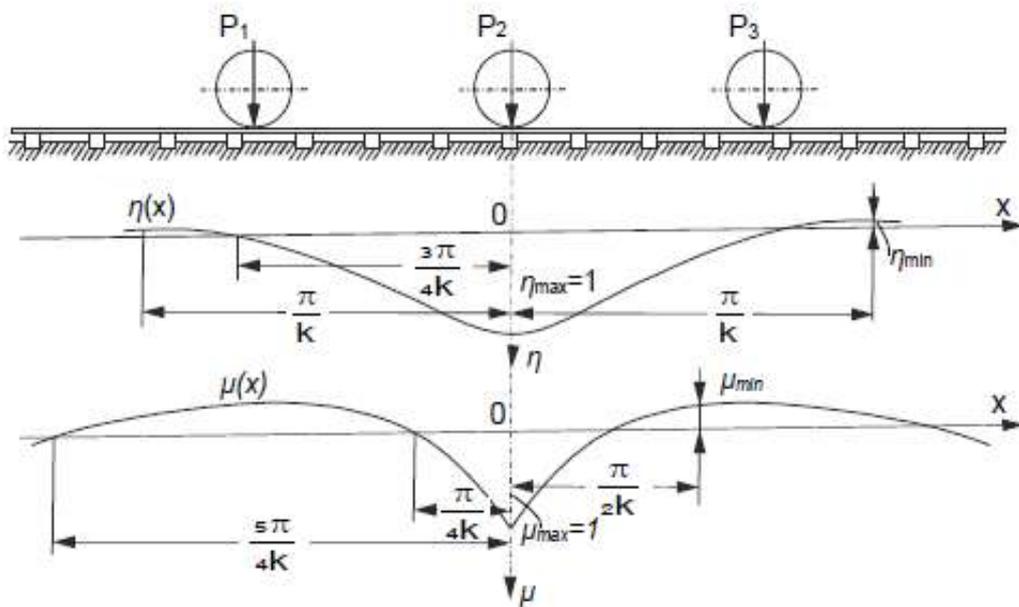
Главной задачей оборудования колесных пар тензометрическими датчиками являются предупреждение вертикальных перегрузок на колесную пару и соблюдение уровней воздействия на путь системы вертикальных и боковых нагрузок, передаваемых колесной парой железнодорожному полотну (рис. 8).

Боковые нагрузки вызывают дополнительное вертикальное загрузление частей тележек с одной стороны вагона и соответствующее разгрузление с другой. Величина такого дополнительного загрузления рассчитываемой детали находится по формуле (13):

$$Y_{6L} = H_{\text{ц}} h_{\text{ц}} + H_{\text{в}} \cdot h_{\text{в}} / m_1 \cdot 2b_2 \quad (13)$$

где  $H_{\text{ц}}$  – центробежная сила, направленная наружу кривой, кН;  $H_{\text{в}}$  – сила давления ветра на кузов вагона;  $m_1$  – количество деталей под вагоном;  $h_{\text{в}}$ ,  $h_{\text{ц}}$  – вертикальные расстояния от места приложения  $Y_6$  до точек приложения сил  $H_{\text{ц}}$  и  $H_{\text{в}}$  соответственно, м.

При снятых значениях с тензометрических датчиков, которые условно меняли значения расстояний между внутренними гранями ободьев колес и, соответственно, менялись боковые нагрузки при увеличении вертикальных, получим значения, по которым определим дополнительную динамическую нагрузку, влияющую на рельсошпальную решетку. В нашем случае загрузление рассматривается до колесной пары и, соответственно, расстояния  $h_{\text{в}}$  и  $h_{\text{ц}}$  – это вертикальные расстояния от места приложения  $Y_6$  до точек приложения сил  $H_{\text{ц}}$  и  $H_{\text{в}}$ .



**Рис. 8.** Линии влияния прогибов  $\eta(x)$  и моментов  $\mu(x)$  от действия системы сил (от расчетного колеса  $P_2$  и от соседних колес  $P_1, P_3$ )

**Fig. 8.** Lines of influence of deflections  $\eta(x)$  and moments  $\mu(x)$  from the action of a system of forces (from calculation wheel  $P_2$  and from adjacent wheels  $P_1, P_3$ )

Данные расчеты, приведенные в табл. 2, показывают, что при увеличении боковых и вертикальных сил возникают дополнительные динамические силы, и их изменение зависит не только от сил, приложенных к данному узлу, но и от расстояния, на котором должны прикладываться силы. Когда оно меняется, значения сил, соответственно, тоже меняются.

### Заключение

Главной задачей проведения данного исследования является выявление смещения шпалы под воздействием силы реакции рельса и внешних причин сдвига рельсошпальной решетки, т.е. устойчивость пути при поперечном сдвиге относительно балласта. Коэффициент устойчивости рельсошпальной решетки напрямую зависит от типа шпал – деревянные и железобетонные, а также увеличения вертикальной нагрузки и сопротивления балласта. При расчете поперечной устойчивости рельсошпальной решетки были проведены замеры сил, действующих на колесные пары, и их влияние на расстройство пути под воздействием циклически меняющейся нагрузки. На основании результатов, полученных при данных рас-

четах, зависимость сдвига при увеличенном колебании кузова вагона возрастает в 1,5 раза, а боковое смещение рельсошпальной решетки, действующее на путь максимально, меняется при увеличенной вертикальной нагрузке от собственного веса вагона или поезда в целом при рассмотрении на большой протяженности, а также дополнительного инерционного вертикального усилия на рельсы от влияния непрерывной неровности на колесе. В соответствии с полученными выводами были проведены расчеты напряжений, а также рассчитаны боковые силы, действующие со стороны рельсов на колесную пару, и вертикальные силы для определения давления на шпалу и упругого прогиба от систем сил. По результатам напряженно-деформированного состояния рельсошпальной решетки действие увеличенной боковой силы приводит к изменению формы рельсовой нити при приложенной силе 40 кН, так как увеличивается сила трения, способствующая смещению рельсошпальной решетки. Дальнейшее ее увеличение приводит к выбросу пути или излому рельса при меняющейся динамической нагрузке от движущегося состава.

### Список литературы

1. Лукин В.В., Анисимов В.Н., Котуранов В.Н. Конструирование и расчет вагонов. М. : УМЦ по образованию на

ж.-д. трансп., 2011. 688 с.

2. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. М. : Транспорт, 1986. 558 с.
3. Желнин Г.Г., Певзнер В.О., Шинкарев Б.С. Исследование зависимостей между показателями динамики подвижного состава и воздействия его на путь // Труды ВНИИЖТ. 1975. № 542. С. 84–92.
4. Пирогова И.А. Рейтинг служб вагонного хозяйства, депо и ПТО дирекций инфраструктуры по итогам работы за I квартал 2021 г. // Вагоны и вагонное хозяйство. 2021. № 2 (66). С. 18–23.
5. Миколайчук Т.А. Эффективность использования современных средств диагностики подвижного состава // Научное сообщество студентов: междисциплинарные исследования : материалы XXIII междунар. студен. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2017. С. 162–167.
6. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Хусидов В.Д. Динамика вагона. М. : Транспорт, 1991. 360 с.
7. Лукин В.В., Анисимов П.С., Федосеев Ю.П. Вагоны. Общий курс. М. : Маршрут, 2004. 424 с.
8. Грачева Л.О., Певзнер В.О., Анисимов П.С. Показатели динамики и воздействия на путь грузовых четырехосных вагонов при различных износах тележек и отступлениях от норм содержания в прямых участках пути // Труды ВНИИЖТ. 1976. № 549. С. 4–25.
9. Ромен Ю.С., Николаев В.Е. Исследование влияния детерминированных неровностей пути в плане на уровень боковых сил при движении грузового вагона // Проблемы механики железнодорожного транспорта. Киев : Наук. думка, 1980. С. 40–42.
10. Кудрявцев Н.Н. Динамические нагрузки ходовых частей грузовых вагонов. М. : Транспорт, 1977. 143 с.
11. Кудрявцев Н.Н. Исследования динамики необрессоренных масс вагонов. М. : Транспорт, 1965. 168 с.
12. Шахуняц Г.М. Железнодорожный путь. М. : Транспорт, 1987. 479 с.
13. Нагорная Ж.А. Текущее содержание пути. М. : Маршрут, 2006. 62 с.
14. Тихомиров В.И. Содержание и ремонт железнодорожного пути. М. : Транспорт, 1969. 344 с.
15. Амелин С.В., Дановский Л.М. Путь и путевое хозяйство. М. : Транспорт, 1972. 214 с.
16. Скалов А.Д., Коваль В.А. Методика исследования вертикальных и боковых сил при износных испытаниях рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 1980. № 6. С. 15–20.
17. Инновационные вагоны и проблемы их взаимодействия с элементами инфраструктуры / В.Н. Филиппов, А.В., Смольянинов И.В. Козлов и др. // Безопасность движения поездов : материалы XVII науч.-практ. конф. М. : МИИТ, 2016. С. 68–73.
18. Мямлин С.В. Моделирование динамики рельсовых экипажей. М. : Новая идеология, 2002. 240 с.
19. Кузович В.М. Динамическая нагруженность специализированных вагонов в криволинейных участках пути : дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 211 с.
20. ГОСТ 34759-2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. Введ. 2023–02–01 с правом досрочного применения. М. : Российский институт стандартизации, 2021. 31 с.

### References

1. Lukin V.V., Anisimov V.N., Koturanov V.N. Konstruirovaniye i raschet vagonov [Design and calculation of wagons]. Moscow: UMTS ZHDT Publ., 2011. 688 p.
2. Verigo M.F., Kogan A.Ya. Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava [Interaction of track and rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1986. 558 p.
3. Zhelnin G.G., Pevzner V.O., Shinkarev B.S. Issledovanie zavisimosti mezhdu pokazatelyami dinamiki podvizhnogo sostava i vozdeistviya ego na put' [Investigation of dependencies between indicators of rolling stock dynamics and its impact on the track]. *Trudy VNIIZhT* [Proceedings of VNIIZhT], 1975, no. 542, pp. 84-92.
4. Pirogova I.A. Reiting sluzhb vagonnogo khozyaistva, depo i PTO direktsii infrastruktury po itogam raboty za I kvartal 2021 g. [Rating of wagon services, depots and technical facilities of infrastructure directorates based on the results of work for the first quarter of 2021]. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo* [Wagons and wagon facilities], 2021, no. 2 (66), pp. 18–23.
5. Mykolaichuk T.A. Effektivnost' ispol'zovaniya sovremennykh sredstv diagnostiki podvizhnogo sostava [Efficiency of using modern means of rolling stock diagnostics]. *Materialy XXIII mezhdunarodnoi studentcheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnoe soobshchestvo studentov: mezhdistsiplinarye issledovaniya»* [Proceedings of the XXIII International Student Scientific and Practical Conference «Scientific community of students: interdisciplinary research»]. Novosibirsk, 2017, pp. 162–167.
6. Vershinskii S.V., Danilov V.N., Khusidov V.D. Dinamika vagona [Wagon Dynamics]. Moscow: Transport Publ., 360 p.
7. Lukin V.V., Anisimov P.S., Fedoseev Yu.P. Vagony. Obshchii kurs [Wagons. General course]. Moscow: Marshrut Publ., 2004. 424 p.
8. Gracheva L.O., Pevzner V.O., Anisimov P.S. Pokazateli dinamiki i vozdeistviya na put' gruzovykh chetyrekhosnykh vagonov pri razlichnykh iznosakh telezhok i otstupleniyakh ot norm soderzhaniya v pryamykh uchastkakh puti [Indicators of the dynamics and impact on the track of freight four-axle wagons with various wear of bogies and deviations from the standards of maintenance in straight sections of the track]. *Trudy VNIIZhT* [Proceedings of VNIIZhT], 1976, no. 549, pp. 4-25.
9. Romen Yu.S., Nikolaev V.E. Issledovanie vliyaniya determinirovannykh nerovnostei puti v plane na uroven' bokovykh sil pri dvizhenii gruzovogo vagona [Investigation of the influence of deterministic track irregularities in the plan on the level of lateral forces during the movement of a freight wagon]. *Problemy mekhaniki zheleznodorozhnogo transporta* [Problems of Railway Transport Mechanics]. Kiev, 1980, pp. 40-42.
10. Kudryavtsev N.N. Dinamicheskie nagruzki khodovykh chastei gruzovykh vagonov [Dynamic loads of running parts of freight wagons]. Moscow: Transport Publ., 1977. 144 p.

11. Kudryavtsev N.N. Issledovaniya dinamiki neobressorenykh mass vagonov [Studies of the dynamics of unsprung masses of wagons]. Moscow: Transport Publ., 1965. 168 p.
12. Shakhunyants G.M. Zheleznodorozhnyi put' [Railway track]. Moscow: Transport Publ., 1987. 479 p.
13. Nagornaya Zh.A. Tekushchee sodержanie puti [The current content of the track]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 62 p.
14. Tikhomirov V.I. Soderzhanie i remont zheleznodorozhnogo puti [Maintenance and repair of the railway track]. Moscow: Transport, 1969. 344 p.
15. Amelin S.V., Danovskii L.M. Put' i putevoe khozyaistvo [Track and track facilities]. Moscow: Transport Publ., 1972. 214 p.
16. Skalov A.D., Koval V.A. Metodika issledovaniya vertikal'nykh i bokovykh sil pri iznosnykh ispytaniyakh rel'sov [Technique for the study of vertical and lateral forces during wear tests of rails]. *Vestnik VNIIZhT*, [Bulletin of All-Union Scientific-Research Institute of Railway Transport], 1980, no. 6, pp. 15–20.
17. Fillipov V.N., Smolyaninov A.V., Kozlov I.V., Podlesnikov Ya.D. Innovatsionnye vagony i problemy ikh vzaimodeistviya s elementami infrastruktury [Innovative wagons and problems of their interaction with infrastructure elements]. *Materialy XVII Nauchno-prakticheskoi konferentsii «Bezopasnost' dvizheniya poezdov»* [Proceedings of the XVII Scientific and Practical Conference «Train Traffic Safety»]. Moscow, 2016, pp. 68-73.
18. Myamlin S.V. Modelirovanie dinamiki rel'sovykh ekipazhei [Modeling the dynamics of rail vehicles]. Moscow: Novaya ideologiya Publ., 2002. 240 p.
19. Kuzovich V.M. Dinamicheskaya nagruzhennost' spetsializirovannykh vagonov v krivolineinykh uchastkakh puti [Dynamic loading of specialized wagons in curved sections of the track]. Ph.D's thesis. Moscow, 2010, 211 p.
20. GOST 34759-2021. Zheleznodorozhnyi podvizhnoi sostav. Normy dopustimogo vozdeistviya na zheleznodorozhnyi put' i metody ispytaniy [State Standard 34759-2021. Railway rolling stock. Standards of permissible impact on the railway track and test methods]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii Publ., 2021. 31 p.

### Информация об авторах

**Арефьева Кристина Валерьевна**, кафедра вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kris.arefeva23@mail.ru.  
**Мартыненко Любовь Викторовна**, старший преподаватель кафедры вагонов и вагонного хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: liuba.martinenko@yandex.ru.

### Information about the authors

**Kristina V. Aref'eva**, Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kris.arefeva23@mail.ru.  
**Lyubov' V. Martynenko**, Assistant Professor of the Department of Wagons and Wagon Facilities, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: liuba.martinenko@yandex.ru.

## Экспериментальные исследования напряженности магнитного поля на электрическом подвижном составе в задачах диагностики и безопасности

И.С. Куприянов✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉xpress14@mail.ru

### Резюме

В статье представлены результаты исследования магнитного поля внутри локомотива ЭПП-065. Частотный состав и распределение внешнего магнитного поля, порождаемого различными узлами и агрегатами подвижного состава, в частности асинхронными электродвигателями, могут использоваться в качестве диагностического параметра. Анализ внешнего магнитного поля позволяет проводить диагностику вспомогательных машин подвижного состава, не выводя их из эксплуатации. В то же время магнитное поле, индуцируемое различными агрегатами внутри подвижного состава, требует изучения для определения степени его влияния на точность постановки диагноза. Не стоит забывать и о влиянии магнитных полей на человека, поскольку описанные в нормативной документации пути решения этой проблемы могут внести изменения в конструкцию подвижного состава и тем самым изменить картину распределения магнитного поля. С целью проведения исследований был разработан специализированный прибор для регистрации уровня и временного сигнала напряженности или магнитной индукции наведенного оборудованием подвижного состава магнитного поля и внешнего магнитного поля асинхронных электродвигателей. В результате экспериментальных исследований установлено, что уровень напряженности магнитного поля в подвижном составе во время его работы значительно превышает допустимые значения как в пике, так и в среднем, что создает угрозу здоровью персонала. Однако с точки зрения диагностики вспомогательных машин уровень средней и пиковой напряженности наведенного магнитного поля меньше, чем у магнитного поля, создаваемого асинхронными электродвигателями, что может влиять на результат диагностики на ранних этапах развития дефектов в виду наличия гармоник основной электромагнитной частоты.

### Ключевые слова

асинхронный электродвигатель, наведенное магнитное поле, внешнее магнитное поле, диагноз, дефект, техническое состояние

### Для цитирования

Куприянов И.С. Экспериментальные исследования напряженности магнитного поля на электрическом подвижном составе в задачах диагностики и безопасности // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 156–164. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).156-164.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 09.06.2023 г.; поступила после рецензирования: 22.06.2023 г.; принята к публикации: 23.06.2023 г.

## Experimental studies of the magnetic field strength on electric rolling stock in problems of diagnostics and safety

I.S. Kupriyanov✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉xpress14@mail.ru

### Abstract

The article presents the results of a study of the magnetic field inside the locomotive EP1P-065. The frequency composition and distribution of the external magnetic field generated by various components and aggregates of rolling stock and, in particular, asynchronous electric motors, can serve as a diagnostic parameter. The external magnetic field analysis will allow diagnostics of auxiliary vehicles of rolling stock without decommissioning them. At the same time, the magnetic field induced by various aggregates inside the rolling stock requires study to determine the degree of its influence on the accuracy of diagnosis. Also we should not forget about the influence of magnetic fields on humans, since the ways to solve this problem described in the regulatory documentation can require changes in the design of rolling stock and thereby change the picture of the distribution of the magnetic field. A device has been developed to register the intensity and time strength signal or magnetic field induced by the internal equipment of the rolling stock. As a result of experimental studies, it was found that the level of magnetic field strength in the rolling stock, during its operation, significantly exceeds the permissible values both at peak and on average, which poses a threat to the health of personnel. For diagnostics of auxiliary machines, the level of the induced magnetic field strength is less than the field created by induction motors. However, it can affect the diagnostic result at the early stages of the development of defects, since it has harmonics of the main electromagnetic frequency in its composition.

**Keywords**

induction motor, induced magnetic field, external magnetic field, diagnosis, defect, technical condition

**For citation**

Kupriyanov I.S. Eksperimental'nye issledovaniya napryazhennosti magnitnogo polya na elektricheskom podvizhnom sostave v zadachakh diagnostiki i bezopasnosti [Experimental studies of the magnetic field strength on electric rolling stock in problems of diagnostics and safety]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 156–164. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).156-164.

**Article Info**

Received: June 9, 2022; Revised: June 22, 2023; Accepted: June 23, 2023.

**Введение**

При распространении электрификации на железнодорожном транспорте и обслуживающей инфраструктуре возникают проблемы с взаимным воздействием магнитных полей (МП) оборудования. В результате появилась необходимость в учете электромагнитной совместимости измерительного оборудования [1] и методов проверки этой устойчивости, описанных в [2]. Это существенно влияет на разработку как средств контроля, так и методики их применения в подвижном составе (ПС).

Магнитные и электрические методы контроля асинхронных электродвигателей (АЭД) по фактическому состоянию требуют проведения исследований магнитных полей, действующих около объекта контроля, поскольку необходимо определить влияние наведенных магнитных полей на общий уровень внешнего магнитного поля (ВМП) объекта диагностики. Также не стоит забывать о воздействии магнитного поля на человека, что ставит вопросы электромагнитной экологии и безопасности.

Для решения проблемы воздействия МП на персонал в нормативных актах введены ограничения путем введения предельно допустимых уровней воздействия (ПДУ).

В России система стандартов по электромагнитной безопасности при проектировании измерительного оборудования опирается на [1, 2] и смежные им документы, а с точки зрения обеспечения безопасности персонала – на ГОСТ

12.1.002-84, ГОСТ 12.1.006-84, ГОСТ 12.1.045-84 и санитарные правила и нормы [3, 4].

В качестве допустимых уровней воздействия МП принимаются такие значения, при которых ежедневное постоянное облучение в свойственных для данного источника излучения режимах, не вызывает у персонала заболеваний или отклонений в состоянии здоровья. Подробно и для конкретных ситуаций требования к рабочим местам приведены в [3, 4] и смежных документах.

При этом для измерительных средств стандарты [1, 2] определяют требования не только к полям вокруг объекта измерения, но и к уровню помех, индуцируемых самим средством измерения.

Интенсивность воздействия МП определяется эффективным значением напряженности ( $H$ , А/м) или магнитной индукции ( $B$ , Тл), связанных выражением (1):

$$B = \mu_0 \cdot H, \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная.

Также существует разделение ПДУ воздействия МП для персонала, которые устанавливаются в зависимости от времени и типа воздействия (общий или локальный) (табл. 1).

Целями данной работы являются:

- создание устройства для фиксации физических характеристик МП локомотива;
- получение результатов диагностики АЭД по параметрам ВМП; анализ влияния наведенных МП на параметры ВМП АЭД и персонал путем

**Таблица 1.** Предельно допустимые уровни магнитных полей  
**Table 1.** Maximum permissible levels of magnetic fields

Время пребывания, ч Stay time, h	Допустимые уровни магнитного поля, Н/В при воздействии Permissible levels of the magnetic field, N/V under exposure	
	Общем General	Локальном Local
≤ 1	1 600/2 000	6 400/8 000
2	800/1 000	3 200/4 000
4	400/500	1 600/2 000
8	80/100	800/1 000

соотнесения их с допустимыми значениями, установленными нормативной документацией;

– предложения по снижению негативного воздействия электромагнитного излучения на работников, обслуживающих ПС железных дорог.

### Разработка и настройка прибора

Для проведения регистрации параметров ВМП АЭД и уровня магнитной индукции в ПС был разработан прибор на основе элемента Холла SS94A1F (Honeywell), базовые характеристики которого приведены в табл. 2. Функциональная схема прибора представлена на рис. 1.

Прибор состоит из двух основных элементов цифрового блока (используется персональный компьютер с аналого-цифровым преобразователем) и блока датчика. Блок датчика размещен в экранированном корпусе и состоит из трех субблоков: непосредственно датчика Холла, каскада усиления и фильтрации и элемента питания.

Фильтры каскада усиления выбраны исходя из источников [5–8], поскольку основное назначение прибора – контроль ВМП АЭД.

Внешний вид блока датчика показан на рис. 2.

Таблица 2. Характеристики датчика SS94A1F

Table 2. Sensor Characteristics S94A1F

Характеристика Characteristic	Значение Value
Чувствительность, мВ/Гаусс Sensitivity, mV/Gauss	25±5
Линейность диапазона, % Range linearity, %	–0,8(max 1,5)
Ошибка температуры (при 25 °С) сдвиг нуля, %/°С Temperature error (at 25 °С) sensitivity, %/°С	± 0,1
Ошибка температуры (при 25 °С) чувствительность, %/°С Temperature error (at 25 °С) sensitivity, %/°С	0,055%/0,2
Магнитный диапазон Magnetic range	–10 мТл ... 10 мТл
Диапазон рабочих температур, °С Operating temperature range, °С	–40 ... +125



Рис. 1. Структурная схема прибора регистрации напряженности и индукции магнитного поля  
Fig. 1. Block diagram of the device for registering the intensity and induction of the magnetic field



Рис. 2. Внешний вид блока датчика в корпусе:  
1 – защитный колпачок чувствительного элемента; 2 – экранированный кабель; 3 – экранированный корпус

Fig. 2. The appearance of the sensor unit in the body:  
1 – protective cap of the sensor element; 2 – shielded cable; 3 – shielded body

Проведение настройки и калибровки системы осуществлялось на специализированном стенде с использованием магнитоизмерительного прибора Ф-205.30А и цифрового вольтметра В7-35. Для этого была определена зависимость величины выходного напряжения с аналоговой части прибора от угла поворота датчика (диаграмма направленности) относительно нормали ВМП, приложенного калибровочным стендом, где 0 – перпендикулярное положение блока датчика относительно нормали магнитной индукции калибровочного стенда. Диаграмма направленности для блока датчика приведена на рис. 3.

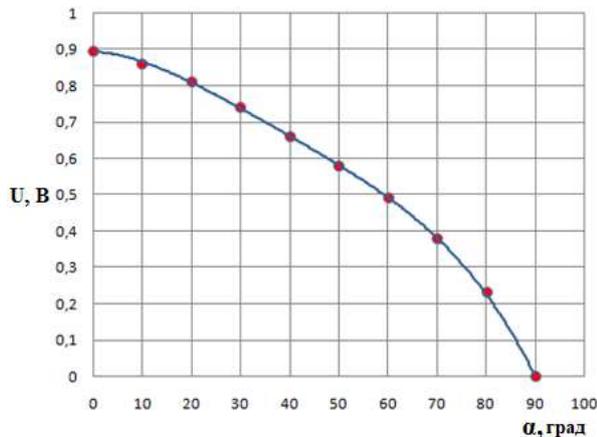


Рис. 3. Диаграмма направленности блока датчика  
Fig. 3. Radiation pattern of the sensor unit

График на рис. 3 показывает, что максимальная амплитуда выходного сигнала наблюдается при расположении блока датчика перпендикулярно относительно нормали к источнику магнитной индукции, при параллельном расположении относительно нормали магнитной индукции амплитуда минимальна.

Фильтрация выбросов при оценке погрешности системы осуществлялась по критерию Шовене, в рамках которого из ряда измерений количеством  $N$  выбирается аномальное значение измерения  $x_r$  и по выражению (2) вычисляется модуль его отклонения от среднего значения  $Z$ :

$$Z = \frac{x_r - \langle x \rangle}{S_x}, \quad (2)$$

где  $\langle x \rangle$  – выборочное среднее значение величины,  $S_x$  – выборочное среднее квадратичное значение отчетов.

Выборочное среднее значение определяется по формуле (3):

$$\langle x \rangle = \frac{\sum_{n=1}^N x_n}{N}, \quad (3)$$

где  $x_n$  – действительное значение величины (значение отчета).

Выборочное среднее квадратичное отклонение значений отчетов в рамках доверительного интервала  $[\langle x \rangle - \Delta, \langle x \rangle + \Delta]$  вычисляется по выражению (4):

$$S_x = \sqrt{\sum_{n=1}^N (x_n - \langle x \rangle)^2}. \quad (4)$$

Так как выборочное среднее квадратическое отклонение  $S_x$  является случайной величиной, то при оценке разброса принимаемых  $S_x$  значений относительно истинного значения измеренной величины в рамках доверительного интервала используют выборочное среднее квадратическое отклонение среднего значения, которое вычислим по формуле (5):

$$S_{\langle x \rangle} = \frac{S_x}{\sqrt{N}}. \quad (5)$$

Тогда случайную составляющую погрешности  $\Delta_x$  для серии измерений вычислим по формуле (6):

$$\Delta_x = \frac{S_x}{\sqrt{N}} \cdot t_a = S_{\langle x \rangle} \cdot t_a, \quad (6)$$

где  $t_a$  – безразмерный коэффициент Стьюдента.

Систематическая  $\Delta_C$  (инструментальная) погрешность прибора определяется по формуле (7):

$$\Delta_C = \frac{k \cdot A}{100}, \quad (7)$$

где  $k$  – класс точности средства измерений,  $A$  – предел шкалы прибора.

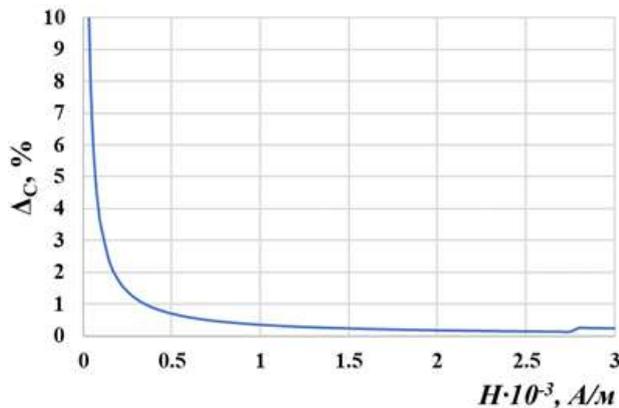
Полная погрешность прибора состоит из систематической  $\Delta_C$  и случайной погрешности  $\Delta_x$  и определяется выражением (8):

$$\Delta_S = \sqrt{\Delta_C^2 + \Delta_x^2}. \quad (8)$$

График изменения полной  $\Delta_S$  погрешности в нормальных условиях, рассчитанной по выражениям (6)–(8) при коэффициенте Стьюдента, принятом  $t_a = 0,95$ , и пределе шкалы прибора 3 000 А/м, приведен на рис. 4.

Как видно из графика на рис. 4, погрешность прибора находится в пределах 5 % на диапазоне измерений 60–3 000 А/м и резко увеличивается на диапазоне 0–60 А/м. Также наблюдается небольшое увеличение погрешности ближе к пределу шкалы в интервале 2 800–

3 000 А/м. Это объясняется особенностями используемой элементной базы в блоке усилителя сигнала датчика Холла.



**Рис. 4.** График изменения погрешности в зависимости от измеряемой величины  
**Fig. 4.** Graph of error changes depending on the measured value

Поскольку условия окружающей среды внутри ПС, помимо кабины машиниста, отличаются от нормальных, это влечет за собой увеличение погрешности измерений. Поэтому для оценки итоговой  $\Delta_{\Sigma}$  погрешности необходимо: учитывать погрешность чувствительности элемента Холла и элементной базы каскада усиления и фильтрации от температуры окружающей среды. Исходя из этого примем, что дополнительная погрешность  $\Delta_{\text{доп}}$  прибора в крайних точках температурного диапазона работы от  $-20$  до  $+50$  °С будет не более основной  $\Delta_s$  (полной) погрешно-

сти. То есть итоговую погрешность прибора  $\Delta_{\Sigma}$  на всем диапазоне температур его работы примем равной сумме основной  $\Delta_s$  (полной) и дополнительной и вычислим по формуле (9):

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_s + \Delta_{\text{доп}} = 2\Delta_s, \quad (9)$$

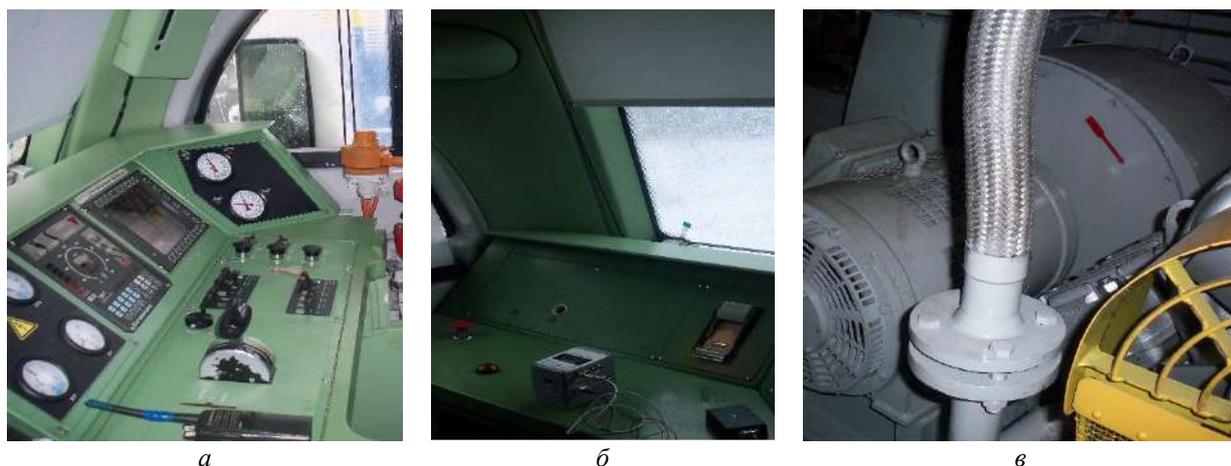
Тогда интервал измерений, на котором погрешность  $\Delta_{\Sigma}$  не превышает 5 %, т.е. на котором возможна уверенная регистрация уровня напряженности МП, смещается в интервал 100–3 000 А/м, что, согласно [9, 10], не приведет к проблемам при регистрации напряженности ВМП АЭД, используемых в качестве вспомогательных машин в ПС [8–10].

В то же время погрешность в диапазоне границы ПДУ (для переменных МП, согласно [3, 4], составляющей 80 А/м) при расчете погрешности  $\Delta_{\Sigma}$  в диапазоне 80–100 А/м по формуле (9) составит 8 %. Это не позволит уверенно регистрировать незначительные превышения уровня МП, небезопасного для персонала.

### Экспериментальные исследования

Оценка влияния электромагнитного фона на возможность измерения ВМП АЭД и соответствия нормам [1–4] при полностью включенном оборудовании в ПС проводилась в электровозе ЭП1П-065 в зимнее время года в трех точках (рис. 5).

Положение и ориентация в пространстве блока датчика прибора выбиралась с учетом диаграммы направленности (см. рис. 3) для регистрации максимального уровня напряженности МП. Временные сигналы напряженности МП,



**Рис. 5.** Зоны измерения магнитного поля в локомотиве ЭП1П-065:

*a* – зона машиниста; *б* – зона помощника машиниста, *в* – зона вспомогательных машин

**Fig. 5.** Magnetic field measurement zones in the locomotive EP1P-065:

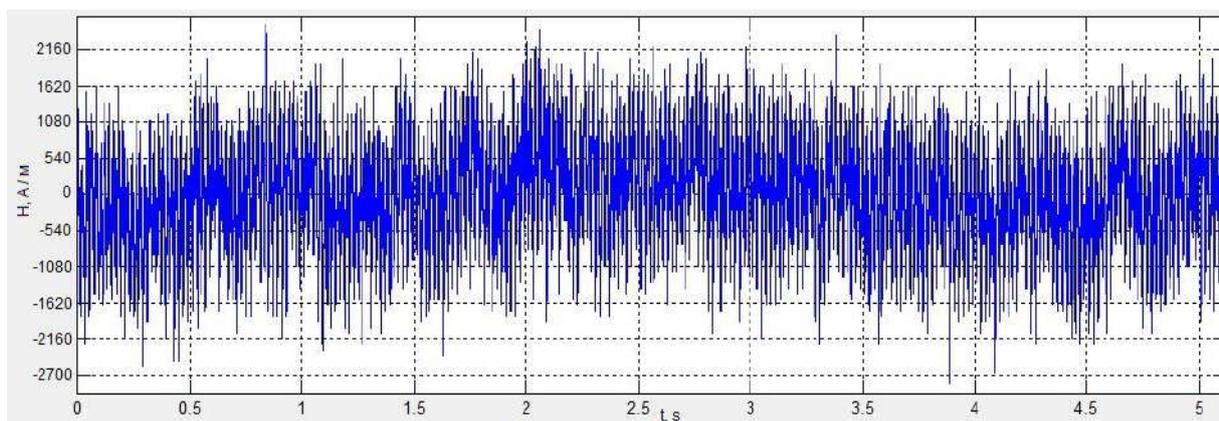
*a* – zone of the driver; *b* – zone of the assistant driver; *c* – zone of auxiliary machines

полученные в результате измерений, представлены на рис. 6.

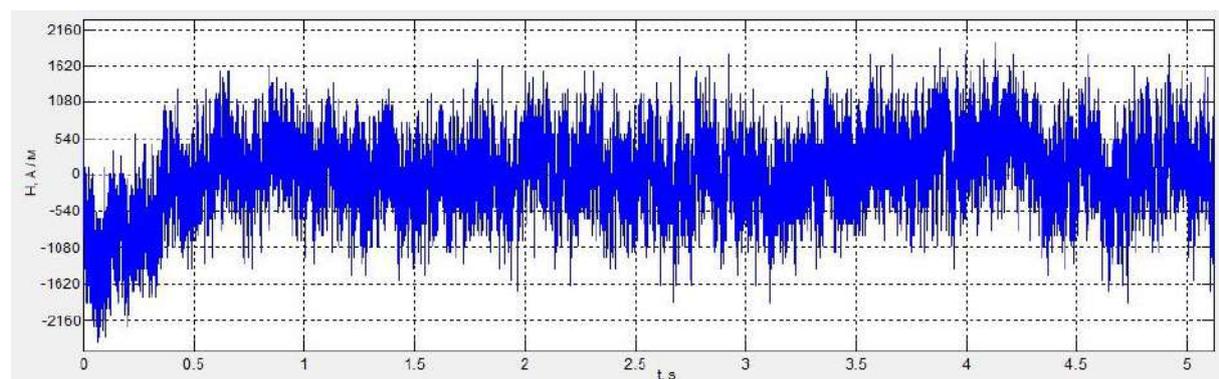
Как видно из представленных графиков в зоне кабины машиниста пиковое значение напряженности магнитного поля достигает 2160 А/м, а в зоне помощника машиниста – 1620 А/м. Данные значения превышают допустимые нормы [3, 4] в 27 и 20 раз соответственно, но эти МП не действуют постоянно.

Уровень напряженности постоянно действующего МП находится в диапазоне 200–500 А/м, что также превышает допустимые нормы более чем в 5 раз.

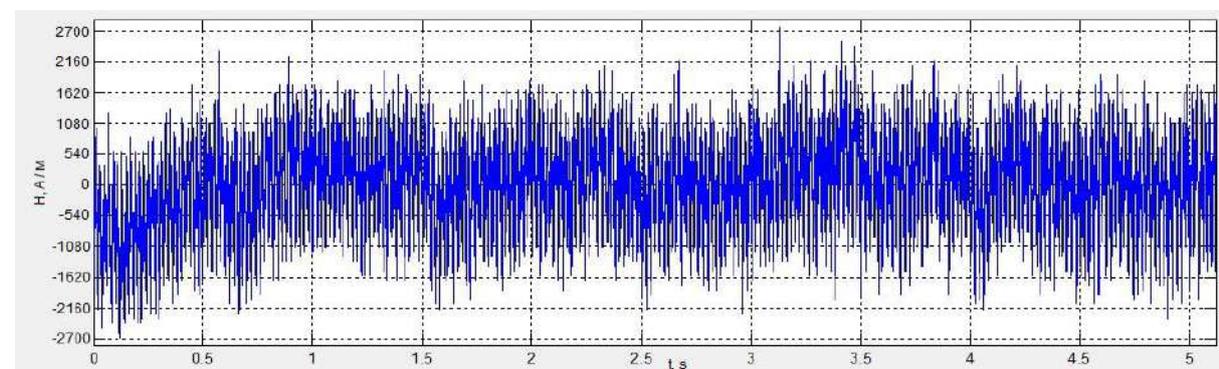
Причиной этого могут служить, например, колебания контактной сети в результате движения локомотива, что приводит к колебаниям воздушного зазора. Изменение величины зазора в условиях повышенной влажности или



а



б



в

**Рис. 6.** Временной сигнал магнитной индукции в электровозе ЭП1П-065:

а – зона машиниста; б – зона помощника машиниста; в – зона вспомогательных машин

**Fig. 6.** Time signal of magnetic induction in electric locomotive EP1P-065:

а – driver's zone; б – driver's assistant zone; в – zone of auxiliary machines

запыленности приводит к возникновению дуговых процессов или искрению, которые в свою очередь провоцируют всплеск напряженности МП. Также порождающие всплески напряженности МП кратковременные электрические дуги между контактной сетью и токоприемником могут возникнуть как следствие некачественного токосъема.

При этом в качестве основного источника повышенного электромагнитного фона в кабине стоит рассматривать тяговый двигатель, контактную сеть, вспомогательное оборудование и их дефекты: искрение щеток тягового двигателя, нарушение симметрии фаз внутренней питающей сети локомотива, короткие замыкания.

В зоне расположения вспомогательных машин (машинном отделении) (см. рис. 6, в), максимальное значение напряженности МП достигает 2 700 А/м. Это также превышает допустимый уровень согласно в 34 раза [3, 4], но данная зона не является зоной длительного пребывания человека в процессе работы ПС. Поэтому подобные значения напряженности МП можно принять условно допустимыми при соблюдении правил и ограничении времени пребывания в данной зоне [3, 4]. Средний уровень напряженности наведенного МП находится в пределах значений диапазона 200–500 А/м.

Пики напряженности МП, амплитуда которых превышает уровень 1 600 А/м, не могут являться признаками наличия дефектов АЭД [9–11]. Пики меньше порогового уровня 1 600 А/м могут создавать сложности при диагностике АЭД малой мощности на холостом ходу [12]. Общий уровень индуцируемого ВМП при исправной работе двигателей мощностью до 15 кВт будет, согласно исследованиям [12, 13], примерно соответствовать среднему уровню наведенного МП, что создает сложности в диагностике и может вызвать ошибку в постановке диагноза. Это связано с тем, что наведенное МП имеет в частотном составе гармоники основной электромагнитной частоты АЭД  $2f_c$ , т.е. частоты  $nf_c$ , где  $f_c = 50$  Гц.

В то же время у АЭД, используемых в ПС в качестве вспомогательных машин, а именно: НВА-55, АЭ92-4 и АЭД серии АНЭ-255 мощностью 55 кВт, ВМП в режиме холостого хода, согласно [12, 14–16], значительно выше уровня 200 А/м, что снижает влияние наведенного МП на результат их диагностики по параметрам

ВМП. Но особенности частотного состава наведенного МП (наличие гармоник основной электромагнитной частоты АЭД  $2f_c$ ), могут оказывать влияние на результат диагностики на ранних этапах развития дефекта [8, 10, 16, 17].

### Методы уменьшения воздействия магнитных полей

Поскольку локомотив представляет собой сложный технический объект с предельной плотной компоновкой узлов, работающих в сложных условиях, то из всех известных методов борьбы с наведенным МП доступными остаются только два: ограничение времени пребывания персонала и экранирование. Способ, предполагающий ограничение времени пребывания актуален лишь для машинного отделения, в котором не требуется постоянное присутствие персонала, но полностью не применим для диагностического оборудования [1, 2]. Также в зоне кабины управления в рамках работы машиниста и помощника ввести ограничение пребывания, равное не более 1 ч [3, 4], не представляется возможным. Поэтому единственным методом снижения уровня напряженности МП для персонала до допустимых значений является экранирование кабины от поля, порождаемого контактной сетью и основными источниками излучения, расположенными в машинном отделении. Для эффективного экранирования необходим метод, позволяющий не разрывать связь экрана с заземлением в процессе движения в широком диапазоне температур и сложных условиях работы подвижного состава, а также не нарушающий работу систем управления ПС [18–20].

### Заключение

В результате проведенных исследований МП в ПС было установлено, что уровень напряженности МП в машинном отделении не будет оказывать значительного влияния на возможность диагностики вспомогательных машин по параметрам ВМП, так как уровень напряженности ВМП АЭД, используемых в подвижном составе, значительно выше среднего уровня наведенных МП. В то же время наведенное поле может вызвать ошибку постановки диагноза на ранних этапах развития дефекта, что нежелательно. Для решения этой проблемы наиболее целесообразно:

1. Провести дальнейшие исследования диагностических признаков, проявляющихся в ВМП электродвигателей при наличии дефектов и ввести пороговые уровни диагностических признаков, согласованных с электромагнитной картиной распределения МП в ПС, что позволит снизить ошибку постановки диагноза.

2. Обеспечить экранирование диагностического оборудования, в частности аналогового блока, согласно диаграмме направленности датчиков регистрации ВМП. Это позволит мак-

симально исключить влияние наведенного МП на поле, индуцируемое объектом контроля.

В то же время для персонала уровень напряженности МП в кабине управления превышает допустимые нормы. Для средних значений до 5 раз, а пиковых – до 27 раз, что, согласно принятым санитарным нормам, создает угрозу здоровью персонала. Данная ситуация в современных условиях и в рамках законодательной базы может быть решена экранированием кабины машиниста.

### Список литературы

1. ГОСТ Р МЭК 61326-1-2014 Оборудование электрическое для измерения, управления и лабораторного применения. Требования электромагнитной совместимости. Ч. 1. Общие требования. Введ. : 2016–01–01. М. : Стандартинформ, 2014. 22 с.
2. О введении в действие межгосударственного стандарта : приказ Росстандарта от 31.08.2021 № 894-ст. Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» в локал. сети.
3. Об утверждении санитарных правил СП 2.4.3648-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи» : постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.09.2020 г. № 28. Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» в локал. сети.
4. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» : постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2. Доступ из справ.-прав. системы «КонсультантПлюс» в локал. сети.
5. Аполлонский С.М., Горский А.Н. Электромагнитная среда на электрифицированном транспорте // Развитие устройств электрической тяги : сб. науч. трудов. СПб., 2004. С. 28–37.
6. Аполлонский С.М., Горский А.Н. Методы анализа электромагнитной совместимости // Электроника и электрооборудование транспорта. 2016. № 5. С. 33–38.
7. Аполлонский С.М., Горский А.Н. Проблемы электромагнитной безопасности в урбанизированном пространстве // Электричество. 2020. № 7. С. 65–73.
8. Лукьянов А.В., Мухачев Ю.С., Бельский И.О. Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 61–69.
9. Xin G. Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles : master's Thesis. Göteborg : Chalmers University of Technology, 2014. 68 p.
10. Kelvin C. Maliti Modelling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors : doctoral dissertation. Stockholm : Royal Institute of Technology, 2000. 209 p.
11. Nandi S., Toliyat A., Li X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review // IEEE transactions on energy conversion. 2005. Vol. 20, № 4. P. 32–37. DOI 10.1109/TEC.2005.847955.
12. Вольдек А.И. Электрические машины. Л. : Энергия, 1978. 832 с.
13. Benbouzid M.E.H. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1999. Vol. 14, Is. 4. P. 1065–1074. DOI 10.1109/60.815029.
14. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы электрических системах. М. : Энергия, 1970. 520 с.
15. Брынский Е.А., Данилевич Я.Б., Яковлев В.И. Электромагнитные поля в электрических машинах. Л. : Энергия, 1979. 176 с.
16. Liang B., Ball A.D., Iwnicki S.D. Simulation and fault detection of three-phase induction motors // IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering (TENCOM' 02). Beijing, 2002. Vol. 3. P. 1813–1817. DOI: 10.1109/TENCON.2002.1182688.
17. Сурков Д.В. Электромагнитные способы определения эксцентриситета и несимметрии короткозамкнутой клетки ротора асинхронных двигателей : дис. ... канд. техн. наук. Оренбург, 2008. 126 с.
18. Конструирование экранов и СВЧ-устройств / А.М. Чернушенко, Б.В. Петров, Л.Г. Малорацкий и др. М : Радио и связь, 1990. 350 с.
19. Аполлонский С.М. Справочник по расчету электромагнитных экранов. Л. : Энергоатомиздат, 1988. 223 с.
20. Горский А.Н., Васильева Л.К. Электромагнитные излучения и защита от них. СПб. : ПГУПС, 2000. 100 с.

### References

1. GOST R MEK 61326-1-2014 Oborudovanie elektricheskoe dlya izmereniya, upravleniya i laboratornogo primeneniya. Trebovaniya elektromagnitnoi sovmestimosti. Chast' 1. Obshchie trebovaniya [IEC 61326-1: 2012 Electrical equipment for measurement, control and laboratory use – EMC requirements – Part 1: General requirements]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 22 p.
2. Prikaz Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 31.08.2021 g. N 894-st «O vvedenii v deistvie mezhgosudarstvennogo standarta» [Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated August 31, 2021 N 894-st «On the introduction of the interstate standard»].

3. Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 28.09.2020 g. N 28 «Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil SP 2.4.3648-20 «Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k organizatsiyam vospitaniya i obucheniya, otdykha i ozdorovleniya detei i molodezhi» [Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated September 28, 2020 N 28 «On the approval of the sanitary rules 2.4.3648-20 «Sanitary and epidemiological requirements for organizations of upbringing and training, recreation and health improvement of children and youth»].
4. Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 28.01.2021 g. N 2 «Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil i norm SanPiN 1.2.3685-21 «Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredi obitaniya» [Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated January 28, 2021 N 2 «About the approval of sanitary rules and norms 1.2.3685-21 «Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans»].
5. Apollonskii S.M., Gorskii A.N. Elektromagnitnaya sreda na elektrifitsirovannom transporte [Electromagnetic environment on electrified transport]. *Sbornik nauchnykh trudov «Razvitie ustroystv elektricheskoi tyagi»* [Proceedings «Development of electric traction devices»]. Saint Petersburg, 2004, pp. 28–37.
6. Apollonskii S.M., Gorskii A.N. Metody analiza elektromagnitnoi sovmestimosti [Methods of electromagnetic compatibility analysis]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], 2016, no. 5, pp. 33–38.
7. Apollonskii S.M., Gorskii A.N. Problemy elektromagnitnoi bezopasnosti v urbanizirovannom prostranstve [Issues of electromagnetic safety in urbanized space]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2020, no. 7, pp. 65–73.
8. Luk'yanov A.V., Mukhachev Yu.S., Bel'skii I.O. Issledovanie kompleksa parametrov vibratsii i vneshnego magnitnogo polya v zadachakh diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigatelei [Investigation of the complex parameters of vibration and external magnetic field in the problems of diagnostics of asynchronous electric motors]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2014, no. 2 (22), pp. 61–69.
9. Xin G. Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles : master's Thesis. Göteborg : Chalmers University of Technology, 2014. 68 p.
10. Kelvin C. Maliti Modelling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage induction motors: Doctoral Dissertation // Royal Institute of Technology. Stockholm, 2000. 209 p.
11. Nandi S., Toliyat A., Li X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review. *IEEE transactions on energy conversion*. 2005, vol. 20, no. 4, pp. 32–37.
12. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Leningrad: Energiya Publ., 1978. 832 p.
13. Benbouzid M.E.H. Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1999, vol. 14, no. 4, pp. 1065–1074.
14. Ul'yanov S.A. Elektromagnitnye perekhodnye protsessy elektricheskikh sistemakh [Electromagnetic transient processes in electrical systems]. Moscow: Energiya Publ., 1970. 520 p.
15. Bryn'skii E.A., Danilevich Ya.B., Yakovlev V.I. Elektromagnitnye polya v elektricheskikh mashinakh [Electromagnetic fields in electric machines]. Leningrad: Energiya Publ., 1979. 176 p.
16. Liang B., Ball A.D., Iwnicki S.D. Simulation and fault detection of three-phase induction motors. *2002 IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering (TENCOM' 02)*. Beijing, 2002, vol. 3, pp. 1813–1817. DOI: 10.1109/TENCON.2002.1182688.
17. Surkov D.V. Elektromagnitnye sposoby opredeleniya ekscentrisiteta i nesimmetrii korotkozamknutoi kletki rotora asinkhronnykh dvigatelei [Electromagnetic methods for determining the eccentricity and asymmetry of a short-circuited rotor cage of asynchronous motors]. Ph.D.'s thesis. Orenburg, 2008, 126 p.
18. Chernushenko A.M., Petrov B.V., Maloratskii L.G., Melanchenko N.E., Bal'sevich A.S. Konstruirovaniye ekranov i SVCh-ustroystv [Designing screens and microwave devices]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1990. 350 p.
19. Apollonskii S.M. Spravochnik po raschetu elektromagnitnykh ekranov [Handbook on the calculation of electromagnetic screens]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1988, 223 p.
20. Gorskii A.N., Vasil'eva L.K. Elektromagnitnye izlucheniya i zashchita ot nikh [Electromagnetic radiation and protection against them]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2000. 100 p.

#### Информация об авторах

**Куприянов Иван Сергеевич**, старший преподаватель кафедры физики, механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: xpress14@mail.ru.

#### Information about the authors

**Ivan S. Kupriyanov**, Assistant Professor of the Department of Physics, Mechanics and Instrumentation, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: xpress14@mail.ru.

**Современные технологии**

**Системный анализ**

**Моделирование**

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ  
И ОБРАБОТКА**

**INFORMATION TECHNOLOGY, MANAGEMENT  
AND PROCESSING**

## Анализ культуры безопасности ОАО «Российские железные дороги»

В.С. Асламова✉, И.А. Умудова

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉aslamovav@yandex.ru

### Резюме

В статье рассматриваются организационная и корпоративная культуры и связи между ними. Приводится общее понятие культуры безопасности, данное в приказе Ростехнадзора, для нефтегазовой сферы и транспортной компании ОАО «РЖД». Показана значимость культуры безопасности для развития как корпоративной культуры, так и самой организации. Представлена модель кооперативной культуры ОАО «РЖД», ее структурная схема, принципы создания и присущие признаки культуры безопасности движения, по которым можно оценить ее зрелость. Описаны пять уровней зрелости культуры безопасности ОАО «РЖД». Анализируются результаты оценки культуры безопасности в Иркутской дистанции электроснабжения, проведенной методом анкетирования. Выявлено, что по признакам управляемости процессов деятельности, обеспечению безопасности движения, ведущей роли менеджмента в обеспечении ресурсами и демонстрации личного примера культура безопасности располагается на предпозитивном (среднее значение баллов, полученных за ответы, равно 3,8 в группе линейного персонала) и позитивном (среднее значение баллов 4,3 в группе руководителей) уровнях; по признаку двухстороннего обмена информацией культура безопасности находится на позитивном уровне (среднее значение баллов 4,3 и 4,5 соответственно); по признаку вовлечения работников в решение проблем безопасности движения культура безопасности располагается на среднем и предпозитивном уровнях (среднее значение баллов по первой и второй группам 3,04 и 3,60 соответственно); по признаку непрерывности отслеживания решений проблем безопасности движения и формирования определенных выводов в случаях ее нарушения культура безопасности находится на предпозитивном уровне (среднее значение баллов 3,8 и 4,0 соответственно), что свидетельствует о недостатках в функционировании системы по предупреждению возникновения рисков нарушения движения железнодорожного транспорта; по признаку признания существования системных причин нарушений безопасности движения культуре безопасности соответствует предпозитивный уровень (среднее значение баллов 3,6 и 4,1), что может говорить о недостатках в построении причинно-следственных связей и об отсутствии анализа нарушений безопасности движения, а также о неуверенности работников в установлении действительных причин допущенного нарушения и правильного определения виновных лиц. Были проанализированы итоги деятельности компании ОАО «РЖД» в 2020 г. Выявлено, что средняя оценка зрелости культуры безопасности движения по претворению в жизнь ключевых инициатив по развитию ОАО «РЖД» равна 3,8 балла, что соответствует уровню «определенный», при котором не всегда отклонения от процедур отслеживаются. Следует отметить повышение оценок всех процессов культуры безопасности движения в 2020 г.

### Ключевые слова

организационная культура, культура безопасности, корпоративная культура, кооперативная культура ОАО «РЖД», оценка зрелости культуры безопасности

### Для цитирования

Асламова В.С. Анализ культуры безопасности ОАО «Российские железные дороги» / В.С. Асламова, И.А. Умудова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 166–175. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).166-175.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 14.03.2023 г.; поступила после рецензирования 21.06.2023 г.; принята к публикации 22.06.2023 г.

## Analysis of the safety culture of the JSC «Russian Railways»

V.S. Aslamova✉, I.A. Umudova

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

✉aslamovav@yandex.ru

### Abstract

The article discusses the definitions of organizational and corporate cultures and the relationship between them. The general concept of a safety culture, given in the order of Rostekhnadzor, for the oil and gas sector and the transport company JSC «Russian Railways» has been given. The importance of the safety culture for the development of both the corporate culture and the organization itself is shown. The model of the cooperative culture of JSC «Russian Railways», the block diagram, the principles of creation and the inherent signs of a traffic safety culture are presented, by which its maturity can be assessed. The five levels of maturity of the Russian Railways company's safety culture are described. The results of the assessment of safety culture in the Irkutsk distance of power supply, carried out by the questionnaire method, are considered. It was revealed that according to the

signs: controllability of activity processes, ensuring traffic safety, the leading role of management in providing resources and demonstrating a personal example, the safety culture is located on the pre-positive (average scores received for answers, equal to 3,8 in group 1 of line personnel ) and positive (in the group of 2 leaders of the average scores – 4,3) levels. On the basis of the two-way exchange of information, the safety culture is at a positive level (average scores in group 1 – 4,3, in group 2 – 4,5). Based on the involvement of employees in solving traffic safety problems, the safety culture is located at the average (in group 1 of the average scores – 3,04) and the pre-positive (in group 2 of the average scores – 3,6) levels. On the basis of the continuity of tracking solutions to traffic safety problems and identifying lessons from cases of its violations, the safety culture is at a pre-positive level (in group 1 of the average scores – 3,8, in group 2 of the average scores – 4,0). This indicates the shortcomings of the functioning of the system to prevent the occurrence of risks of railway traffic disruption. Based on recognition of the existence of systemic causes of traffic safety violations, the safety culture corresponds to a pre-positive level (in group 1, average scores – 3,6, in Group 2 average scores – 4,1). This may indicate the shortcomings of the constructed causal relationships and the lack of analysis of traffic safety violations, as well as the employees' uncertainty in establishing the actual causes of the violation and the correct identification of the perpetrators. The results of the activities of the Russian Railways company in 2020 were analyzed. It was revealed that the average assessment of the visibility of the traffic safety culture is equal to 3.80 points for the implementation of key initiatives for the development of JSC «Russian Railways», which corresponds to the «certain» level, characterized by the fact that deviations from procedures are not always tracked. The increase in assessments of all processes of the traffic safety culture in 2020 should be noted.

### Keywords

organizational culture, safety culture, corporate culture, cooperative culture of JSC «Russian Railways», assessment of maturity of safety culture

### For citation

Aslamova V.S., Umudova I.A. Analiz kul'tury bezopasnosti OAO « Rossiiskie zheleznye dorogi» [Analysis of the safety culture of the JSC «Russian Railways»]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 166–175 DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).166-175.

### Article Info

Received: March 14, 2023; Revised: June 21, 2023; Accepted: June 22, 2023.

### Актуальность исследования

Для исполнения главных функций управления производственной безопасностью (ПБ) нужна развитая организационная культура (ОК), в основу которой положена система всеобщих для работников данного предприятия сформированных ценностей, норм и убеждений. Культура безопасности (КБ) трудовой деятельности, экологической безопасности, движения взаимосвязана с другими элементами ОК. ОК рассматривается как объединение функциональной управленческой культуры, внутренних коммуникаций, организации труда, взаимодействия с внешними клиентами, КБ. Особенно актуально совершенствование КБ для ОАО «РЖД» [1–4] и других транспортных компаний [5], в которых еще высок производственный травматизм, связанный с внедрением технологий, характером деятельности и усложнением используемой техники, которые служат источниками угроз и рисков в области ПБ. Формирование и интегрирование КБ во всех областях производства, повышение уровня ее зрелости позволит достичь высокого уровня ПБ, так как КБ, технология производства и управление – ключевые факторы, которые вли-

ают на результативность функционирования любого предприятия [1, 4–6].

Следует отметить, что в настоящее время единого определения термина КБ для различных отраслей не существует. Так, в приказе Ростехнадзора [7] под КБ понимают совокупность характеристик и отношений, которые устанавливают, что вопросам защиты и безопасности уделяется внимание, соответствующее их значимости. Под КБ в нефтегазовой сфере понимают квалификационную и психологическую подготовленность всех лиц, для которых приоритетной целью и внутренней потребностью является обеспечение ПБ нефтегазовых объектов и ее составляющих – охрану труда (ОТ), промышленную, пожарную и экологическую безопасность. Такой подход формирует у работников осознание личной ответственности и самоконтроль при выполнении всех работ [8]. В ОАО «РЖД» определяют КБ как совокупность отношений и итогов осмысления важности и ответственности сотрудников за обеспечение всех видов безопасности [9].

Опыт работы зарубежных и российских специалистов за последнее время показал, что методами декларативного стиля управления и мерами применения только технических систем

сложно достичь высокой ПБ. Необходимо учитывать так называемый человеческий фактор. Правильное отношение и мотивация ответственности работников как к собственной безопасности, так и к безопасности других в соединении с новейшими техническими защитными средствами станут залогом существенного снижения несчастных производственных случаев (НПС) и профзаболеваний. Таким образом, КБ – ключевой метод профилактики НПС и профзаболеваний [8, 10]. Это достигается путем формирования КБ – важной составляющей эффективности системы менеджмента здоровья и безопасности на производстве. Основной задачей при этом является изменение сознания работников и создание атмосферы полного неприятия нарушений в области ОТ, промышленной, пожарной и экологической безопасности. Демонстрация приверженности руководства культуре безопасности – один из ключевых аспектов поддержания ПБ на высоком уровне, а взаимоотношения работников и руководства, их действия и решения служат основой для формирования корпоративной культуры безопасности. В роли механизмов систем управления выступают политика компании в области ПБ, приоритеты, процессы и процедуры по созданию и поддержанию ПБ на соответствующем уровне [8].

В научной литературе представлены различные соотношения понятий организационная и корпоративная культуры. Одни считают эти понятия равнозначными, другие пересекающимися, третьи – находящимися в отношении подчинения, четвертые – идентичными [11]. ОК складывается стихийно под влиянием внешней среды, куда относится и национальная культура. Она

основывается на базе представлений персонала и несущественно влияет на их поведение и ценности. Корпоративная культура аргументируется внутренними целями предприятия, которые задает руководство, образовывается на философской основе конкретных людей, передает требования администрации, подкрепляясь внутренними поощрениями. Система управляющих принципов положена в ее содержание. Корпоративная культура формализуется в кодексе корпоративной этики и миссии компании, существенно влияя на организационное поведение и ценности сотрудников [12].

Так как оценка уровня зрелости КБ имеет огромное значение для развития как корпоративной культуры, так и самой компании [1], то целью работы является анализ принципов создания и функционирования КБ, а также методов проверки и самооценки состояния КБ движения на объектах ОАО «РЖД».

### Структура культуры безопасности движения ОАО «РЖД»

Одной из стратегических целей компании ОАО «РЖД» является «повышение качества работы и безопасности перевозок» [13]. В связи с тем, что основные виды деятельности ОАО «РЖД» связаны с осуществлением перевозочных процессов грузов и пассажиров, ведущую роль в КБ, которая является элементом организационной культуры, играет КБ движения.

В соответствии с [14], КБ – осознание важности, ответственности и способность работников железнодорожного транспорта обеспечивать безопасность как одну из главных ценностей для компании и каждого работника. КБ движения – составная часть корпоративной



Рис. 1. Модель кооперативной культуры ОАО «РЖД»  
Fig. 1. Model of the cooperative culture of JSC «Russian Railways»

КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ	
Учет требований законодательных актов, стандартов, иных нормативных документов	
Менеджмент риска и управление мер по управлению риском	
Меры по обеспечению обмена информацией	
Процедуры расследования, учета и принятия мер по предупреждению транспортных происшествий	
Проведение внутренних и внешних аудитов системы менеджмента безопасности движения (дополняющих проведение ревизорских проверок и технических ревизий)	
Обеспечение ликвидации последствий событий, информирование о них и о действиях в нестандартных ситуациях	
Выполнение требований регистрации и документирования информации	
Поддержание компетентности персонала и его готовности к выполнению задач	
Качественные и количественные цели, планы и процедуры их достижения	
Формирование политики в области безопасности движения	

Рис. 2. Структура культуры безопасности движения

Fig. 2. Structure of traffic safety culture

культуры компании (рис. 1), характеризующая качество элементов самой системы менеджмента безопасности движения (МБД).

В целом такой современный подход к КБ согласован с общим подходом, принятым на железных дорогах Евросоюза. Структура КБ движения представлена на рис. 2/

### Подходы к оценке культуры безопасности движения

В ОАО «РЖД» используется подход, основанный на выявлении различий между тремя взаимосвязанными видами проявлений (асpekтами) КБ (рис. 3) [14, 15].

Аспект восприятия КБ характеризует осознание необходимости соблюдения требований безопасности работниками. Поведенческие аспекты отражают конкретные поступки, поведение и деятельность персонала по отношению к соблюдению ТБ. Аспект состоятельности КБ характеризует набор механизмов, средств, технологий, процедур, которые имеются в организации для обеспечения ПБ.

КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ		
Аспекты восприятия	Поведенческие аспекты	Аспекты состоятельности
КАК ЧЕЛОВЕК ОЩУЩАЕТ	ЧТО ЛЮДИ ДЕЛАЮТ	ЧТО ОРГАНИЗАЦИЯ ИМЕЕТ
Индивидуальные и групповые ценности, отношения и восприятие	Действия и поведение, относящиеся к безопасности движения	Политика, процедуры, регламенты, организационные структуры и системы менеджмента

Рис. 3. Трёхаспектный подход к культуре безопасности

Fig. 3. A three aspect approach to a safety culture

Поэтому можно оценивать в реальном времени КБ дифференцированно по трем аспектам:

- восприятие каждым отдельным работником требований безопасности;
- результаты действий работников на их рабочих местах;
- реальные итоговые достижения компании, отдельной организации.

Рассмотрим иной подход, который известен в практике оценки КБ за рубежом. Он ориентирован на внедрение позитивной КБ на основе семи ключевых принципов, которые схематично приведены на рис. 4 [16].

Ключевые принципы в основе создания культуры безопасности
1. Идентификация и устранение опасностей
2. Взаимная поддержка безопасного поведения
3. Устранение попыток поиска «козла отпущения»
4. Справедливость мер воздействия
5. Построение доверительных отношений
6. Встраивание безопасности в повседневные процессы
7. Учет успехов в области безопасности

Рис. 4. Принципы создания культуры безопасности

Fig. 4. Principles of creating a safety culture

Каждый из принципов гласит:

1. Весь персонал компании неустанно проводит выявление и устранение опасностей. Максимально быстро устраняя опасности и соблюдая полный обмен информацией о них, компания способствует развитию деятельности сотрудников. В результате даже рядовые сотрудники, видя, что руководство внимательно относится к устранению рисков, начинают сами проявлять инициативу по их минимизации.

2. Работники каждого уровня управления с одинаковой доброжелательностью сдерживают друг друга, когда видят рискованное поведение, и доверяют друг другу, когда видят безопасное поведение. Для привития безопасных привычек важна конструктивная обратная

связь. Активное привлечение работников к формированию КБ делает ее более устойчивой.

3. В ситуациях опасности или происшествиях никто не виноват. Вместо этого ищут системные причины. Когда люди участвуют в рискованном поведении, которое приводит к инцидентам, часто существуют организационные механизмы и методы, которые непреднамеренно способствуют такому рискованному поведению. Важно выявить это и установить контроль над изменениями организационных механизмов и процедур для обеспечения безопасного поведения.

4. Страх дисциплинарного наказания способствует заинтересованности в подгонке отчетности и сокрытию информации, поэтому это следует изъять из трудовых отношений. Если дисциплинарная ответственность несоизмеримо завышена, то это может помешать развитию КБ, приводит к падению морали, снижению доверия и производительности, командной работы и отсутствию приверженности. Точно так же это сбивает работника с толку, препятствует пониманию реальной ситуации, затрудняет регистрацию инцидентов, что ослабляет способность организации к изучению ошибок и предвидению проявления неблагоприятных факторов.

5. Если сотрудники стремятся к хорошим взаимоотношениям на каждом уровне управления, то возникающее в результате доверие является важным и эффективным фактором для развития КБ. Ошибки и промахи, несмотря на их досаду, дают бесценный опыт. Сотрудники, у которых хорошие рабочие отношения с руководством, более открыты и честны в отношении того, что приемлемо, а что нет, и что еще необходимо изменить. Они также более чувствительны к другим аспектам безопасности.

6. Безопасность является частью качества выполненной работы. Это не должно обсуждаться только на еженедельных совещаниях по технике безопасности или только при перемене. Безопасность должна учитываться всегда, при всяком решении, быть частью каждого интервью, инструктажа и собеседования.

7. Удовлетворенность состоянием безопасности должна появляться в повседневной деятельности от реальных достижений, а не ориентироваться исключительно на отчетные материалы компании. Успехи в правильных и безопасных действиях персонала в процессе произ-

водства должны получать официальное одобрение и вознаграждение.

Перечисленные принципы являются ключевыми и важными, в совокупности дающими развернутое представление о КБ.

### Признаки культуры безопасности движения

Ряд признаков КБ движения в ОАО «РЖД», по которым ее можно оценивать, показан на рис. 5.

ПРИЗНАКИ КУЛЬТУРЫ БЕЗОПАСНОСТИ	
Управляемость	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ведущая роль менеджмента организации и демонстрации приверженности безопасности</li> <li>Баланс приоритетов (пропускная способность, производительность или безопасность)</li> </ul>
Двухсторонний обмен информацией	<ul style="list-style-type: none"> <li>Понимание и содействие свободному и открытому обмену информацией</li> <li>Учет в отношении случаев нарушения безопасности</li> <li>Обсуждение и осознание требований безопасности</li> </ul>
Вовлеченность персонала	<ul style="list-style-type: none"> <li>Привлечение работников к принятию решений в области обеспечения безопасности</li> <li>Осознание индивидуальной доли ответственности работников за состояние безопасности</li> </ul>
Культура изучения проблемы	<ul style="list-style-type: none"> <li>Мониторинг всех проблем в области безопасности и извлечение уроков из ранее имевших место нарушений безопасности</li> <li>Полнота и качество выявления и оценки причин событий и принятия своевременных и адекватных мер</li> </ul>
Отношение к возложению вины	<ul style="list-style-type: none"> <li>Контроль за действиями персонала и осведомленность об этих действиях</li> <li>Деление ответственности за нарушение безопасности</li> <li>Презумпция невиновности до решения компетентных органов</li> </ul>

Рис. 5. Признаки культуры безопасности движения

Fig. 5. Signs of a traffic safety culture

Оказывая воздействие на указанные далее признаки, можно положительно влиять на ПБ:

1. Обеспечение в деятельности холдинга управляемости всех процессов, которые связаны с безопасностью движения (БД), с ведущей ролью менеджмента в обеспечении ресурсами этих процессов.

2. Достижение двухстороннего обмена информацией (по вертикали сверху вниз и снизу вверх, а также по горизонтали с сотрудниками смежных видов деятельности и смежных

организаций) с выделением нужного числа каналов для передачи информации.

3. Вовлечение в решение проблем БД персонала с поддержкой его стремления к обсуждению проблем БД, планированию мер по улучшению БД, оценке результативности этих мер (признак будем именовать «вовлеченность персонала»).

4. Непрерывный мониторинг проблем БД (отслеживание предложенных решений и выявление новых), формирование выводов во всех случаях нарушения БД.

5. Признание существования системных причин нарушений БД. Понимание того факта, что ошибки персонала являются симптомами наличия проблем в самой системе управления и в порядке возложения вины.

Чтобы обеспечить наличие признаков КБ движения в подразделениях ОАО «РЖД» руководству необходимо добиваться:

- осознания, уверенности персонала в том, что процессы, которые связаны с БД, управляются менеджерами, известными данному персоналу («наблюдаемость» менеджмента);
- приоритетности действий работников в пользу обеспечения БД, а затем уж обеспечения провозной способности или производительности;
- демонстрации руководителями всех уровней своим поведением и распоряжениями приверженности к интересам БД;
- организации системы внутренних докладов исполнительского персонала о состоянии БД;
- доступности системы МБД всем уровням;
- активного отклика менеджеров на озбоченность работников вопросами БД;
- развития систем обмена информацией и доступной связи по вопросам БД;
- обеспечения полноты информации о БД;
- организации обратной связи в системах взаимодействия персонала, связанного с БД;
- создания системы мониторинга КБ (климата) в подразделениях;
- периодического исследования отношения персонала к состоянию БД и проведения мероприятий по снижению последствий потенциальных неблагоприятных событий;
- регистрации проявленного беспокойства персонала о состоянии БД в базе данных, журналах установленной формы и т.д.;

– усовершенствования систем служебного расследования, разбора событий, которые связаны с нарушением правил БД [17].

### Методы проверки и самооценки состояния культуры безопасности

Главным методом организации проверок состояния КБ движения является анкетирование работников холдинга «РЖД», которое позволяет выявить их отношение к поведению и поступкам (других работников и своим) в области соблюдения требований БД [18].

Приведем характеристику других методов проведения проверок, которые дополняют метод анкетирования (рис. 6).

Методы самооценки			
Интервьюирование	Метод фокус-группы	Анкетирование	Обработка имеющихся данных

Рис. 6. Методы самооценки культуры безопасности  
Fig. 6. Methods for self-assessment of traffic safety culture

Метод интервьюирования используется для выявления отношения индивидуума к КБ движения. Метод фокус-группы (фокусированное интервью) представляет собой групповую дискуссию, в ходе которой определяется групповое отношение дискутируемых к какому-либо признаку или элементу признака КБ движения. Метод обработки данных систем внутренней регистрации и учета информации по БД, включающей также информацию о функционировании технических средств и деятельности персонала [19].

Уровень зрелости КБ формируется в зависимости от ее признаков (рис. 7).



Рис. 7. Формирование уровней зрелости культуры безопасности в зависимости от ее признаков  
Fig. 7. Formation of maturity levels of the safety culture depending on its features

Метод выбирается в зависимости от цели проверки или самооценки. При реализации, например, метода анкетирования, появляется проблема группировки вопросов по целям:

- определения уровня проявления определенного из признаков КБ движения;
- установления степени качества элементов системы МБД в подразделении.

В компании «РЖД» выделяют пять уровней зрелости КБ:

1. Начальный, когда деятельность выполняется хаотично, без подходов, от случая к случаю. Руководство не организовано.

2. Повторяемый, если для решения одинаковых задач различные люди используют похожие методы. В компании отсутствует распределение ответственности.

3. Определенный, когда процедуры все стандартизированы и документально оформлены, но отклонения от процедур отслеживаются не всегда. Процедуры формализуют имеющуюся практику.

4. Управляемый и измеримый, когда руководство измеряет и контролирует процесс, а если процесс становится неэффективным, то принимает меры.

5. Оптимизируемый, когда в результате постоянных улучшений процесс становится развитым до уровня позитивной практики. Наблюдается полное соответствие всем поставленным целям.

### Оценка культуры безопасности в ОАО «РЖД»

В работе [20] была выполнена оценка КБ в ЭЧ-5 (Иркутская дистанция электроснабжения). Оценка проводилась методом анкетирования согласно требованиям распоряжения № 2957 [21].

В анкетировании участвовали: 20 руководителей среднего звена (группа 1 – линейный персонал, участвующий непосредственно в проводимых на участках работах); 3 руководителя дистанции (группа 2 – руководители). Анкетирование проводилось с целью выявления признаков КБ движения и элементов системы МБД, характеризующих КБ в ЭЧ-5.

Анализ средних значений баллов (СЗБ), полученных за ответы, позволил сделать вывод о существовании определенных расхождений в оценках участников. По полученным данным сделаны следующие выводы:

1. Первый признак по управляемости процессов деятельности по обеспечению БД – ведущей роли менеджмента в обеспечении ресурсами и демонстрации личного примера – располагается на предпозитивном и позитивном уровнях (СЗБ в группе 1 – 3,8, в группе 2 – 4,3).

2. Второй признак по двухстороннему обмену информации находится на позитивном уровне (СЗБ 4,3 и 4,5 соответственно).

3. Третий признак вовлечения работников в решение проблем БД – на среднем и предпозитивном уровнях (СЗБ 3,04 и 3,6 соответственно).

4. Четвертый признак о непрерывном отслеживании решений проблем БД, выявлении новых и извлечении уроков из случаев нарушений БД находится на предпозитивном уровне (СЗБ 3,8 и 4,0). Это свидетельствует о недостатках функционирования системы по предупреждению возникновения рисков нарушения движения железнодорожного транспорта.

5. Пятый признак о признании существования системных причин нарушений БД находится на предпозитивном уровне (СЗБ 3,6 и 4,1). Это может говорить о недостатках построения причинно-следственных связей, об отсутствии анализа нарушений БД, неуверенности работников в установлении действительных причин допущенного нарушения и правильного определения виновных лиц [20].

Только по первому и второму признакам уровень КБ позитивный, по остальным трем признакам – в основном предпозитивный. Наибольшие расхождения СЗБ отмечается в вопросах 1, 3 и 5. Поэтому можно заключить, что линейный персонал и руководители следует неодинаковым принципам в своей работе, а это не способствует гармоничному развитию ЭЧ-5.

Оценку зрелости КБ движения выполняют по методике [21], использующей самооценку в качестве важного инструмента анализа уровня зрелости КБ.

В 2020 г. были проведены онлайн-опросы по тематикам «Развитие КБ в ОАО «РЖД». Эффективность принимаемых решений в области поддержания и развития КБ» и «КБ в холдинге «РЖД»». Результаты опросов, представленные в отчете [22], приведены в табл. Рассчитан темп роста (ТР) процессов по формуле:

$$ТР = П_Т / П_б \cdot 100 \%$$

Балльная оценка зрелости культуры безопасности движения  
Scoring the maturity of traffic safety culture

Элементы зрелости культуры безопасности Elements of safety culture maturity	2019	2020	ТР, %
Менеджмент достижения устойчивого успеха Management of gaining a sustained success	3,70	3,86	104,32
Стратегия и политика Strategy and policy	3,67	3,82	104,09
Менеджмент ресурсов Resource management	3,65	3,75	102,74
Менеджмент процессов Management of processes	3,63	3,75	103,31
Мониторинг, измерение, анализ и изучение Monitoring, measurement, analyses and study	3,70	3,83	103,51
Улучшения, инновации и обучение Improvement, innovations and teaching	3,60	3,78	105,0
Средний балл Grade point average	3,66	3,80	103,83

ТР характеризует интенсивность изменения какого-либо текущего показателя (процесса)  $P_t$  по отношению к его начальному значению  $P_0$ .

Как видно из таблицы, претворение в жизнь ключевых инициатив по развитию КБ движения в ОАО «РЖД» обеспечило по итогам 2020 г. среднюю оценку зрелости КБ – 3,80 балла, что соответствует уровню «определенный», при котором не всегда отклонения от процедур отслеживаются. Следует отметить повышение оценок всех процессов КБ движе-

ния в 2020 г.

### Заключение

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что следует целенаправленно развивать зрелость КБ движения, так как она имеет ключевое значение для снижения численности инцидентов, происшествий, аварий, небезопасного поведения персонала на железных дорогах и их предотвращения.

### Список литературы

1. Ефимова О.В., Комарова Ю.В. Культура безопасности как элемент организационной культуры транспортных компаний // Мир транспорта. 2019. Т. 17. № 3 (82). С. 234–245.
2. Старовойтова Ю.Б., Асламова В.С. Профилактика железнодорожного травматизма детей в Иркутской области // Инновационная наука. 2021. № 1. С. 34–36.
3. Асламова В.С., Старовойтова Ю.Б., Асламов А.А. Регрессионные зависимости показателей травматизма на железнодорожных переездах России // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 1. С. 163–166.
4. Кривов М.В., Асламова Е.А., Асламова В.С. Система выработки стратегий управления промышленной безопасностью // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 59. С. 55–65.
5. Васькова А.О., Суркова И.Ю. Культура безопасности труда персонала в транспортной сфере // Парадигма. 2019. № 3. С. 9–18.
6. Пономаренко Д.В., Лесных В.В., Панова М.А. Оценка развития культуры производственной безопасности в ПАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2017. № S4 (762). С. 78–80.
7. Общие положения обеспечения безопасности радиационных источников НП-038-16: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 28 сентября 2016 г. № 405 (ред. от 10.07.2018).
8. Проблемы формирования культуры безопасности в нефтегазовой сфере / Д.В. Пономаренко, С.Г. Ивенков, М.А. Панова и др. // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 10. С. 65–70.
9. Об утверждении Руководства по системе менеджмента безопасности движения в холдинге «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 30.09.2016. № 2045р (ред. от 28.09.2022).
10. Абильтарова Э.Н. Культура безопасности как один из методов профилактики производственного травматизма // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 13(65) С. 169–176.
11. Сметанина М.Д. К вопросу о соотношении понятий «организационная культура» и «корпоративная культура» // Гуманитарная парадигма. 2018. № 3(6). С. 63–69.
12. Корпоративная и организационная культура – в чем разница? // ManGO!Games : сайт. URL: <https://blog.mangogames.ru/korporativnaya-i-organizatsionnaya-kultura-v-chem-raznitsa> (Дата обращения 18.02.2023).

13. Об утверждении стратегии обеспечения гарантированной безопасности и надежности перевозочного процесса в холдинге «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 8.12.2015 № 2855р (ред. от 1.06.2021).

14. Об утверждении положения о культуре безопасности в холдинге «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 1.06.2020 № 1181/р.

15. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р. URL: <http://mintrans.gov.ru/documents/8/11577> (Дата обращения 09.01.2023).

16. Копысов О.А., Никишин С.Л., Рудановский В.М. О формировании культуры безопасности движения // Железнодорожный транспорт. 2012. № 12. С. 44–48.

17. Зубач С. Культура безопасности // Знанию: сайт. URL: <https://znanio.ru/media/statya-kultura-bezopasnosti-2775335> (дата обращения 21.02.2023).

18. Об утверждении методических указаний по проверке состояния культуры безопасности движения в ОАО «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 30.06.2020 № 1393/р.

19. Юденко М.Н., Васильева О.М. Методические подходы к самооценке организаций на основе подходов менеджмента качества // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 1-1 (55). С. 75–79.

20. Оценка состояния культуры безопасности на примере Иркутской дистанции электроснабжения // Бобродобро: сайт. URL: <https://tran.bobrodobro.ru/14786> (Дата обращения 18.02.2023).

21. Об утверждении методических рекомендаций по оценке зрелости культуры безопасности в холдинге «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 7.12.2018 № 2625/р.

22. Итоги деятельности холдинга «РЖД» в обеспечении безопасности движения за 2020 год // ОмГУПС: сайт. URL: <https://www.omgups.ru/innov/docs/Итоги%20деятельности%20холдинга%20РЖД%20в%20обеспечении%20безопасности%20движения%20за%202020%20год.pdf> (Дата обращения 07.03.2023).

### References

1. Efimova O.V., Komarova Yu.V. Kul'tura bezopasnosti kak element organizatsionnoi kul'tury transportnykh kompanii [Safety culture as an element of the organizational culture of transport companies]. *Mir transporta* [The world of transport], 2019, vol. 17, no. 3 (82), pp. 234–245.

2. Starovoitova Yu.B., Aslamova V.S. Profilaktika zheleznodorozhnogo travmatizma detei v Irkutskoi oblasti [Prevention of railway injuries of children in the Irkutsk region]. *Innovatsionnaya nauka* [Innovative science], 2021, no. 1, pp. 34–36.

3. Aslamova V.S., Starovoitova Yu.B., Aslamov A.A. Regressionnyye zavisimosti pokazatelei travmatizma na zheleznodorozhnykh pereezdah Rossii [Regression dependences of injury rates at railway crossings in Russia]. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technologies and techniques], 2021, no. 1, pp. 163–166.

4. Krivov M.V., Aslamova E.A., Aslamova V.S. Sistema vyrabotki strategii upravleniya promyshlennoi bezopasnost'yu [System of development of industrial safety management strategies]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of Tomsk State University. Management, Computer Engineering and Computer Science], 2022, no. 59, pp. 55–65.

5. Vas'kova A.O., Surkova I.Yu. Kul'tura bezopasnosti truda personala v transportnoi sfere [Culture of safety of personnel in the transport sector]. *Paradigma* [Paradigm], 2019, no. 3, pp. 9–18.

6. Ponomarenko D.V., Lesnykh V.V., Panova M.A. Otsenka razvitiya kul'tury proizvodstvennoi bezopasnosti v PAO «Gazprom» [Assessment of the development of industrial safety culture in PJSC «Gazprom»]. *Gazovaya promyshlennost'* [Gas industry], 2017, no. S4 (762), pp. 78–80.

7. Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti radiatsionnykh istochnikov NP-038-16: utv. prikazom Federal'noi sluzhby po eko-logicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 28 sentyabrya 2016 g. № 405 (red. ot 10.07.2018) [General provisions for ensuring the safety of radiation Sources NP-038-16: approved by the Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated September 28, 2016 No 405 (ed. July 10, 2018)].

8. Ponomarenko D.V., Ivenkov S.G., Panova M.A., Lesnykh V.V. Problemy formirovaniya kul'tury bezopasnosti v neftegazovoi sfere [Problems of forming a culture of safety in the oil and gas sector]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational safety in industry], 2016, no. 10, pp. 65–70.

9. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» от 30.09.2016. № 2045r «Ob utverzhdenii Rukovodstva po sisteme menedzhmenta bezopasnosti dvizheniya v kholdinge «RZhD» (red. ot 28.09.2022) [Order of JSC «Russian Railways» dated September 30, 2016 No 2045r «On approval of the Manual on the Traffic Safety Management System in the Russian Railways Holding» (ed. September 28, 2022)].

10. Abil'tarova E.N. Kul'tura bezopasnosti kak odin iz metodov profilaktiki proizvodstvennogo travmatizma [Safety culture as one of the methods of prevention of industrial injuries]. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'* [Construction and technogenic safety], 2018, no. 13(65), pp. 169–176.

11. Smetanina M.D. K voprosu o sootnoshenii ponyatii «organizatsionnaya kul'tura» i «korporativnaya kul'tura» [On the question of the relationship between the concepts of «organizational culture» and «corporate culture»]. *Gumanitarnaya paradigma* [Humanitarian paradigm], 2018, no. 3(6), pp. 63–69.

12. Korporativnaya i organizatsionnaya kul'tura – v chem raznitsa? (Elektronnyi resurs) [Corporate and organizational culture – what is the difference? (Electronic resource)]. Available at: <https://blog.mangogames.ru/korporativnaya-i-organizatsionnaya-kultura-v-chem-raznitsa> (Accessed February 18, 2023).

13. Rasporyazhenie ОАО «RZhD» от 8.12.2015 № 2855r «Ob utverzhdenii strategii obespecheniya garantirovannoi bezopasnosti i nadezhnosti перевозочного процесса в kholdinge «RZhD» (red. ot 1.06.2021) [Order of JSC «Russian Railways»

dated December 8, 2015 no. 2855r «On approval of the strategy for ensuring guaranteed safety and reliability of the transportation process in the Russian Railways Holding» (ed. June 1, 2021)].

14. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 1.06.2020 № 1181/r «Ob utverzhdenii polozheniya o kul'ture bezopasnosti v kholdinge «RZhD» [Order of JSC «Russian Railways» dated June 1, 2020 No 1181/r «On approval of the regulations on safety culture in the Russian Railways Holding»].

15. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27.11.2021 g. № 3363-r «Ob utverzhdenii Transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation No 3363-r dated November 27, 2021]. Available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577> (Accessed January 9, 2023).

16. Kopysov O.A., Nikishin S.L., Rudanovskii V.M. O formirovani kul'tury bezopasnosti dvizheniya [On the formation of a traffic safety culture]. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway transport], 2012, no. 12, pp. 44–48.

17. Kul'tura bezopasnosti (Elektronnyi resurs) [Traffic safety (Electronic resource)]. Available at : <https://znano.ru/media/statya-kultura-bezopasnosti-2775335> (Accessed February 21, 2023).

18. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 30.06.2020 № 1393/r «Ob utverzhdenii metodicheskikh ukazanii po proverke sostoyaniya kul'tury bezopasnosti dvizheniya v OAO «RZhD» [Order of JSC «Russian Railways» dated June 30, 2020 No 1393/r «On approval of methodological guidelines for checking the state of the traffic safety culture in JSC «Russian Railways»].

19. Yudenko M.N., Vasil'eva O.M. Metodicheskie podhody k samoocenke organizatsii na osnove podhodov menedzhmenta kachestva [Methodological approaches to self-assessment of organizations based on quality management approaches]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal* [International Research Journal], 2017, no. 1-1 (55), pp. 75–79.

20. Otsenka sostoyaniya kul'tury bezopasnosti na primere Irkutskoi distantsii elektrosnabzheniya (Elektronnyi resurs) [Assessment of the state of safety culture on the example of the Irkutsk power supply distance (Electronic resource)]. Available at: <https://tran.bobrodobro.ru/14786> (Accessed February 18, 2023).

21. Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 7.12.2018 № 2625/r «Ob utverzhdenii metodicheskikh rekomendatsii po otsenke zrelosti kul'tury bezopasnosti v kholdinge «RZhD» [Order of JSC «Russian Railways» dated December 7, 2018 No 2625/r «On approval of methodological recommendations for assessing the maturity of the safety culture in the Russian Railways Holding»].

22. Itogi deyatelnosti kholdinga «RZhD» v obespechenii bezopasnosti dvizheniya za 2020 god (Elektronnyi resurs) [The results of the activities of the Russian Railways Holding in ensuring traffic safety for 2020 (Electronic resource)]. Available at: <https://www.omgups.ru/innov/docs/Итоги%20деятельности%20холдинга%20РЖД%20в%20обеспечении%20безопасности%20движения%20за%202020%20год.pdf> (Accessed March 07, 2023).

#### Информация об авторах

**Асламова Вера Сергеевна**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры техносферной безопасности, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: [aslamovav@yandex.ru](mailto:aslamovav@yandex.ru).

**Умудова Ирада Агильевна**, кафедра техносферной безопасности, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: [umudowai@yandex.ru](mailto:umudowai@yandex.ru).

#### Information about the authors

**Vera S. Aslamova**, Doctor of Engineering Science, Full Professor, Professor of the Department of the Technosphere Safety, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [aslamovav@yandex.ru](mailto:aslamovav@yandex.ru).

**Irada A. Umudova**, Department of Technosphere Safety, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: [umudowai@yandex.ru](mailto:umudowai@yandex.ru).

## Нейросетевое моделирование и оптимизация эксплуатационных параметров теплового воздействия на битуминозный пласт

А.Р. Мухутдинов, М.Г. Ефимов✉, Ю.В. Яковлева

Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Российская Федерация

✉jero07@bk.ru

### Резюме

Известно, что извлечение запасов нефти из битуминозных песчаников с помощью открытых горных выработок из-за большой глубины залегания продуктивного пласта является нерентабельным. Поэтому особое внимание уделяется разработке способов внутрипластовой добычи нефти из битуминозных песчаников. Одним из перспективных способов является прогрев пласта в «нагнетательной» скважине до температуры самовоспламенения нефти. За счет химической реакции взаимодействия окислителя с горючим в сгораемых материалах поддерживается фронт горения и осуществляется продвижение и последующее извлечение нефти через эксплуатационную скважину. При этом воздействие на пласт может проходить при различных эксплуатационных параметрах технологии влияния смазочных материалов. На сегодняшний день один из наиболее эффективных методов изучения сложных систем – компьютерное математическое моделирование. Поэтому перспективным способом решения трудных задач является использование универсальных вычислительных возможностей современных программных средств, основывающихся на искусственных нейронных сетях, обладающих широчайшими возможностями. Они позволяют, исходя из одного только эмпирического опыта, строить нейросетевые модели, которые способствуют извлечению знаний из данных и выявлять ранее неизвестные закономерности, а также использовать их для решения конкретных практических задач. В данной работе с использованием современных компьютерных технологий разработан прикладной программный модуль, позволяющий на основе разработанного алгоритма с использованием нейросетевой модели определить оптимальные эксплуатационные параметры тепловой технологии воздействия на битуминозный пласт.

### Ключевые слова

нейросетевая модель, битуминозный пласт, сгораемый материал, программный модуль, база знаний, современные информационные технологии

### Для цитирования

Мухутдинов А.Р. Нейросетевое моделирование и оптимизация эксплуатационных параметров теплового воздействия на битуминозный пласт / А.Р. Мухутдинов, М.Г. Ефимов, Ю.В. Яковлева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 176–184. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).176-184.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 12.05.2023 г.; поступила после рецензирования: 06.06.2023 г.; принята к публикации: 07.06.2023 г.

## Neural network modeling and optimization of operational parameters for thermal impact on a bituminous reservoir

A.R. Mukhutdinov, M.G. Efimov✉, Yu.V. Yakovleva

Kazan National Research Technological University, Kazan, the Russian Federation

✉jero07@bk.ru

### Abstract

It is known that the extraction of oil reserves from bituminous sandstones using open-pit mine workings is unprofitable due to the large depth of the productive formation. Therefore, special attention is paid to the development of methods for in-situ oil production from tar sands. One of the promising methods of in-situ production of bituminous oil is the heating of the reservoir in the «injection» well to the temperature of oil self-ignition. Due to the chemical reaction of the interaction of the oxidizer with the fuel in combustible materials, the combustion front is maintained and the advancement and subsequent extraction of oil through the production well is carried out. In this case, the stimulation of the formation can take place at various operational parameters of the lubricants influence technology. To date, one of the most effective methods for studying complex systems is computer mathematical modeling. Therefore, a promising way to solve difficult problems is to use the universal computing potentialities of modern software tools based on artificial neural networks, which have the widest capabilities. They allow, based on empirical experience alone, to build neural network models that help extract knowledge from data and identify previously unknown patterns, as well as use them to solve specific practical problems. In this work, using modern computer technologies, an application software module has been developed that allows, based on the developed algorithm using a neural network model, to determine the optimal operating parameters of the thermal technology for influencing a bituminous reservoir.

**Keywords**

neural network model, bituminous reservoir, combustible material, software module, knowledge base, modern information technologies

**For citation**

Mukhutdinov A.R., Efimov M.G., Yakovleva Yu.V. Neurosetevoe modelirovanie i optimizatsiya ekspluatatsionnykh parametrov teplovogo vozdeistviya na bituminoznyi plast [Neural network modeling and optimization of operational parameters for thermal impact on a bituminous reservoir]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 176–174. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).176-184.

**Article info**

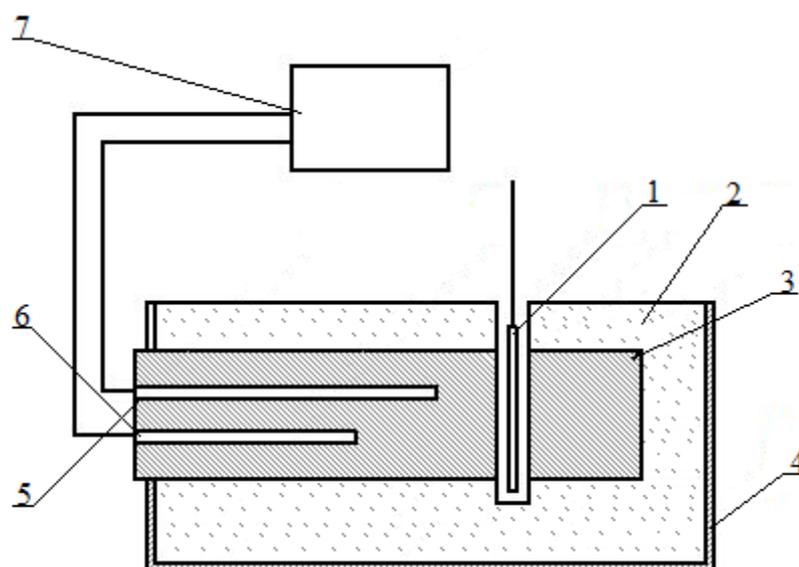
Received: May 12, 2023; Revised: June 6, 2023; Accepted: June 7, 2023.

**Введение**

В настоящий момент особое внимание уделяется разработке способов внутрипластовой добычи нефти из битуминозных песчаников [1–5]. Одним из перспективных способов внутрипластовой добычи битуминозной нефти является прогрев пласта в «нагнетательной» скважине до температуры самовоспламенения нефти [5]. За счет химической реакции взаимодействия окислителя с горючим в сгораемых материалах (СМ) поддерживается фронт горения и осуществляется продвижение и последующее извлечение нефти через эксплуатационную скважину. При этом воздействие на пласт может проходить при различных эксплуатационных параметрах, таких как масса заряда СМ, расстояние породы от заряда СМ, интервал

времени ввода зарядов СМ и т.д. [6–17]. Так, в Казанском национальном исследовательском технологическом университете на кафедре технологии твердых химических веществ много лет проводятся комплексные исследования и накоплены экспериментальные данные, которые можно применить для определения оптимальных показателей тепловой технологии, позволяющих влиять на агрегатное состояние битуминозного пласта за счет повышения эффективности его нагрева [7]. Для проведения испытаний был изготовлен специальный лабораторный стенд, схема которого представлена на рис. 1.

Стенд состоит из стального сосуда с теплоизоляцией 4, в котором располагаются исследуемые образцы монолитной битуминозной породы 3, окруженные насыпным битуминоз-



**Рис. 1.** Стенд для изучения нагрева битуминозной породы:

1 – заряд сгораемых материалов; 2 – насыпной битуминозный грунт; 3 – монолитная битуминозная порода; 4 – теплоизоляция асбестовая; 5 – первая термопара; 6 – вторая термопара; 7 – электронный потенциометр ЭПП-09

**Fig. 1.** Stand for studying the heating of bituminous rock:

1 – combustible materials charge; 2 – bulk bituminous soil; 3 – monolithic bituminous rock; 4 – asbestos thermal insulation; 5 – first thermocouple; 6 – second thermocouple; 7 – electronic potentiometer EPP-09

ным грунтом 2. В пространство между образцами монолитной породы, имитирующего скважину шириной 35 мм, последовательно вводились заряды СМ для испытаний 1. Измерения температуры нагрева битуминозной породы проводились термопарами 5, 6, установленными на различных расстояниях от сжигаемого заряда СМ. Непосредственная запись значений температур осуществлялась через определенные промежутки времени трехточечным электронным потенциометром ЭПП-09 7.

Общий вид изделия для прогрева породы в лабораторных условиях на рис. 2.

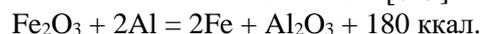
Корпус изготовлен из листового материала марки АДМ толщиной 1 мм. Крышка, закрывающая корпус, имеет гнездо под электровоспламенитель марки МБ-2Н. Крепление крышки к корпусу и электровоспламенителя в гнездо осуществляется с помощью эпоксидного клея.

Электровоспламенитель МБ-2Н приводится в действие от электрического тока напряжением, которое может находиться в пределах 12–27 В. Под действием электрического импульса происходит срабатывание электровоспламенителя МБ-2Н, в свободном объеме узла запала создается избыточное давление, обеспечивающее воспламенение воспламенительного состава.

Объектом в данной работе является энергонасыщенный материал на основе термита для инициирования внутрипластового горения.

Термит представляет собой механическую смесь алюминиевого порошка (ГОСТ 5494-95) и железных окислов (ГОСТ 4173-77), при зажигании которых происходит восстановление металла из окислов с выделением при

этом значительного количества тепла [6–9]:



В состав термита входят порошок алюминиевый – 20 %; оксид железа – 71,7 %; обсечка – 8,3 %.

Характерными особенностями, отличающими процесс горения термитов от горения других составов, являются:

– отсутствие при реакции горения газообразных продуктов реакции, что обуславливает беспламенность горения;

– высокая температура реакции горения (2 000–2 800°C);

– образование при горении огненно-жидких шлаков.

Температура самовоспламенения всех алюминиевых термитов выше 800°C, а температура самовоспламенения железоалюминиевого термита составляет 1 300°C. Порошкообразный железоалюминиевый термит имеет гравиметрическую плотность  $\rho_0 = 1,8\text{--}2 \text{ г/см}^3$ . Спрессованный (с добавкой нескольких процентов цементатора)  $\rho = 3\text{--}3,4 \text{ г/см}^3$ .

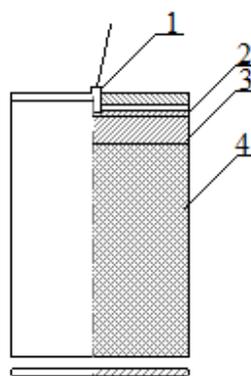
Образцы термита, обычного измельчения без запрессовки, массой 1 кг сгорают за 15–20 с; те же образцы, но спрессованные под давлением 200 кг/см<sup>2</sup> – за 35–50 с.

Технологический процесс изготовления состава в лабораторных условиях заключается в механическом смешении компонентов и состоит из двух фаз:

1. Фаза подготовки компонентов: сушка; просейка; взятие навесок.

2. Фаза смешения компонентов:

2.1. Подготовка железоалюминиевого термита: железоалюминиевый термит сушат в



**Рис. 2.** Общий вид изделия для прогрева породы:

1 – электровоспламенитель МБ-2Н; 2 – воспламенительный состав; 3 – переходной состав; 4 – основной состав

**Fig. 2.** General view of the product for heating the rock:

1 – electric igniter MB-2N; 2 – igniter composition; 3 – transition composition; 4 – main composition

сушильном шкафу при температуре 105–110°C в течение 5–6 ч, просеивают через сито любого вида с латунной сеткой № 2–2,8 ГОСТ 3826-47. Навески берут на технических весах с точностью  $\pm 0,1$  г.

2.2. Подготовка азотнокислого бария, Ва(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>: нитрат бария сушат в сушильном шкафу при температуре 80–85°C в течение 5–6 ч. Затем просеивают через сито любого вида с латунной сеткой № 25 ГОСТ 3826-47. Навески берут на технических весах с точностью  $\pm 0,1$  г.

2.3. Подготовка горючей связки: смоле ЭД-5, предварительно разогретую в термошкафу до температуры 50–60°C, отweighивают в емкость для горючей связки. Затем к эпоксидной смоле ЭД-5 добавляют отвердитель (полиэтиленполиамин) в количестве 10 % к взятой навеске и тщательно перемешивают вручную шпателем или стеклянной палочкой до получения однородной массы.

2.4. Подготовка полиэфира НПС-609 и силиконового каучука СКТН аналогична подготовке эпоксидной смолы ЭД-5.

Смешение компонентов осуществляют вручную под вытяжным шкафом. Сначала смешивают горячую связку с азотнокислым барием, а затем с термитом до получения однородной массы и полного исчезновения пыли твердых компонентов. Продолжительность смешения массы до 1 кг составляет около 5 мин., до 10 кг – 15–20 мин. Экспериментально найдено [1], что оптимальным соотношением компонентов обладает основной состав: железоалюминиевый термит – 67 %, эпоксидная смола – 5 %, азотнокислый барий – 28 %.

Одним из наиболее прогрессивных методов изучения сложных систем является компьютерное математическое моделирование. Поэтому перспективным способом решения таких задач является использование универсальных вычислительных возможностей современных программных средств, основывающихся на искусственных нейронных сетях (ИНС), обладающих широчайшими возможностями моделирования таких систем. Они позволяют, исходя из одного только эмпирического опыта, строить нейросетевые модели, которые способствуют извлечению знаний из данных и позволяют выявлять ранее неизвестные и никогда не исследованные зависимости и закономерности, активно использовать их для решения конкретных практических задач. Поэтому изучение

возможности использования компьютерного моделирования процесса горения разработанного сгораемого материала на основе современных информационных технологий для извлечения новых знаний является актуальной задачей, имеющей практический интерес.

В данной работе рассматривается возможность перспективного использования универсальных вычислительных возможностей программных средств на основе нейросетей для аппроксимирования функций, полученных по экспериментальным данным. В работе использовалась программа NeuroShell.

NeuroShell – это универсальный пакет, предназначенный для нейросетевого анализа данных. С его помощью можно решать широкий спектр задач, начиная с самых распространенных.

Основными преимуществами NeuroShell при создании исполняемых модулей по сравнению с аналогичными средами разработок являются:

- простота в обращении за счет жесткой последовательности действий по созданию и обучению ИНС;
- простота формирования обучающей выборки;
- возможность отображать и контролировать многие параметры;
- создавать собственные архитектуры ИНС;
- выявлять наиболее значимые входные параметры;
- быстрота разработки программного модуля;
- высокая производительность разработанного программного модуля;
- наращиваемость за счет встраивания новых компонентов и инструментов в среду NeuroShell;
- удачная проработка иерархии объектов;
- низкие требования разработанного программного модуля к ресурсам компьютера.

Применение данного программного продукта возможно в тех областях, где нейронные сети традиционно и с успехом применяются, а именно, в медицине, экологии / климатологии / метеорологии, при построении моделей технических объектов и их идентификации, в экономике (прогнозирование курсов валют, акций и т.д.) и вообще для решения любой задачи классификации или прогноза. Кроме того, он позво-

ляет решать задачи при наличии выборки данных с требуемой точностью, которую не позволяли ранее достичь традиционные математические методы (регрессионный анализ, непараметрическая статистика и др.). Поскольку на основе одной таблицы данных может быть получено несколько полуэмпирических теорий (несколько нейронных сетей минимальной структуры, правильно решающих одну и ту же задачу), то возможно решение некоторых задач когнитологии и планирования оптимизируемого эксперимента.

Именно нейросетевая обработка данных в настоящее время и сформировала новую волну в развитии искусственного интеллекта. Работы по вербализации структуры нейронных сетей приближают нейросетевое направление искусственного интеллекта к классическим экспертным системам, делая возможным понимание и объяснение процесса принятия решения нейронной сетью.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Нахождение оптимальных эксплуатационных параметров тепловой технологии воздействия на битуминозный пласт осуществлялось с помощью ИНС, созданной универсальным вычислительным экспресс-методом [18] по базе знаний (табл.) из экспериментальных данных комплексных исследований с учетом управления входными характеристиками, позволяющими при горении влиять на агрегатное состояние битуминозного пласта [6–17]. База знаний создавалась в среде MS Excel, где вход-

ными характеристиками являлись: время нагрева  $x_1$ ; количество зарядов  $x_2$ ; общее время горения  $x_3$ , мин.; интервал ввода зарядов  $x_4$ ; расстояние от источника нагрева  $x_5$ . Выходным параметром является температура нагрева битуминозного пласта  $y$ . Этот параметр зависит от входных данных  $x_1$ – $x_5$ .

С помощью отработанного экспресс-метода выбрана архитектура ИНС (рис. 3): нейронная сеть с общей регрессией, общее число блоков – три, в соответствии с количеством входных и выходных данных, количество нейронов в первом слое – пять, в последнем – один.

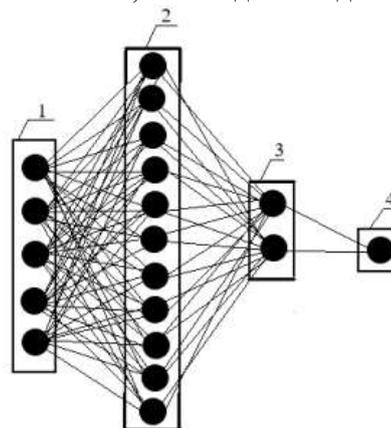


Рис. 3. Схема искусственной нейронной сети, включающая блоки:

1 – входной; 2 – слой шаблонов;  
3 – слой суммирования; 4 – выходной

Fig. 3. Scheme of an artificial neural network, including blocks:

1 – input; 2 – template layer; 3 – summation layer;  
4 – output

База знаний

№ опыта Number of experiment	Время нагрева, мин. Heating time, min.	Количество зарядов, шт. Number of charges, PCS	Общее вре- мя горения, мин. Total burning time, min.	Интервал ввода заря- дов, мин. Input interval, min.	Расстояние от источни- ка нагрева, мм Distance from the heating source, mm	Температура нагрева битуминозного пласта, °С Bituminous formation heating temperature, °С
	Входные характеристики Input characteristics					Выходные параметры Output parameters
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	
1	31,5	6	6,8	1	20	170
2	62,58	6	6,8	1	55	82
3	88,2	6	6,8	1	20	76
4	5,04	5	5,2	1	20	260
...	...	...	...	...	...	...
11	122,4	4	13,2	4	100	72

Далее база знаний импортировалась в программную среду разработки NeuroShell, происходило обучение и тестирование нейронной сети. После тестирования оптимизированная сеть показала относительную ошибку – 5,56 %. Разработанная нейросетевая модель учитывает влияние всех входных параметров. Достоинством данной среды разработки является возможность вычисления показателей значимости входных параметров. Наибольшее влияние на температуру нагрева битуминозного

пласта оказывает расстояние породы от источника нагрева.

С использованием современных информационных технологий в среде разработки на основе полученного алгоритма (рис. 4) и нейросетевой модели создан прикладной программный модуль, позволяющий определить оптимальные эксплуатационные параметры тепловой технологии воздействия на битуминозный пласт.

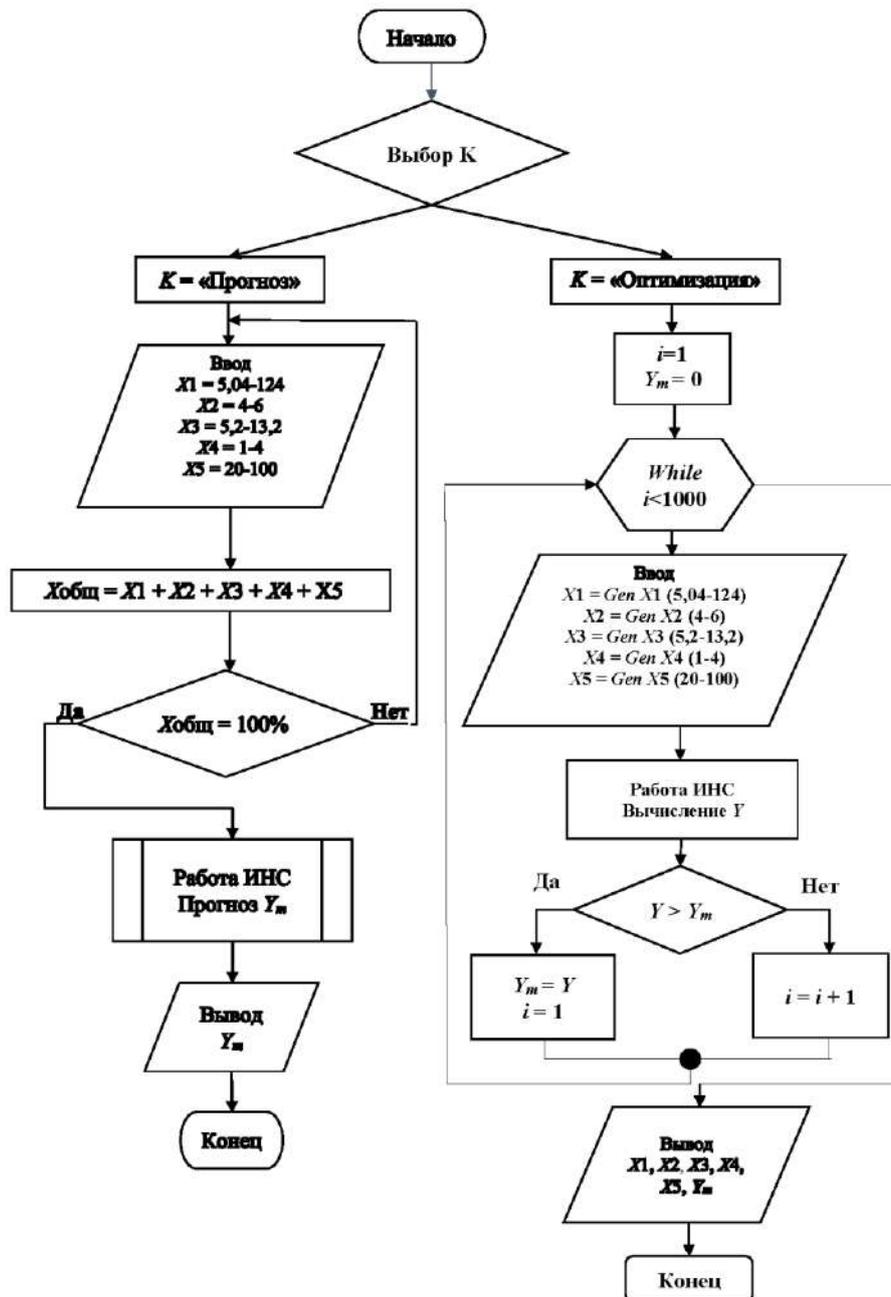


Рис. 4. Блок-схема алгоритма программы  
Fig. 4. Block diagram of the program algorithm

Параметр	Значение	Единица
Время нагрева (5,04...124)	5,39	Мин
Количество зарядов (4-6)	4,03	Шт
Общее время горения (5,2...13,2)	6,26	Мин
Интервалы ввода (1...4)	2,32	Мин
Расстояние от источника (20...100)	20,07	мм

Y 259,957 °C

Кнопки: Прогноз, Оптимизация

Рис. 5. Окно определения оптимальных значений

Fig. 5. Window for determining optimal values

Интерфейс программы (см. рис. 4) представляет собой главное окно, в котором находятся поля для ввода входных параметров (пять полей) и поле для вывода результата – значения выходного параметра. Нажатие кнопки «Оптимизация» позволяет определить оптимальные значения входных данных, проходит по следующему алгоритму:

1. В начале каждого цикла программа проводит генерацию значений входных параметров.

2. Выбранные значения обрабатываются нейронной сетью, прогнозируется величина температуры нагрева битуминозного пласта, которая сравнивается с максимальным значением температуры нагрева битуминозного пласта (на первом цикле оно равно нулю).

3. Цикл продолжается пока программа автоматически не переберет все возможные варианты соотношения компонентов в заданном диапазоне.

Результатом стало максимальное значение температуры нагрева битуминозного пласта – 259,96 °C, которое обеспечивается следующими эксплуатационными характеристиками:

время нагрева – 5,39 мин.; количество зарядов – 4 шт.; общее время горения – 6,26 мин.; интервал ввода зарядов – 2,32 мин.; расстояние от источника нагрева – 20 мм.

Относительная ошибка прогноза модуля составила 5,56 %, т.е. не превышает ошибок нейросетевых моделей, что свидетельствует об исправности работы программного модуля.

На основе анализа структурированной информации разработана база знаний, создана и продемонстрирована ИНС, способная определить оптимальные входные характеристики тепловой технологии для максимального нагрева битуминозного пласта.

### Заключение

Разработана база знаний для создания ИНС с целью нахождения оптимальных эксплуатационных параметров теплового воздействия на битуминозный пласт.

Разработан прикладной программный модуль на основе ИНС, способный найти оптимальные эксплуатационные параметры, обеспечивающие максимальную температуру нагрева битуминозного пласта.

### Список литературы

1. Каюкова Г.П., Петров С.М., Успенский Б.В. Свойства тяжелых нефтей и битумов пермских отложений Татарстана в природных и техногенных процессах. М. : ГЕОС, 2015. 341 с.
2. Щепалов А.А. Тяжелые нефти, газовые гидраты и другие перспективные источники углеводородного сырья. Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2012. 93 с.

3. Высоковязкая нефть – новые технологии разработки // Neftegaz.RU : сайт. URL: <https://neftgaz.ru/science/booty/331724-vysokovyazkaya-neft-novye-tehnologii-razrabotki-chast-2/> (Дата обращения 2.05.2023).
4. Николин И.В. Методы разработки тяжелых нефтей и природных битумов // Наука – фундамент решения технологических проблем развития России : сб. ст. II Всерос. семинара. Казань, 2007. С. 54–68.
5. Коноплев Ю.П., Гуляев В.Э. Внедрение методов термощахтной разработки на Ярегском месторождении высоковязкой нефти // Нефтяное хозяйство. 2011. № 2. С. 89–91.
6. Оптимизация процесса «холодной» добычи тяжелой нефти вместе с песком / P.M. Collins, M.B. Dusseault, D. Dorscher et al. // Нефтегазовые технологии. 2009. № 1. С. 36–45.
7. Поисковые исследования по созданию изделий для прогрева битуминозного пласта : отчет о НИР / В.М. Бочков, И.Ф. Садыков, Г.И. Шешуков и др. Казань : КХТИ им. С.М. Кирова, 1970. С. 6–24.
8. Дияшев Р.Н. Новые возможности щелочного заводнения и внутрипластового горения для разработки залежей вязких, высоковязких и тяжелых нефтей (по данным зарубежных публикаций) // Нефтяное хозяйство. 2009. № 9. С. 102–106.
9. Шейман А.Б., Малофеев Г.Е., Сергеев А.И. Воздействие на пласт теплом при добыче нефти. М. : Недра, 1969. 256 с.
10. Симкин Э.М., Сергеев А.И., Шейман А.Б. Экспериментальные исследования рабочих процессов глубинного электродного нагревания // Нефтяное хозяйство. 1967. № 6. URL: [https://oil-industry.net/Journal/archive\\_detail.php?ID=5407&art=103049](https://oil-industry.net/Journal/archive_detail.php?ID=5407&art=103049). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.
11. Кудинов В.И. Новые технологии повышения нефтеотдачи на месторождениях с высоковязкими нефтями // Нефтяное хозяйство. 2002. №5. С. 92–95.
12. In situ stress field in the Athabasca oil sands deposits: Field measurement, stress-field modeling, and engineering implications / J.G. Liu, B. Xu, L. Sun et al. // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. Vol. 215. Part B. DOI 10.1016/j.petrol.2022.110671.
13. Разработка изделий для прогрева битуминозного пласта : отчет о НИР / рук. В.М. Бочков, И.Ф. Садыков ; отв. исп.: Г.И. Шешуков, Г.П. Фролов ; исп. И.М. Сабитов, И.А. Гайнутдинов. Казань : Казанский химико-технологический институт 1972. 8–10 с.
14. Бочков В.М., Садыков И.Ф. Разработка термических и динамических способов извлечения битуминозной нефти : отчет о НИР. Казань : КХТИ им. С.М. Кирова, 1974.
15. Разработка термических и взрывных способов извлечения битуминозной нефти : отчет о НИР. / Рук. В.М. Бочков, И.Ф. Садыков ; отв. исп. Г.И. Шешуков, Г.П. Фролов ; исп. И.М. Сабитов, И.А. Гайнутдинов. Казань : Казанский химико-технологический институт, 1975. 5 с.
16. Бочков В.М., Садыков И.Ф., Создание и усовершенствование химических прогревателей и веществ для поджога пласта : отчет о НИР. Казань : КХТИ им. С.М. Кирова, 1976.
17. Мухутдинов А.Р., Ефимов М.Г., Вахидова З.Р. Нейросетевое моделирование процесса нагрева битуминозного пласта и исследование влияния различных факторов // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2022. № 9 (590). С. 13–17.
18. Мухутдинов А.Р., Ефимов М.Г. Универсальные вычислительные экспресс-методы для создания искусственной нейронной сети сложного объекта и инновационного программного модуля на ее основе. Казань : КНИТУ, 2022. 161 с.

### References

1. Kayukova G.P., Petrov S.M., Uspenskii B.V. Svoistva tyazhelykh neftei i bitumov permskikh otlozhenii Tatarstana v prirodnykh i tekhnogennykh protsessakh [Properties of heavy oils and bitumen of Permian deposits of Tatarstan in natural and man-made processes]. Moscow : GEOS Publ., 2015. 341 p.
2. Shchepalov A.A. Tyazhelye nefti, gazovye gidraty i drugie perspektivnye istochniki uglevodorodnogo syr'ya [Heavy oils, gas hydrates and other promising sources of hydrocarbon raw materials]. Nizhnii Novgorod : NNGU Publ., 2012. 93 p.
3. Vysokovyazkaya nefť – novye tekhnologii razrabotki (elektronnyi resurs) [High-viscosity oil – new development technologies (electronic resource)]. Available at: <https://neftgaz.ru/science/booty/331724-vysokovyazkaya-neft-novye-tehnologii-razrabotki-chast-2/> (Accessed May 2, 2023).
4. Nikolin I.V. Metody razrabotki tyazhelykh neftei i prirodnykh bitumov [Methods of development of heavy oils and natural bitumen]. *Sbornik statei II Vserossiiskogo seminara «Nauka – fundament resheniya tekhnologicheskikh problem razvitiya Rossii»* [Proceedings of the II All-Russian seminar «Science – the foundation for solving technological problems of development of Russia»]. Kazan', 2007, pp. 54–68.
5. Konoplev Yu.P., Gulyaev V.E. Vnedrenie metodov termoshakhtnoi razrabotki na Yaregskom mestorozhdenii vysokovyazkoi nefti [Introduction of methods of thermoshack development at the Yareg deposit of high-viscosity oil]. *Neftyanoe khozyaistvo* [Oil industry], 2011, no. 2, pp. 89–91.
6. Collins P.M., Dusseault M.B., Dorscher D., Kueber E. Optimizatsiya protsessy «kholodnoi» dobychi tyazheloi nefti vmeste s peskom [Optimization of the process of «cold» production of heavy oil together with sand]. *Neftegazovye tekhnologii* [Oil and gas technologies], 2009, no. 1, pp. 36–45.
7. Bochkov V.M., Sadykov I.F. Poiskovye issledovaniya po sozdaniyu izdelii dlya progreva bituminoznogo plasta (Otchet o NIR) [Exploratory research on the creation of products for heating bituminous formation (Research report)]. Kazan': Kazan Institute of Chemical Technology named after S.M. Kirov, 1970, pp. 6–24.
8. Diyashev R.N. Noveye vozmozhnosti shchelochnogo zavodneniya i vnutriplastovogo goreniya dlya razrabotki zalezhei vyazkikh, vysoko-vyazkikh i tyazhelykh neftei (po dannym zarubezhnykh publikatsii) [New possibilities of alkaline flooding and

intra-formation burning for the development of deposits of viscous, highly viscous and heavy oils (according to foreign publications)]. *Neftyanoe khozyaistvo* [Oil industry], 2009, no. 9, pp. 102–106.

9. Sheiman A.B., Malofeev G.E., Sergeev A.I. Vozdeistvie na plast teplom pri dobyche nefi [The effect of heat on the reservoir during oil production]. Moscow: Nedra Publ., 1969. 256 p.

10. Simkin E.M., Sergeev A.I., Sheiman A.B. Eksperimental'nye issledovaniya rabochikh protsessov glubinnogo elektrod-nogo nagrevaniya [Experimental studies of working processes of deep electrode heating]. *Neftyanoe khozyaistvo* [Oil industry], 1967, no. 6.

11. Kudinov V.I. Novye tekhnologii povysheniya nefteotdachi na mestorozhdeniyakh s vysokovyazkimi neftyami [New technologies of enhanced oil recovery at fields with high-viscosity oils]. *Neftyanoe khozyaistvo* [Oil industry], 2002, no. 5, pp. 92–95.

12. Liu J.G., Xu B., Sun L., Li B., Wei G.J. In situ stress field in the Athabasca oil sands deposits: Field measurement, stress-field modeling, and engineering implications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 215, part B. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110671.

13. Bochkov V.M., Sadykov I.F. Razrabotka izdelii dlya progrevva bituminoznogo plasta (Otchet o NIR) [Development of products for heating the bituminous formation (Research report)]. Kazan': Kazan Institute of Chemical Technology named after S.M. Kirov, 1972, pp. 8–10.

14. Bochkov V.M., Sadykov I.F. Razrabotka termicheskikh i dinamicheskikh sposobov izvlecheniya bituminoznoi nefi (Otchet o NIR) [Development of thermal and dynamic methods of extraction of bituminous oil (Research report)]. Kazan': Kazan Institute of Chemical Technology named after S.M. Kirov, 1974.

15. Bochkov V.M., Sadykov I.F. Razrabotka termicheskikh i vzryvnykh sposobov izvlecheniya bituminoznoi nefi (Otchet o NIR) [Development of thermal and explosive methods of extraction of bituminous oil (Research report)]. Kazan': Kazan Institute of Chemical Technology named after S.M. Kirov, 1975, pp. 3–5.

16. Bochkov V.M., Sadykov I.F. Sozdanie i usovershenstvovanie khimicheskikh progrevatelei i veshchestv dlya podzhoga plasta (Otchet o NIR) [Creation and improvement of chemical heaters and substances for igniting the formation (Research report)]. Kazan': Kazan Institute of Chemical Technology named after S.M. Kirov, 1976.

17. Mukhutdinov A.R., Efimov M.G., Vakhidova Z.R. Neirosetevoe modelirovanie protsessa nagreva bituminoznogo plasta i issledovanie vliyaniya razlichnykh faktorov [Neural network modeling of the bituminous formation heating process and investigation of the influence of various factors]. *Avtomatizatsiya i informatizatsiya TEK* [Automation and informatization of the Fuel and energy complex], 2022, no. 9 (590), pp. 13–17.

18. Mukhutdinov A.R., Efimov M.G. Universal'nye vychislitel'nye ekspress-metody dlya sozdaniya iskusstvennoi neuronnoi seti slozhnogo ob'ekta i innovatsionnogo programmnoogo modulya na ee osnove [Universal computational express methods for creating an artificial neural network of a complex object and an innovative software module based on it]. Kazan': KNITU Publ., 2022. 161 p.

#### Информация об авторах

**Мухутдинов Аглям Рашидович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии твердых химических веществ, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань; e-mail: muhutdinov@rambler.ru.

**Ефимов Максим Геннадьевич**, ассистент кафедры технологии твердых химических веществ, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань; e-mail: jero07@bk.ru.

**Яковлева Юлия Владимировна**, кафедра технологии твердых химических веществ, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань; e-mail: ju.yayakovleva@yandex.ru.

#### Information about the authors

**Aglyam R. Mukhutdinov**, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the department of Technology of Solid Chemicals, Kazan National Research Technological University, Kazan'; e-mail: muhutdinov@rambler.ru.

**Maksim G. Efimov**, Assistant of the department of Technology of Solid Chemicals, Kazan National Research Technological University, Kazan'; e-mail: jero07@bk.ru.

**Yuliya V. Yakovleva**, Department of Technology of Solid Chemicals, Kazan National Research Technological University, Kazan'; e-mail: ju.yayakovleva@yandex.ru.

## Автоматизированное устройство экспресс-анализа омасления и набухания полимерных материалов

Н.Г. Филиппенко✉, Е.А. Петрякова

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ifpi@mai.ru

### Резюме

В связи с интенсивной эксплуатацией изделий транспортной техники к полимерам предъявляются дополнительные требования по стойкости. В статье представлены результаты исследования изменений физико-механических свойств образцов, выполненных из полимеров, на примере эластомерных материалов, применяемых в качестве разделительных и уплотнительных изделий. Расширяющийся ассортимент агрессивных рабочих жидкостей и сред требует проведения дополнительных испытаний с целью определения динамики впитывания и набухания контактирующих с ними изделий из полимерных материалов. В качестве рабочих сред для проведения экспериментального исследования использовались наиболее агрессивные среды углеводородов на основе минеральных нефтепродуктов с различными коэффициентами вязкости. Проведенный анализ выборки количества экспериментов и методики расчета позволил определить время проведения испытаний для углеводородов различной массы. Полученные временные диапазоны показали производственную необходимость в формировании новой методики проведения испытаний и разработке систем автоматизации процесса устройством по определению параметров впитывания и набухания. Правильность принятого решения об изготовлении автоматизированной экспериментально-исследовательской установки на базе промышленного оборудования термовакуумного наполнения доказана результатами экспериментальных исследований, позволившими уменьшить время пропитки в несколько десятков раз. Внедрение процесса автоматизации в производство сокращает занятость работников промышленных лабораторий, повышает точность и объективность испытаний. Апробация представленного способа измерений дает возможность промышленного использования автоматизированной установки и прогнозирования физико-механических свойств полимерных материалов, работающих в агрессивной среде различной этиологии.

### Ключевые слова

полимеры, эластомеры, резины, впитывание, набухание, автоматизация, термовакуум

### Для цитирования

Филиппенко Н.Г. Автоматизированное устройство экспресс-анализа омасления и набухания полимерных материалов / Н.Г. Филиппенко, Е.А. Петрякова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 2(78). С. 185–194. DOI 10.26731/1813-9108.2023.2(78).185-194.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 05.04.2023 г.; поступила после рецензирования: 16.06.2023 г.; принята к публикации: 19.06.2023 г.

## Automated device for express analysis of oiling and swelling of polymeric materials

N.G. Filippenko✉, E.A. Petryakova

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ifpi@mai.ru

### Abstract

Due to the intensive operation of transport equipment products, additional requirements for durability are imposed on polymers. The article presents the results of the study of changes in the physical and mechanical properties of samples made of polymers on the example of elastomeric materials used as separating and sealing products. The expanding range of aggressive working fluids and media requires additional tests to determine the dynamics of absorption and swelling of polymer materials in contact with them. The most aggressive hydrocarbon media based on mineral oil products with different viscosity coefficients were used as working media for experimental research. The conducted analysis of the sample number of experiments and the calculation methodology allowed to determine the testing time for hydrocarbons of various mass weights. The obtained time ranges showed the production need for the development of a new test methodology and automation systems for the process by the device for determination of the absorption and swelling parameters. The decision taken to manufacture an automated experimental research facility based on industrial thermal vacuum filling equipment proved the correctness of such a choice by the results of experimental studies, which allowed reducing the absorption time by several dozen times. The introduction of the automation process into production reduces the employment of industrial laboratory workers increasing the accuracy and objectivity of tests. The approbation of the presented measurement method enables the industrial use of the automated installation and the prediction of the physical and mechanical properties of polymer materials working in an aggressive environment of various etiologies.

**Keywords**

polymers, elastomers, rubbers, absorption, swelling, automation, thermal vacuum

**For citation**

Filippenko N.G., Petryakova E.A. Avtomatizirovannoe ustroystvo ekspress-analiza omasleniya i nabukhaniya polimernykh materialov [Automated device for express analysis of oiling and swelling of polymeric materials]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 2 (78), pp. 185–194. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.2(78).185-194.

**Article Info**

Received: April 5, 2023; Revised: June 16, 2023; Accepted: June 19, 2023.

**Введение**

Интенсификация эксплуатации подвижного состава ОАО «РЖД» и других транспортных средств выдвигает повышенные требования к их изделиям. В случае традиционного использования изделий из металлов и сплавов машиностроению известно значительное количество методов и средств, обеспечивающих уверенный и оперативный контроль [1–4]. Время использования полимерных материалов в качестве конструкционных насчитывает всего несколько десятилетий, поэтому повышение надежности работы техники можно решить, в том числе, путем улучшения качества контроля [1–3]. Предварительные исследования показали, что существующие методы контроля качества изделий из полимерных материалов в связи с их незначительной активностью к различным агрессивным жидкостям и средам (несомненно положительная характеристика изделий) предусматривают периодические измерения физико-механических характеристик, причем время испытаний зависит от материалов и варьируется от нескольких десятков до сотен часов. Такое состояние дел зачастую не позволяет качественно организовать контроль целого ряда работ, связанных с регламентными, планово-предупредительными ремонтами.

Поэтому целью данного исследования была разработка методики проведения и автоматизация процесса экспресс-анализа пропитки полимерных материалов, эксплуатирующихся в различных агрессивных средах.

Ранее проведенные исследования автора показали, что наиболее актуальным материалом образцов полимерного эластомера является резина уплотнительного кольца клапана сливного прибора цистерн МБС-С [1, 2].

Применяемые в технике транспортного машиностроения рабочие среды не имеют постоянного химического состава, поэтому в качестве рабочей среды была выбрана стандарт-

ная рабочая жидкость (СРЖ) в определенном и постоянном соотношении бензина марки АИ-95 и гидравлической жидкости марки МГ-15-Б.

Такой подход к проведению экспериментальных исследований представляется наиболее правильным, так как позволит получить достоверные результаты и спрогнозировать продолжительность работоспособности полимерных материалов при различных внешних условиях.

Образцы исследования перед проведением экспериментов акклиматизировались, осматривались на предмет сплошности и наличия наружных повреждений. Взвешивание образцов производилось на аналитических весах с точностью измерения 0,0001 г.

Выборка состояла из пяти образцов, помещенных в емкость с СРЖ в соотношении 20:1 [2, 3].

Показателем наполнения служила динамика изменения массы образцов, среднее значение которых определялось как среднеарифметическое значение суммарной массы образцов  $\bar{M}$ , рассчитанное по формуле (1):

$$\bar{M} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N M_i, \quad (1)$$

где  $M_i$  – отдельное значение массы, изменяется от 1 до  $N$ , г;  $N$  – количество образцов, шт.

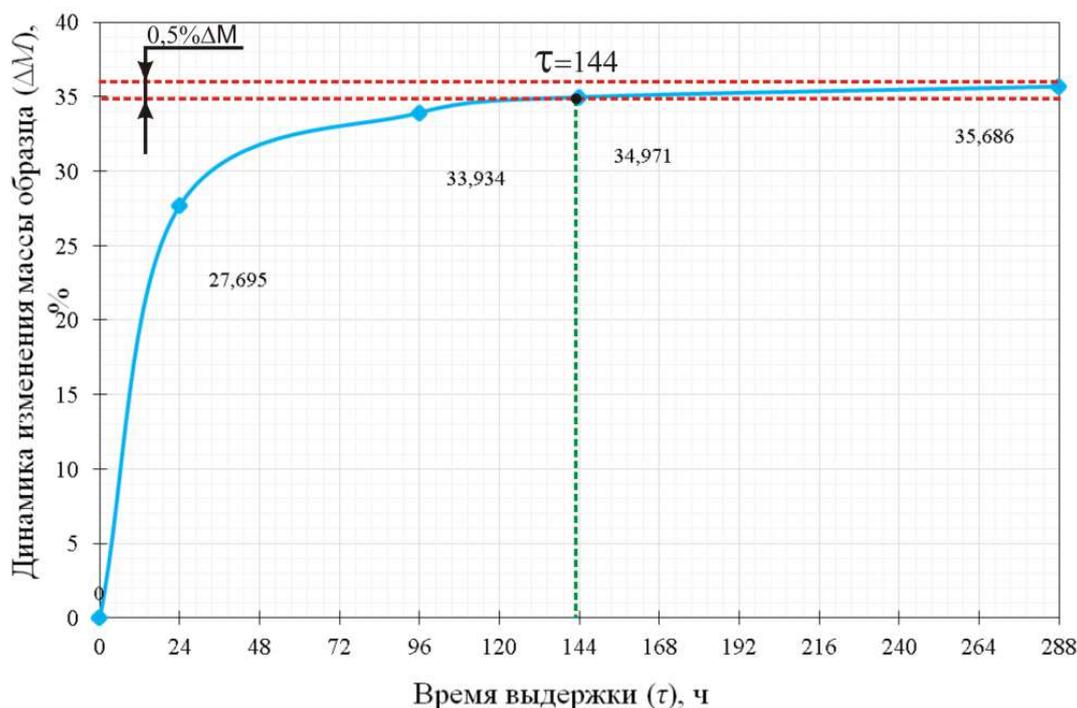
Показатели динамики изменения массы образцов рассчитывались по формуле (2):

$$\Delta M = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $M_1$  – масса предварительно взвешенного образца, г;  $M_2$  – масса образца, взвешенного в определенный момент времени выдержки, г.

Графические данные динамического изменения веса полимерного материала при взаимодействии с СРЖ показаны на рис. 1.

Анализ диаграммы показывает, что при контакте образцов со смесью СРЖ наибольшее



**Рис. 1.** Динамика изменения веса полимерного материала при взаимодействии со стандартной рабочей жидкостью

**Fig. 1.** Dynamics of changes in the weight of a polymeric material under interaction with a standard working fluid

поглощение происходит в течении первых 24 ч. взаимодействия. При этом масса образца увеличилась примерно на 27,7 %. Следующие 24 ч. наполнения отмечаются стабильным динамическим снижением скорости заполнения, позволяющим увеличить наполняемость до 32 %. Дальнейший период впитывания жидкости отмечается линейной характеристикой наполняемости вплоть до его полного окончания, которое было определено временем  $\tau = 144$  ч. Вес образца на данный период времени увеличился на 35 % от первоначального.

Идентификация полного заполнения образца СРЖ определялась показателем увеличения динамики наполнения на 0,5 % веса образца в течение 144 ч. эксперимента.

Аппроксимирование полученной зависимости, представлено в аналитическом выражении:

$$y = 3,5838 \cdot \ln(x) + 16,589 \quad (3)$$

где  $R_1^2 = 0,9969$  позволяет спрогнозировать процесс наполнения СРЖ маслобензостойкого (МБС) эластомерного материала, производимый в нормальных условиях, соответствующих требованиям [1–3].

Полученные результаты показали, что использование данного метода контроля

наполнения агрессивными жидкостями изделий, выполненных из полимерных эластичных материалов, с целью определения их эксплуатационных возможностей малоприспособны в условиях промышленных лабораторий ввиду их продолжительности и трудозатратности. Поэтому следующей подзадачей настоящего исследования была работка метода экспресс-анализа пропитки и его автоматизации.

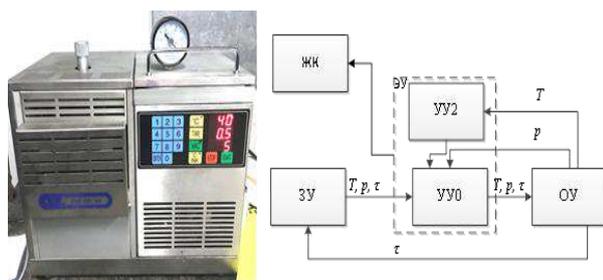
#### **Разработка и апробация автоматизированного метода испытаний резины в термовакууме**

В рамках школы ВЧ-электротермии, созданной на кафедре автоматизации производственных процессов Иркутского государственного университета путей сообщения, одним из направлений исследований были работы, связанные с наполнением полимеров моторными маслами. Авторами была изготовлена экспериментально-исследовательская установка на базе промышленного оборудования AZ pre-ink N2 для термовакуумного наполнения [4–6].

Преимуществом предлагаемого авторами настоящей работы оборудования пропитки полимерных материалов модели AZ preink N2 (рис. 2) является реализованная в нем функция

термовакуумного наполнения, что позволяет многократно ускорить процесс заполнения и набухания полимеров [4]. Принцип его управления имеет достаточно простую структуру.

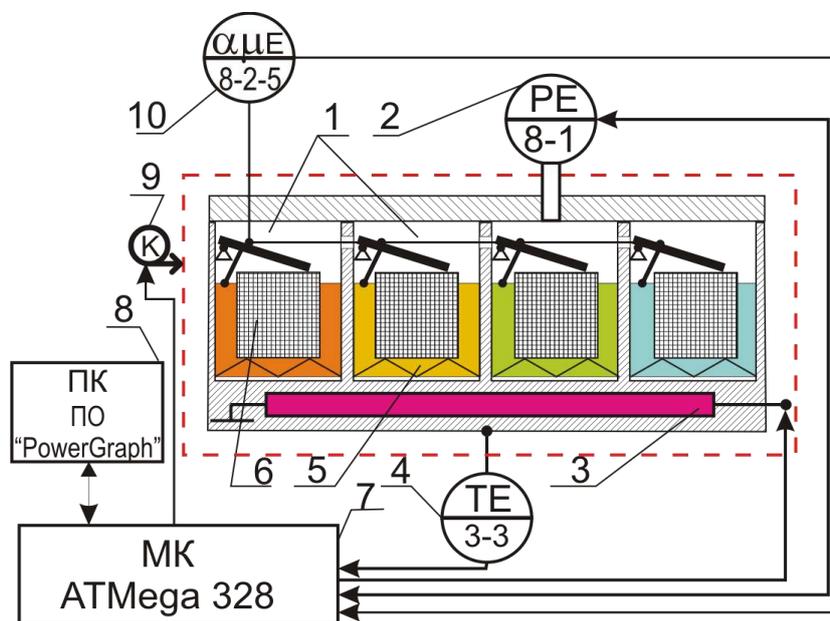
Анализ оборудования AZ preink N2 как объекта управления показал, что оно обеспечивает надежное поддержание заданных температурных и барометрических показателей в рабочей камере.



**Рис. 2.** Оборудование термовакуумное AZ preink N2 и его структурная схема  
**Fig. 2.** Thermal vacuum equipment AZ preink N2 and its block diagram

Тем не менее было определено, что его оснащение не дает возможности контролировать степень заполнения образцов ни по массе,

ни по объему впитываемой жидкости (растворителя). Данные измерения проводятся оператором по стандартным методикам с привлечением дополнительного оборудования, что крайне трудозатратно и малопродуктивно, таким методам контроля всегда сопутствуют субъективные погрешности процесса измерения. Поэтому установка была модернизирована, ее усовершенствованная модель показана на рис. 3, а структурная схема представлена на рис. 4. Модернизации предшествовали работы по изучению существующего устройства управления AZ preink N2. Изучение конструктивных особенностей оборудования и имеющихся резервов его вычислительных устройств (ЭУ1) позволило сделать вывод о возможности использования без внесения изменений в существующие электро-механические схемы оборудования, дополнительного блока контроля и управления (ЭУ2) на базе МК Atmega 328 [7–9]. Данный блок способен в реальном режиме времени производить вычисления по определению величины набухания за счет добавления в систему управления датчиков определения контролируемых параметров, а именно: объема заполняемой жидкости (растворителя) ( $V_p$ ,  $V_{исх}$ )

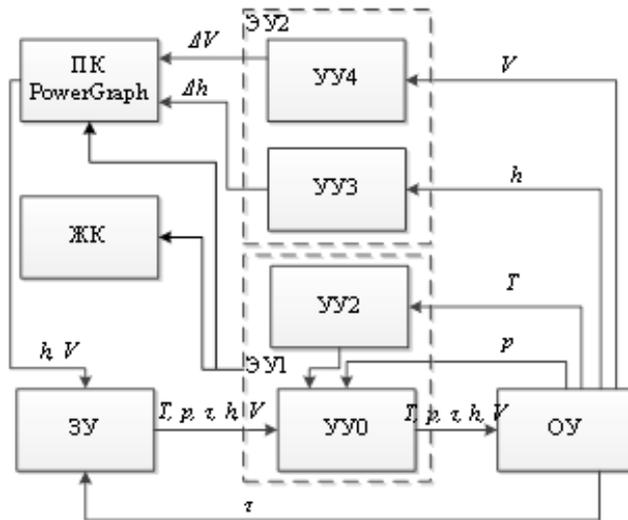


**Рис. 3.** Схема экспериментальной установки:

1 – вакуумная камера; 2 – манометр; 3 – нагревательный элемент; 4 – датчик температуры; 5 – рабочие жидкости; 6 – образец; 7 – микроконтроллер; 8 – персональный компьютер; 9 – вакуумный компрессор; 10 – датчики угла наклона (гироскопы)

**Fig. 3.** Scheme of the experimental installation:

1 – vacuum chamber; 2 – manometer; 3 – heating element; 4 – temperature sensor; 5 – working fluids; 6 – sample; 7 – microcontroller; 8 – personal computer; 9 – vacuum compressor; 10 – tilt angle sensors (gyroscopes)



**Рис. 4.** Структурная схема автоматизированной экспериментальной установки:

ПК – компьютер; ЖК – монитор; ЗУ – задающее устройство; УУ – устройства управления;  
 ОУ – объект управления; ЭУ – электронные управляющие устройства

**Fig. 4.** Block diagram of the automated experimental installation:

ПК – computer; ЖК – LCD monitor; ЗУ – master device; УУ – control devices; ОУ – control object;  
 ЭУ – electronic control devices

и изменяющихся геометрических размеров (высоты  $h_{\text{исх}}$ ,  $h_{\text{прон}}$ ) исследуемого материала [9, 10]. Аппаратное решение контроля этого комплекса параметров было найдено за счет установки трехосевого датчика положения (гироскопа) модели GY-521MPU-6050. Повысить точность измерения уровня жидкости и изменения высоты набухания образца позволил разработанный и апробированный датчик, основанный на эффекте магнитомера Холла [11]. Необходимо отметить, что совмещенные возможности датчика положения и магнитомера присутствуют в датчиках модели MPU9250, но их показатели по помехоустойчивости и стоимости значительно уступают бюджетной модели GY-521MPU-6050.

Наряду с выбранными ранее параметрами контроля (температура ТЕ – поз. 4 и давление РЕ – поз. 2) была определена необходимость в использовании дополнительных контролируемых параметров в качестве которых были взяты: уровень жидкости ( $\alpha$ ) и изменение высоты образца ( $\mu$ ) в процессе набухания. Необходимо отметить, что организацию контроля новых параметров позволяют осуществить электронные датчики (гироскопы) по углу наклона контактных пластин.

Технология автоматизированного метода экспресс-наполнения состоит из погружения образцов в ванны термовакuumной камеры 1,

которые заполнены агрессивными жидкостями 5 [12–15].

Давление в камере установки контролируется с помощью датчика давления (РЕ), установленного в крышке. Установка температуры и ее контроль (ТЕ) осуществляется через микроконтроллер с выводом информации в виде графического интерфейса на экран ПК. Для управления электронными устройствами и передачи данных на ПК использовался микроконтроллер ATmega, в который предварительно была загружена доработанная программа, основанная на предыдущих работах автора [4–7, 9, 11].

Контроль и передача данных от ЭУ2 на ПК организованы по COM-порту протоколом передачи ASCII со стандартной скоростью 9 600 бит/с.

Обработка, хранение и визуализация данных осуществлялась в реальном режиме времени с помощью отечественного программного продукта PowerGraph.

Разработанный алгоритм автоматизированной системы управления процессом пропитки и набухания полимерных материалов в агрессивной среде оборудования модели AZ preink N2 показан на рис. 5. Архитектура данного алгоритма построена по блочной схеме [16] и состоит из двух управляющих электронно-вычислительных устройств. Первый блок – это штатно установленные приспособления,

условно разделенные на устройства поддержания температуры (поз. 1), поддержания установленного давления (поз. 2) и контроля времени работы оборудования (поз. 3). Во второй спроектированный и установленный блок были интегрированы устройства контроля размеров (высоты) образца (поз. 4) и устройство контроля уровня жидкости (поз. 5).

Вычислительные мощности установленного программируемого контроллера (ЭУ2) позволяют производить необходимые расчеты и выводить на монитор ПК данные по динамике заполнения полимерного образца.

Учитывая, что изготавливаемые образцы в определенных пределах имеют некоторые отличия как по высоте, так и по объему [17], в автоматизированной системе управления была

предусмотрена возможность производить начальную настройку (калибровку) системы контроля по высоте установленного образца и уровню залитой жидкости.

Таким образом, разработанная автоматизированная система управления и алгоритм ее функционирования значительно расширили возможности установки AZ preink N2, что впервые позволило в реальном режиме времени производить прямой контроль заполнения и набухания образцов материала жидкостью (растворителем), а разработанная адаптивная система калибровки упростила наладку и подстройку системы контроля под образцы различных размеров, что делает менее сложным процесс изготовления образцов и удешевляет его. Все это позволяет утверждать, что внедрение разрабо-

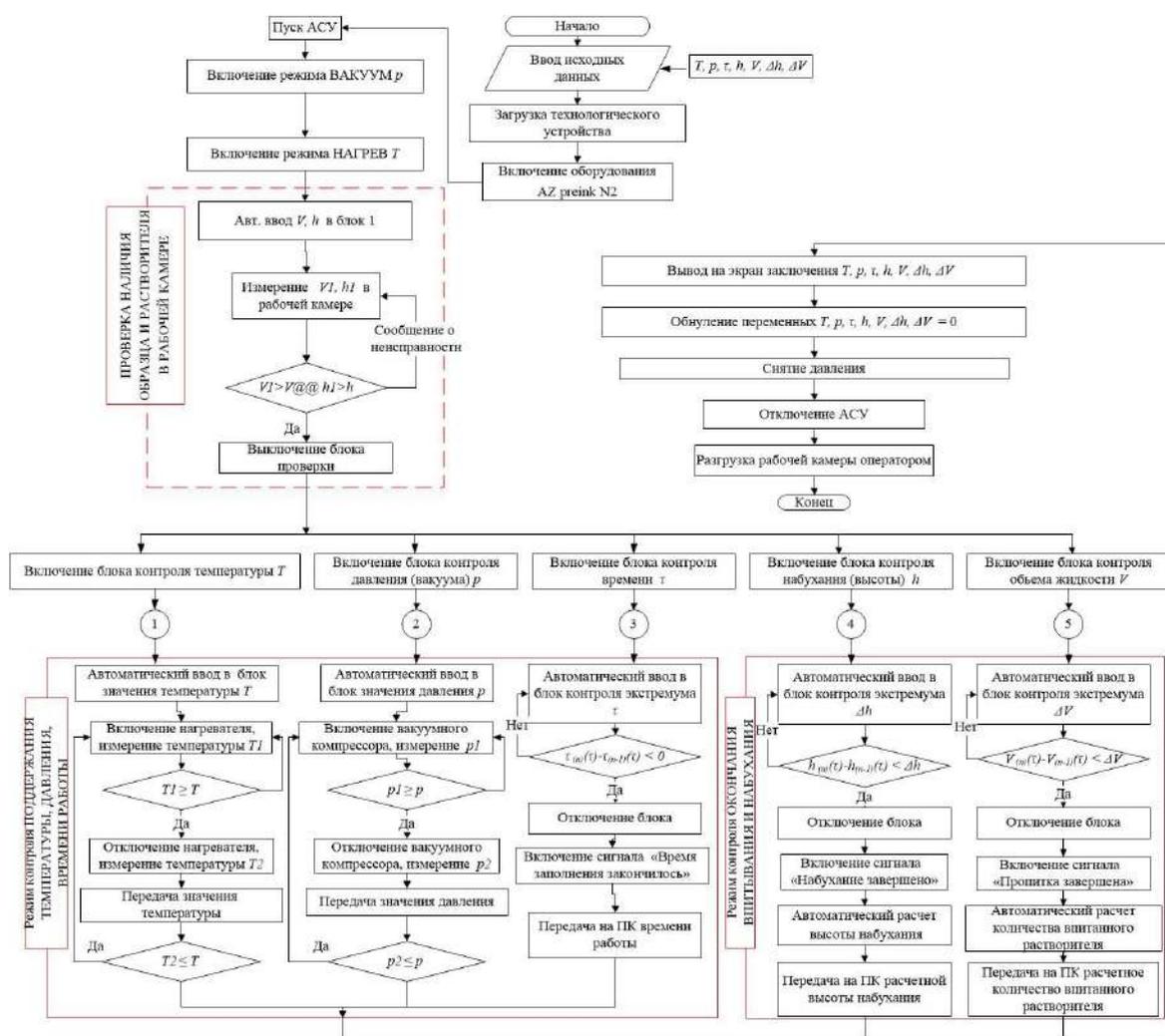
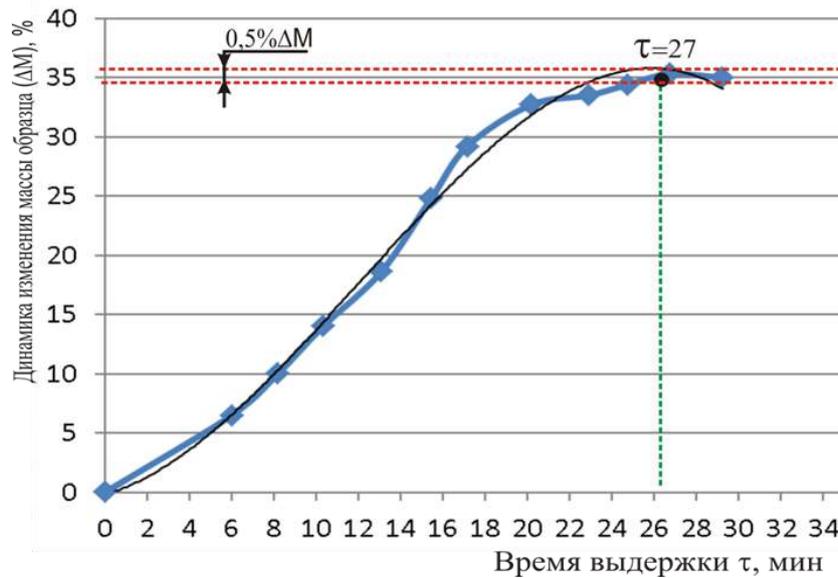


Рис. 5. Алгоритм автоматизированной системы управления процессом пропитки и набухания полимерных материалов в агрессивной среде оборудования модели AZ preink N2

Fig. 5. Algorithm of the automated control system for the process of impregnation and swelling of polymeric materials in an aggressive environment of equipment model AZ preink N2



**Рис. 6.** Динамика изменения веса полимерного материала при взаимодействии со стандартной рабочей жидкостью в термовакуумной камере

**Fig. 6.** Dynamics of changes in the weight of a polymeric material when interacting with a standard working fluid in a thermal vacuum chamber

танной АСУ снижает трудозатраты и время на производство образцов и проведение контрольных испытаний, а также исключает погрешности, связанные с человеческим фактором при выполнении этих операций [18–20].

Результаты испытаний по автоматизированному процессу термовакуумного наполнения образцов представлены на рис. 6.

Анализ полученных данных показывает, что при контакте образцов в термовакуумной камере со смесью СРЖ наибольшее поглощение происходит в течении первых 17 мин. взаимодействия. При этом масса образца увеличилась примерно на 28 %. Период 17–24 мин. характеризуется плавным снижением динамики наполнения. Завершение впитывания можно определить временным интервалом в 27 мин. работы установки и наполняемостью до 35 %. Дальнейшее изменение массы образца находится в интервале 0,5 %, что было принято ранее как завершение процесса заполнения.

Таким образом, период полного окончания впитывания СРЖ в термовакуумной камере был определен временем  $\tau = 27$  мин. Вес образца за данный период времени увеличился на 35 % от первоначального, что также подтверждается работами других авторов [10, 17].

Аппроксимирование полученной зависимости, представленной в аналитическом выражении:

$$y = -0,0034 x^3 + 0,1214 x^2 + 0,5156 x - 0,1964 \quad (4)$$

при  $R_2^2 = 0,9943$  позволяет спрогнозировать процесс наполнения СРЖ МБС эластомерного материала, производимый в термовакуумной камере, разработанной в рамках настоящего исследования.

Сравнительный результат динамик наполнения в реальном режиме времени и сопоставление их с произведенным экспресс-анализом позволил вывести их функциональную зависимость. Используя полученные аналитические зависимости (3) и (4), представив их в виде

$$f_1(x) = -0,0034 \cdot x^3 + 0,1214 \cdot x^2 + 0,5156 \cdot x - 0,1964$$

$$f_2(x) = 3,5838 \cdot \ln(x) + 16,589,$$

несложно определить, что функция перевода значений, полученных при использовании экспресс-метода, в значения, соответствующие проведению наполнения, в нормальных условиях будет определяться как:

$$f_3(x) = \frac{f_1(x)}{f_2(x)} = \frac{-0,0034x^3 + 0,1214x^2 + 0,5156x - 0,1964}{3,5838 \cdot \ln(x) + 16,589}.$$

После вычислений переводная функция, полученная графически, принимает следующий вид:

$$f_3(x) \approx 1,9218 \cdot e^{0,1594x},$$

при этом достоверность аппроксимирования составила:

$$(R_1^2 + R_2^2) / 2 = (0,9969 + 0,9943) / 2 = 0,9956.$$

Анализ произведенной работы позволяет говорить о дополнительных возможностях разработанной методики и автоматизированной термовакуумной установки, заключающихся в изучении работоспособности полимерных эластомерных материалов в режиме циклического воздействия температур и давления с целью прогнозирования сроков эксплуатации изделий из них [16–18]. Подход представляется актуальным и соответствует современным тенденциям при проведении дальнейших исследований данной тематики.

### Заключение

На основании проведенных исследований методик испытаний, эластомерных материалов на примере маслобензостойкой резины марки МБС, был сделан вывод о невозможности использования в условиях промышленных лабо-

раторий стандартных методик испытаний в связи с их длительностью и трудоемкостью.

Разработанная новая методика и автоматизированная установка для ее осуществления позволила уменьшить трудоемкость и время процесса пропитки со 144 ч. до 27 мин.

Представленная методика и рассчитанный коэффициент перевода позволили определить взаимосвязь значений времени экспресс-анализа и временных интервалов стандартного наполнения с удовлетворительной достоверностью  $R^2 = 0,9956$ .

Были определены перспективные направления дальнейших исследований, связанные с прогнозированием ресурсов эксплуатации изделий из эластомерных полимеров при различных внешних условиях их работы.

### Список литературы

1. ГОСТ 7338–90. Пластины резиновые и резинотканевые. Технические условия. Введ. 1991–07–01. М. : Изд-во стандартов, 1991. 26 с.
2. ГОСТ 269–66. Резина. Общие требования к проведению физико-механических испытаний. Введ. 1966–07–01. М. : Изд-во стандартов, 1966. 15 с.
3. ГОСТ 9.030–74. Резины. Методы испытаний на стойкость в ненапряженном состоянии к воздействию жидких агрессивных сред. Введ. 1975–07–01. М. : Стандартиформ, 2008. 18 с.
4. Ларченко А.Г. Автоматизированное устройство диагностирования полимерных изделий сложной конфигурации методом высокочастотного излучения // Контроль. Диагностика. 2016. № 2. С. 61–65.
5. Булманис В.Н., Ярцев В.А., Кривонос В.В. Работоспособность конструкций из полимерных композитов при воздействии статических нагрузок и климатических факторов // Механика композиционных материалов. 1987. № 5. С. 915–920.
6. Пат. 132209 Рос. Федерация. Устройство диагностики деталей из полиамидных материалов / А.Г. Ларченко, А.В. Лившиц, Н.Г. Филиппенко и др. № 2013115531/28 : заявл. 05.04.2013 ; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 25. 2 с.
7. Высокочастотная электротермическая обработка неметаллического вторичного сырья / А.В. Лившиц, А.Г. Ларченко, Филатова С.Н. и др. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 6. С. 55–65.
8. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки до 2030 г. // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7–17.
9. Лившиц А.В. Автоматизированная система научных исследований высокочастотной электротермии // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 4. С. 54–60.
10. Железнодорожные цистерны / И.Г. Морчиладзе, А.П. Никодимов, М.М. Соколов и др. М. : ИБС-Холдинг, 2006. 512 с.
11. Development and automation of the device for determination of thermophysical properties of polymers and composites / D. Bakanin, V. Bychkovsky, N. Filippenko et. al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. P. 731–740. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8\_69.
12. Исследование топливостойких резин на основе бутадиен-нитрильных каучуков, изготовленных с применением эмульгаторов различных типов / А.М. Чайкун, М.А. Венедиктова, О.А. Елисеев и др. // Труды ВИАМ. 2014. № 8. URL : [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_21817320\\_70710122.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21817320_70710122.pdf) (Дата обращения 15.11.2022).
13. Влияние способа введения пластификатора на свойства парафинатных каучуков БНКС и стандартные резины на их основе / О.Е. Маскулуйнате, Ю.Л. Морозов Н.С. Сухинин и др. // Каучук и резина. 2006. № 3. С. 14–17.
14. Гидрирование бутадиен-нитрильных каучуков / Б.Ю. Анисимов, А.С. Дыбман, Л.С. Имянитов и др. // Каучук и резина. 2007. № 2. С. 32–38.
15. Особенности построения рецептур для морозостойких резин / А.М. Чайкун, О.А. Елисеев, И.С. Наумов и др. // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 3 (28). С. 53–55.
16. Филиппенко Н.Г. Исследование механических характеристик полиамидных материалов сепараторов буксовых узлов подвижного состава // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 12. С. 43–47.
17. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натуральных условиях / В.А. Ефимов, А.К. Шведкова, Т.Г. Коренькова и др. // Труды ВИАМ. 2013. № 1. URL : [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_22002377\\_46052682.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_22002377_46052682.pdf) (Дата обращения 15.11.2022).

18. Ларченко А.Г. Оценка качества изделий из полимерных материалов машиностроительного назначения // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2019. Т. 23. № 3 (146). С. 463–471.
19. Вапиров Ю.М., Кириллов В.Н., Кривонос В.В. Закономерности изменения свойств полимерных композитов конструкционного назначения при длительном климатическом старении в свободном и нагруженном состояниях // Гидроавиасалон-2006 : сб. докл. VI науч. конф. по гидроавиации. Геленджик, 2006. Ч. 2. С. 103–108.
20. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 412–423.

### References

- GOST 7338–90. Plastiny rezinovyie i rezinotkanevyye. Tekhnicheskie usloviya [State Standard 7338–90. Plates rubber and rubber-fabric. Specifications]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1991. 26 p.
- GOST 269–66. Rezina. Obshchie trebovaniya k provedeniyu fiziko-mekhanicheskikh ispytaniy [State Standard 269–66. Rubber. General requirements for physical and mechanical testing]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1966. 15 p.
- GOST 9.030–74. Reziny. Metody ispytaniy na stoikost' v nenapryazhennom sostoyanii k vozdeystviyu zhidkikh agresivnykh sred [State Standard 9.030–74. Rubber. Test methods for resistance in an unstressed state to the action of liquid aggressive media]. Moscow: Standartinform Publ., 2008. 18 p.
- Larchenko A.G. Avtomatizirovannoe ustroystvo diagnostirovaniya polimernykh izdelii slozhnoi konfiguratsii metodom vysokochastotnogo izlucheniya [Automated device for diagnosing polymer products of complex configuration by the method of high-frequency radiation]. *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2016, no. 2, pp. 61–65.
- Bulmanis V.N., Yartsev V.A., Krivonos V.V. Rabotosposobnost' konstruktivnykh izdeliy iz polimernykh kompozitov pri vozdeystvii staticheskikh nagruzok i klimaticeskikh faktorov [Performance of structures made of polymer composites under the influence of static loads and climatic factors]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of composite materials], 1987, no. 5, pp. 915–920.
- Larchenko A.G., Livshits A.V., Filippenko N.G., Popov S.I. Patent RU 132209 U1, 10.09.2013.
- Livshits A.V., Filippenko N.G., Larchenko A.G., Filatova S.N. Vysokochastotnaya elektrotermicheskaya obrabotka nemetallicheskogo vtorichnogo syr'ya [High-frequency electrothermal treatment of non-metallic secondary raw materials]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman* [Science and education: scientific publication of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman], 2014, no. 6, pp. 55–65.
- Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki do 2030 goda [Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing until 2030]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2012, no. 5, pp. 7–17.
- Livshits A.V. Avtomatizirovannaya sistema nauchnykh issledovaniy vysokochastotnoi elektrotermii [Automated system of scientific research of high-frequency electrothermy]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Problems of mechanical engineering and automation], 2015, no. 4, pp. 54–60.
- Morchiladze I.G., Nikodimov A.P., Sokolov M.M., Tret'yakov A.V. Zheleznodorozhnye tsisterny [Railway cisterns]. Moscow: IBS-Holding Publ., 2006. 512 p.
- Bakanin D., Bychkovsky V., Filippenko N., Butorin D., Kuraitis A. Development and automation of the device for determination of thermophysical properties of polymers and composites. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 982, pp. 731–740.
- Chaikun A.M., Venediktova M.A., Eliseev O.A., Naumov I.S. Issledovanie toplivostoikikh rezin na osnove butadiyen-nitril'nykh kauchukov, izgotovlennykh s primeneniem emul'gatorov razlichnykh tipov [Investigation of fuel-resistant rubbers based on nitrile-butadiene rubbers manufactured using various types of emulsifiers]. *Trudy VIAM* [Proceedings of the All-Russian Institute of aviation materials], 2014, no. 8. Available at: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_21817320\\_701710122.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21817320_701710122.pdf) (Accessed November 15, 2022).
- Maskulinate O.E., Morozov Yu.L., Sukhinin N.S., Bubenev V.A., Bukhtiyarova N.M., Blinov V.S. Vliyanie sposoba vvedeniya plastifikatora na svoystva parafinatnykh kauchukov BNKS i standartnye reziny na ikh osnove [Influence of the method of introducing a plasticizer on the properties of BNKS paraffin rubbers and standard rubbers based on them]. *Kauchuk i rezina* [Caoutchouc and rubber], 2006, no. 3, pp. 14–17.
- Anisimov B.Yu., Dybman A.S., Imyaninov L.S., Polyakov S.A. Gidrirovaniye butadien-nitril'nykh kauchukov [Hydrogenation of butadiene-nitrile rubbers]. *Kauchuk i rezina* [Caoutchouc and rubber], 2007, no. 2, pp. 32–38.
- Chaikun A.M., Eliseev O.A., Naumov I.S., Venediktova M.A. Osobennosti postroeniya retseptur dlya morozostoikikh rezin [Features of building recipes for frost-resistant rubbers]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2013, no. 3 (28), pp. 53–55.
- Filippenko N.G. Issledovanie mekhanicheskikh kharakteristik poliamidnykh materialov separatorov buksovykh uzlov podvizhnogo sostava [Investigation of the mechanical characteristics of polyamide materials for separators of axle boxes of rolling stock]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory laboratory. Material diagnostics], 2017, vol. 83, no. 12, pp. 43–47.
- Efimov V.A., Shvedkova A.K., Koren'kova T.G., Kirillov V.N. Issledovanie polimernykh konstruktivnykh materialov pri vozdeystvii klimaticeskikh faktorov i nagruzok v laboratornykh i naturnykh usloviyakh [Study of polymeric structural materials under the influence of climatic factors and loads in laboratory and field conditions]. *Trudy VIAM* [Proceedings of the All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials], 2021, no. 1. Available at: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_22002377\\_46052682.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_22002377_46052682.pdf) (Accessed November 15, 2022).
- Larchenko A.G. Otsenka kachestva izdelii iz polimernykh materialov mashinostroitel'nogo naznacheniya [Assessment of the quality of products from polymeric materials for machine-building purposes]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2019, vol. 23, no. 3 (146), pp. 463–471.
- Vapirov Yu.M., Kirillov V.N., Krivonos V.V. Zakonomernosti izmeneniya svoystv polimernykh kompozitov konstruktivnogo naznacheniya pri dlitel'nom klimaticheskom starenii v svobodnom i nagruzhennom sostoyaniyakh [Patterns of

changes in the properties of structural polymer composites during long-term climatic aging in free and loaded states]. *Sbornik dokladov VI nauchnoi konferentsii po gidroaviatsii «Gidroaviasalon-2006»* [Proceedings of the VI Scientific Conference on hydroaviation «Gidroaviasalon-2006»]. Gelendzhik, 2006, part II, pp. 103–108.

20. Kirillov V.N., Startsev O.V., Efimov V.A. Klimaticheskaya stoikost' i povrezhdaemost' polimernykh kompozitsionnykh materialov, problemy i puti resheniya [Climatic resistance and damage of polymer composite materials, problems and solutions]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2012, no. 5, pp. 412–423.

#### Информация об авторах

**Филиппенко Николай Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: ifpi@mai.ru.

**Петрякова Елена Алексеевна**, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: petryakova\_ea@irgups.ru.

#### Information about the authors

**Nikolai G. Filippenko**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of Department of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: ifpi@mai.ru.

**Elena A. Petryakova**, Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: petryakova\_ea@irgups.ru.



## СОЛЬСКАЯ ИРИНА ЮРЬЕВНА

### Доктор экономических наук, профессор

Ирина Юрьевна родилась 23 сентября 1955 года в г. Иркутске. В 1972 году с золотой медалью окончила обучение в математическом классе школы № 11 и поступила в Иркутский политехнический институт, а в 1977 году получила квалификацию инженера-системотехника по специальности «Автоматизированные системы управления».

Окончив институт, Ирина Юрьевна начинает активную научно-исследовательскую деятельность в Иркутском вычислительном центре ВСФ СОАН СССР и 6 июня 1991 года успешно защищает кандидатскую диссертацию, посвященную разработке научно-методических подходов и модели формирования организационной структуры и системы управления регионального меотраслевого научно-технического центра Иркутской области. Еще через четыре года ей присваивается уче-

ное звание доцент. В 2000 году, продолжая заниматься проблемами экономики, она становится доктором экономических наук, а в 2021 году получает звание профессора.

В 2001 году Ирина Юрьевна начинает работать в Иркутском государственном университете путей сообщения, сначала профессором кафедры «Экономика и управление на железнодорожном транспорте», а с 2002 года становится руководителем кафедры «Финансы и бухгалтерский учет».

В процессе преподавательской деятельности входила в состав четырех советов по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата экономических наук. За время работы опубликовала более 300 научных и учебно-методических работ, в том числе является автором (соавтором) 14 научных монографий и четырех учебных пособий с грифом УМО. В настоящее время входит в состав совета 44.2.007.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук, созданного на базе Сибирского государственного университета путей сообщения по научной специальности 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономические науки).

Кропотливая и целеустремленная научно-исследовательская деятельность Сольской И.Ю. позволила сформировать на базе Иркутского государственного университета путей сообщения мощную научно-педагогическую школу «Инфраструктурные аспекты социально-экономической динамики». Труды научного коллектива школы сегодня вносят значительный вклад в дальнейшее развитие научных исследований в области проектирования и развития экономических инструментов управления.

Высокая эффективность деятельности научной школы подтверждается ее значительными успехами в подготовке научных кадров. Так под руководством Ирины Юрьевны на сегодняшний день подготовлено и успешно защищено 23 диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук, 1 диссертация на соискание ученой степени доктора экономических наук.

По инициативе Ирины Юрьевны Сольской и под ее руководством в течение ряда лет выполнялись инициативные и хозяйственные научно-исследовательские работы, связанные с решением актуальных народно-хозяйственных задач и имеющие номер государственной регистрации, в том числе по грантам правительства Иркутской области.

В разные годы Сольская И.Ю. принимала участие в организационно-методической работе, разрабатывая и обсуждая новые образовательные стандарты и образовательные программы в рамках членства в учебно-методических объединениях:

- Учебно-методического объединения по образованию в области производственного менеджмента (ИНЖЕКОН);
- Учебно-методического объединения высших учебных заведений Российской Федерации по образованию в области железнодорожного транспорта УМО (МИИТ);

- Учебно-методического объединения высших учебных заведений Российской Федерации по образованию в области экономики и финансов УМО (ФА при Правительстве Российской Федерации);
- Учебно-методического объединения высших учебных заведений Российской Федерации по образованию в области антикризисного управления УМО (УЭиС).

Являясь сертифицированным членом Международного сообщества по инженерной педагогике (IGIP), Ирина Юрьевна неоднократно принимала активное участие в научных мероприятиях разного уровня, в том числе выступала с докладами по тематике соответствующей наиболее дискуссионным вопросам развития методики совершенствования образовательного процесса: «Specificity of business competence formation in engineer education» (2006), «Raising the level of staff qualification in the field of professional management as an element of quality management system» (2009), «Formation of professional trajectory for transportation engineers in educational services export» (2012), «Building professional competencies of transport engineers in the framework of project cooperation with employer companies» (2015) и др.

Под руководством и при участии профессора Сольской И.Ю. выполнялись международные научно-исследовательские и учебно-методические проекты, а также проекты по заказу администрации Иркутской области:

- Подготовка управленческих кадров для Предбайкальского региона – международный проект TASIS;
- Подготовка кадров высшей квалификации в области безопасности транспортных систем – международный проект BRIDGE;
- Трансформация финансового механизма, разработка системы планирования, контроллинга и бюджетирования;
- Оценка удорожающего влияния удаленности Иркутской области от основных рынков сбыта и разработка мер по снижению транспортных издержек в ценах продукции ее товаропроизводителей.
- Авторский клас Департамента корпоративных финансов ОАО «РЖД».

На протяжении всего периода научно-педагогической деятельности Ирина Юрьевна активно занимается лицензированием новых и аккредитацией действующих образовательных программ бакалавриата, магистратуры и аспирантуры. С 2008 года руководит магистерскими программами по направлению «Экономика».

На сегодняшний день Ирина Юрьевна входит в состав редакционной коллегии научного журнала «Современные технологии. Системный анализ. Моделирование», в течение последних 20 лет является председателем организационного комитета и научным редактором сборника научных трудов «Финансовые аспекты структурных преобразований в экономике», многократно выступала в качестве рецензента научных монографий, учебников и учебных пособий, в том числе и зарубежных авторов.

За заслуги в развитии науки, многолетний добросовестный труд, профессиональное мастерство Ирина Юрьевна награждена знаком отличия «Почетный работник высшего профессионального образования», различными почетными грамотами и благодарностями от Министерства науки и высшего образования РФ, Министерства транспорта РФ, Губернатора Иркутской области, мэра г. Иркутска, ректора ИрГУПС и др.

**Современные технологии**  
**Системный анализ**  
**Моделирование**

**№ 2 (78)**  
**2 0 2 3**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

Главный редактор **А.П. Хоменко**  
Ответственный за выпуск **Д.В. Буторин**

Подписано в печать 31.07.2023. Формат 60x84/8.

Дата выхода в свет 11.08.2023

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 24,41.

Уч.-изд. л. 17,17. Тираж 500 экз. Заказ № 3675

Подписной индекс по каталогу «Урал-Пресс»: 64556

ISSN: 1813-9108

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ РАН.

Сведения о журнале ежегодно

публикуются в международной справочной системе

по периодическим и продолжающимся изданиям

«Ulrich's Periodicals Directory»

ИД №06506 от 26.12.01

Маркировка информационной продукции - не маркируется

Цена свободная

Адрес редакции, издательства и типографии

664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Иркутский государственный университет путей сообщения

Телефон: 8(3952) 63-83-74, E-mail: stsam@irgups.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство ПИ № ФС77-66109 от 20 июня 2016 г.

Учредитель: ФГБОУ ВО "Иркутский государственный университет путей сообщения"  
(664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)