

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 17, выпуск 3, 2020

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Учредитель

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

Издатель

Общество с ограниченной ответственностью
«Издательский дом Т-ПРЕССА» по договору
№ ЭОА45208 от 11.02.2020 г.

Адрес учредителя

190031, СПб., Московский пр., 9,
тел. (812) 314-92-32

Адрес издателя

190031, СПб., наб. реки Фонтанки, 117-А,
пом. 33Н, офис 351, тел. 8(921)099-94-77,
e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС2-7499 от 06.04.2005 г., выдано
Федеральной службой по надзору за соблюдением
законодательства в сфере массовых коммуникаций
и охране культурного наследия, Управление
по Северо-Западному федеральному округу

Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

Журнал включен в перечень ведущих
рецензируемых научных журналов и изданий
(решение Президиума Высшей аттестационной
комиссии Минобрнауки России от 29.12.2015 г.,
№ 6/6)

Журнал публикует научные статьи в областях
технические науки (05.00.00), транспорт (05.22.00)

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется

по адресно-целевой подписке через редакцию
и каталог ОАО «Роспечать» (индекс 18509)

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

А. Ю. Панычев, канд. экон. наук, доцент

Заместитель главного редактора

А. К. Канаев, д-р техн. наук, доцент

Научный редактор

А. М. Евстафьев, д-р техн. наук, доцент

Выпускающий редактор

Э. А. Горелик

Перевод на английский язык

Ю. А. Фаттахова, А. Н. Крышняя

Верстка

А. А. Стуканова

Редактор

В. Е. Филиппова

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Панычев Александр Юрьевич, канд. экон. наук,
доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель
Совета

Шнайдер Экхард, профессор, Фраунгоферовский
институт неразрушающего контроля, Саарбрюкен,
Германия

Ситаж Марек, профессор, Силезский технический
университет, Польша

Христов Христо, профессор, Технический университет,
София, Болгария

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Сапожников Валерий Владимирович, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель редколлегии

Бадёр Михаил Петрович, д-р техн. наук, профессор, МГУПС
(МИИТ), Москва, Россия

Белаш Татьяна Александровна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Беленцов Юрий Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Блажко Людмила Сергеевна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Бороненко Юрий Павлович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Брынь Михаил Ярославович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Губачева Лариса Александровна, д-р техн. наук, профессор,
Восточно-Украинский национальный университет им. В. Даля,
Луганск, Украина

Егоров Владимир Викторович, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Канаев Андрей Константинович, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Петрова Татьяна Михайловна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Покровская Оксана Дмитриевна, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Смирнов Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Соловьева Валентина Яковлевна, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Талантова Клара Васильевна, д-р техн. наук, доцент, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Титова Тамила Семеновна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Фролов Юрий Степанович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Шангина Нина Николаевна, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Штыков Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, ПГУПС,
Санкт-Петербург, Россия

Фото на обложке из архивов библиотеки
ФГБОУ ВО ПГУПС. 1910 г.

Подписано в печать с оригинал-макета 25.09.2020.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать МФУ.

Усл. печ. л. 21,75. Уч.-изд. л. 10,875. Установочный тираж 300 экз.

Заказ . Цена свободная.

Отпечатано в типографии ООО «Издательство ОМ-Пресс»
190031, СПб., наб. р. Фонтанки, 117

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY, volume 17, issue 3, 2020

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Founder

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Emperor Alexander I Petersburg State Transport University"

Publisher

Limited Liability Company "T-PRESSA Publishing House", under contract N ЭОА45208 dated February 11, 2020

Founder's address

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9,
(812) 314-92-32

Publisher's address

190031, St. Petersburg,
117-A, Fontanka River emb., room 33H, office 351,
8(921)099-94-77,
e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Mass media registration certificate number

ПН N ФС2-7499 dd. 06.04.2005 issued by the Federal service for the monitoring of legislation compliance in the sphere of mass communications and the preservation of cultural heritage, North West Federal district division

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

The journal is included in the List of leading peer-reviewed scientific journals and publications

The journal publishes scientific articles in the fields of Technics (05.00.00), Transport (05.22.00)

The journal has the Peer-review division

The journal is distributed by direct subscription via Editorial office and Rospechat catalogue (item 18509)

JOURNAL STAFF

Editor-in-chief

A. Yu. Panychev, PhD of Economics,
Associate Professor

Deputy chief editor

A. Kanayev, D. Eng. Sci., Associate Professor

Science editor

A. Evstafev, D. Eng. Sci., Associate Professor

Executive editor

E. Gorelik

English translation

Yu. Fattakhova, A. N. Kryshnia

Layout

A. Stukanova

Editor

V. Philippova

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Aleksander Panychev, PhD in Economics, Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial board

Eckhard Shneider, Professor, Fraunhofer Institute for Non-Destructive Testing, Saarbrücken, Germany

Marek Sitazh, Professor, Silesian University of Technology, Poland

Khristo Khristov, Professor, Technical University of Sofia, Bulgaria

EDITORIAL TEAM

Valeriy Sapozhnikov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial team

Mikhail Badyer, D. Eng. Sci., Professor, Moscow State University of Railway Engineering, Moscow, Russia

Tatiana Belash, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Yury Belentsov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Liudmila Blazhko, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Yuriy Boronenko, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Mikhail Bryn', D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Larisa Gubachyeva, D. Eng. Sci., Professor, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Luhansk, Ukraine

Vladimir Egorov, D. Eng. Sci., Associate Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Andrey Kanayev, D. Eng. Sci., Associate Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Aleksander Ledyayev, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Tatiana Petrova, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Oksana Pokrovskaya, D. Eng. Sci., Associate Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Vladimir Smirnov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Valentina Solovyova, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Klara Talantova, D. Eng. Sci., Associate Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Tamila Titova, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Yury Frolov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Nina Shangina, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Valeriy Shtikov, D. Eng. Sci., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Published by Limited Liability Company "OM-Press Publishing House" 190031, St. Petersburg, Fontanka River emb., 117
Open price

© Petersburg State Transport University, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Д. П. Кононов, Ю. В. Гомонец

Методика контроля дефектов колесных пар железнодорожного подвижного состава при их обработке на колесотокарных станках 275

Г. И. Никифорова

Исследование эксплуатации вагонного парка операторских компаний 282

О. Д. Покровская

Принципы реализации комплексных транспортно-логистических услуг на железнодорожном транспорте и требования к ним 288

Тан Чжуншэн

Сравнительный анализ нормативно-правовой документации России и Китая в области охраны труда при работах на строительной технике 304

М. В. Третьяков, В. А. Брызгалов, Е. В. Румянцева

Устьевые участки рек как индикаторы антропогенных изменений геоэкологического состояния устьевых областей рек Арктической зоны Российской Федерации 311

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов, Р. Ю. Григорьев, В. В. Попов

Анализ методов измерений силового воздействия подвижного состава на путь и систем технического контроля колес при движении поезда 324

А. А. Зайцев, П. С. Троицкий

Анализ снижения рисков на железнодорожной инфраструктуре при внедрении моторвагонных грузовых электропоездов 345

Л. Г. Нерадовский, Л. Л. Фёдорова, К. О. Соколов

Опыт изучения структуры и петрофизики мерзлых грунтов участка автодороги «Вилуй» в г. Якутске методом георадиолокации 353

М. А. Слепцов, И. П. Васильев, С. А. Старовойтов, И. Ю. Мартынюк

Оптимизация алгоритмов системы управления электровозов ЗЭС5К с поосным регулированием силы тяги 366

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

А. А. Воробьев, В. И. Кулик, А. С. Нилов, Д. А. Жуков

Анализ фрикционных материалов тормозных колодок в парах трения с тормозными дисками из керамического композита с SiC-матрицей для высоконагруженного железнодорожного транспорта 378

С. Г. Истомина, А. Е. Перестенко

Оценка составляющих потерь электроэнергии электроподвижным составом и устройствами электроснабжения 387

А. Г. Котенко, В. В. Соляник

Оценка качества переработки вагонопотока в условиях неравномерности прибытия поездов на сортировочную станцию 397

Н. Р. Мухаммадиев

Результаты исследования вибрации в зоне рельсового стыка при рельсовых скреплениях различной упругости 407

Т. М. Назирхонов, А. Я. Якушев

Компьютерная модель тягового трансформатора электровоза переменного тока серии «O'Z-ELR» 416

Т. Г. Сергеева, Г. И. Никифорова

Повышение конкурентоспособности транспортно-логистических компаний в условиях цифровизации 428

Р. А. Сахаров, К. К. Ким, С. В. Урушев

Анализ остаточного технического ресурса железнодорожных колес 437

CONTENTS

→ PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

D. P. Kononov, Yu. V. Gomonets

Railway rolling stock wheelset defects monitoring method when treatment on car wheel lathes 275

G. I. Nikiforova

Study of the car fleet operation of operating companies 282

O. D. Pokrovskaya

Implementation principles and requirements of transport and logistical services for railway transport 288

Tang Zhongsheng

Comparative analysis of regulatory documentation in the sphere of occupational safety and health when working with construction equipment in Russia and China 304

M. V. Tretiakov, V. A. Bryzgalo, E. V. Rumiantseva

Estuarial river zones as indicators of anthropogenic changes of geo-ecological condition of the estuarial areas in the Arctic region of the Russian Federation 311

→ HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

Yu. P. Boronenko, R. V. Rakhimov, R. Yu. Grigoryev, V. V. Popov

Analysis of methods for measuring the force effect of rolling stock on the track and the wheel control systems when the train is moving 324

A. A. Zaitsev, P. S. Troitskiy

Analysis of the railway infrastructure risk reduction upon introducing freight electric multiple units 345

L. G. Neradovskiy, L. L. Fedorova, K. O. Sokolov

Experimental study of the structure and petrophysics of frozen soils of the Vilyui Highway section in Yakutsk using the ground penetrating radar method 353

M. A. Sleptsov, I. P. Vasiliev, S. A. Starovoytov, I. Yu. Martynuk

Optimization of control system algorithms for 3E5K electric locomotives with axle-by-axle pulling power control 366

→ GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH

A. A. Vorobyev, V. I. Kulik, A. S. Nilov, D. A. Zhukov

Analysis of friction materials of brake pads in friction couples with brake discs made of SiC ceramic matrix composite for heavily loaded railway transport 378

S. G. Istomin, A. E. Perestenko

Assessment of the electric power loss components by the electric stock and electric power supply facilities 387

A. G. Kotenko, V. V. Solyanik	
Quality assessment of yard operation under the conditions of irregularity of train arrival at the marshaling yard	397
N. R. Muhammadiyev	
Results of a study of vibration in the rail joint area with rail fasteners of different elasticity	407
T. M. Nazirkhonov, A. Ya. Yakushev	
Computer model of a traction transformer of O'Z-ELR series alternating current electric locomotive	416
T. G. Sergeeva, G. I. Nikiforova	
Competitive recovery of transport and logistics companies in the era of digitization	428
R. A. Sakharov, K. K. Kim, S. V. Urushev	
Analysis of the residual technical resource of railway wheels	437



УДК 629.4.015:625.1.03

Методика контроля дефектов колесных пар железнодорожного подвижного состава при их обработке на колесотокарных станках

Д. П. Кононов, Ю. В. Гомонец

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

Для цитирования: Кононов Д. П., Гомонец Ю. В. Методика контроля дефектов колесных пар железнодорожного подвижного состава при их обработке на колесотокарных станках // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 275–281. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-275-281

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос о повышении ресурса железнодорожных колес за счет использования оптимальных режимов резания, определенных по результатам контроля дефектов колесных пар при их обработке на колесотокарных станках. **Методы:** Разработана методика для проведения анализа и синтеза данных, получаемых от системы контроля дефектов, которая позволяет на основании этих данных выбирать оптимальные режимы резания для ремонтируемой колесной пары. **Результаты:** Проанализированы сложности, появляющиеся при обточке поверхностей катания железнодорожных колес повышенной твердости и улучшенного качества, вызванные преобладанием на таких колесных парах локальных дефектов: ползунов и выщербин. С целью минимизации проблем, возникающих при обработке вышеуказанных колесных пар, предложено устройство, связывающее систему контроля дефектов с колесообрабатывающим станком. Описана архитектура программного обеспечения представленного устройства. Определены оптимальные режимы резания, такие как скорость резания, глубина резания и подача, дающие возможность обеспечить требуемую точность и устранить скачки силы резания (эквивалентные ударам по передней поверхности твердосплавной пластины), образующиеся в результате повышенных механических характеристик колес. **Практическая значимость:** Показана целесообразность внедрения в вагоноремонтные депо и заводы устройства преобразования дефектов железнодорожных колес, с помощью которого автоматически задаются оптимальные режимы резания, используемые при обточке ремонтируемых колесных пар, что позволит в значительной степени упростить работу станочника и процесс наладки станка, минимизировать поломку инструмента и повысить ресурс железнодорожных колес.

Ключевые слова: Колесная пара, восстановление поверхности катания, режимы резания, режущий инструмент, обточка колеса.

Введение

Производительность и себестоимость ремонтных работ, нацеленных на восстановление профиля вагонного колеса, во многом зависят от степени поврежденности его в эксплуатационный период различного рода дефектами.

Различные условия работы колесных пар обуславливают разные типы наиболее часто встречающихся дефектов, образующихся на поверхности катания в эксплуатации. При этом большой объем отцепок вагонов связан с наличием повреждений колес дефектами тормозного происхождения (ползунов и выщербин). Таким образом, значительный объем механической обработки при восстановлении профиля поверхности катания железнодорожных колес направлен на устранение термомеханических повреждений с поверхности катания путем обточки на колесотокарном станке [1–6].

Современное состояние проблемы

При обточке используются специальные двухсторонние твердосплавные пластины и державки. Сама обточка относится к операциям тяжелого точения и производится на специальных колесотокарных станках. Пластины допускают четыре перестановки в кассете резца, что в принципе позволяет значительно продлить их ресурс и более полно использовать возможности инструмента.

При обточке колесных пар с термомеханическими повреждениями на поверхности катания происходят значительные скачки силы резания, которые фактически эквивалентны ударам по передней поверхности твердосплавной пластины [7–11].

Для устранения этих недостатков и обеспечения требуемой точности приходится уменьшать подачу, увеличивать число рабочих ходов или вводить другие коррективы в технологический процесс, что усложняет работу станочника. Ошибки оператора в определении и при

внесении текущих изменений (подналадок) могут привести не только к снижению производительности (например, при очень малой величине подачи), но и к дополнительным нагрузкам на конструктивные элементы станка, поломке инструмента и т. п.

В настоящее время существуют программно-аппаратные комплексы, способные выявлять основные дефекты поверхности катания колеса и представлять их в виде электронного отчета [12]. К ним относится автоматизированный комплекс ультразвукового и вихретокового контроля колесных пар вагонов «Пеленг-автомат», применяемый во многих депо по ремонту грузовых и пассажирских вагонов [13].

Однако сейчас во многих вагоноремонтных депо не налажено взаимодействие подобных программно-аппаратных комплексов с колесообрабатывающими станками. В случае его отсутствия необходимо задание соответствующих режимов обработки для каждого из колес вручную на основании информации о дефектах [14].

Автоматическое назначение программы обработки колеса

Связь между системой контроля дефектов и колесообрабатывающим станком позволит назначать наиболее оптимальную программу обработки колеса автоматически. Подобный принцип взаимодействия проиллюстрирован на рисунке.

Для реализации предложенной системы взаимодействия требуется реализовать промежуточное звено между системой контроля дефектов и колесообрабатывающим станком. Задача данного промежуточного звена (система преобразования дефектов – СПД) заключается в:

- 1) получении информации о дефектах поверхности катания определенной колесной пары;
- 2) анализе данной информации;
- 3) составлении программы для колесообрабатывающего станка на основании выявленной информации;

4) передаче этой программы в память станка.

Получение информации о дефектах возможно путем подключения к базе данных (БД) системы контроля дефектов (СКД). В указанной БД данные хранятся в структурированном виде. Предлагается использование БД, состоящей из следующих таблиц:

1) список дефектов – таблица, предназначенная для хранения информации о возможных дефектах поверхности катания;

2) список проанализированных колес – таблица, хранящая информацию о таких колесах;

3) дефекты колес – таблица, предназначенная для хранения информации о дефектах, идентифицированных в проанализированных колесах;

4) режимы обработки – таблица, содержащая информацию о режимах обработки колеса.

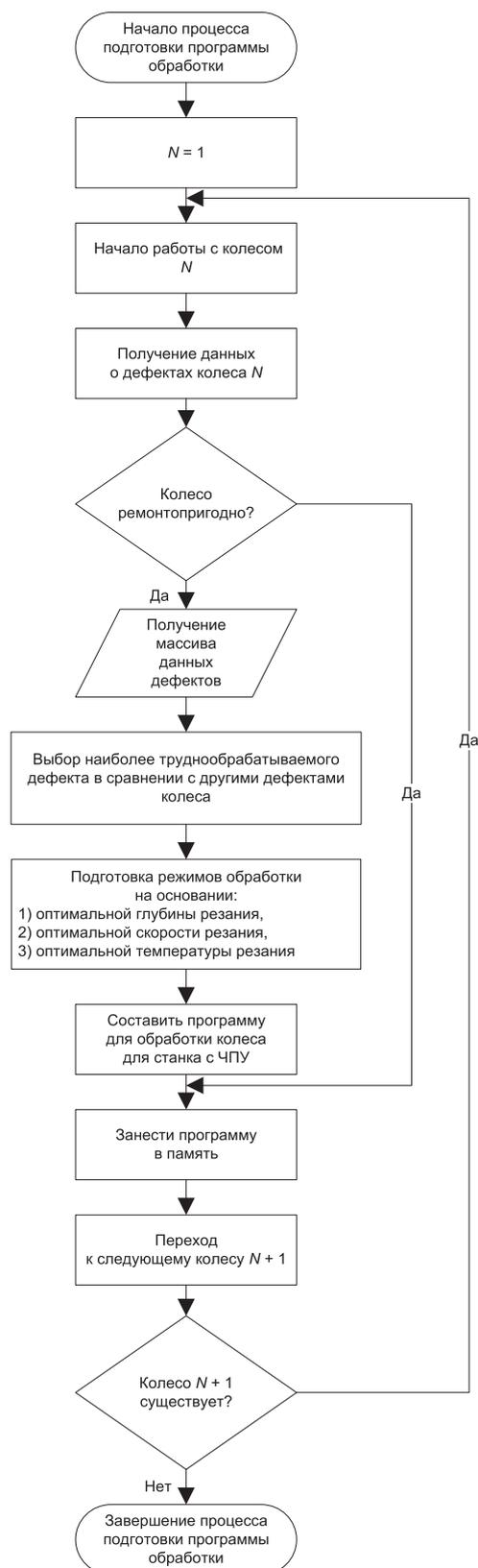
Для каждого из колес хранится информация о его дефектах, их характеристиках (в том числе положение дефекта, его геометрические параметры и др.). При этом дефекты привязаны к определенной точке колеса (в частности, или клеймо на ободе, или отметка краской). Дальнейшая обработка указанных данных возможна на основании существующей информации об обрабатываемости тех или иных дефектов, оптимальных режимах резания при их обработке.

Архитектура предложенной программной системы реализована в виде трех составных частей, взаимодействующих друг с другом:

– система получения информации о дефектах – взаимодействует со сторонней системой контроля дефектов и передает данные в ядро системы в стандартизированном протоколе;

– ядро системы – программный комплекс, производящий расчет оптимальных режимов резания на основании данных информации о дефектах, принимая во внимание оптимальную температуру в зоне контакта;

– система работы со станком – задает программу обработки для конкретного колесообрабатывающего станка.



Блок-схема взаимодействия программно-аппаратного комплекса контроля дефектов и колесообрабатывающего станка

Если мы имеем дело с ремонтпригодным колесом, то существует возможность назначения программы его обработки. В противном случае обработка не может быть произведена и следует перейти к следующему колесу.

Программа обработки назначается от точки привязки дефектов. Режимы резания при этом могут меняться в процессе точения исходя из наличия и вида дефекта. Например, при подходе режущего инструмента к ползуну, обладающему высокой твердостью, будут уменьшены скорость резания и подача.

После завершения процесса формирования программы возможен переход к процессу записи программы в память станка, а также к процессу формирования программы обработки следующего колеса. Передача указанных данных возможна в том числе по протоколу RS232.

Заключение

Задание режимов резания, позволяющих срезать только диктуемый дефектами поверхностных слоев, приводит в значительной степени к экономии людского ресурса и повышению ресурса железнодорожных колес [15–18].

Предложенная в настоящей статье система преобразования дефектов применима для различных систем контроля дефектов, так как ее архитектура дает возможность получить данные в разных форматах без изменения ядра системы, а также для разнообразных колесообрабатывающих станков.

Библиографический список

1. Воробьев А. А. Прогнозирование ресурса и совершенствование технологии ремонта колес железнодорожного подвижного состава : автореф. дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 05.22.07 / А. А. Воробьев. – СПб. : ПГУПС, 2018. – 32 с.
2. Кононов Д. П. Повышение надежности цельнокатаных колес : монография / Д. П. Кононов. – М. : Издат. дом «БИБЛИО-ГЛОБУС», 2018. – 250 с.
3. Иванов И. А. К вопросу о влиянии структуры поверхности слоя на эксплуатационные свойства железнодорожного колеса / И. А. Иванов, С. И. Губенко, А. А. Воробьев // Транспорт Урала. – Екатеринбург : УрГУПС, 2010. – № 2 (25). – С. 56–60.
4. Иванов И. А. О повышении ресурса цельнокатаных колес / И. А. Иванов, С. В. Урушев // Железнодорожный транспорт. – М. : МПС, 2000. – № 3. – С. 25.
5. Иванов И. А. К вопросу о перспективах использования бандажных колесных пар повышенной твердости / И. А. Иванов, В. С. Кушнер, А. А. Воробьев, Н. Ю. Шадрин, П. Г. Сорокин // Новые материалы и технологии в машиностроении. – Брянск : БГИТА, 2007. – № 7. – С. 39–43.
6. Кротов С. В. Контактно-усталостная долговечность рельсовой и колесной сталей / С. В. Кротов, Д. П. Кононов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2018. – Т. 15. – Вып. 1. – С. 54–61.
7. Богданов А. Ф. Восстановление профиля поверхности катания колесных пар без выкатки / А. Ф. Богданов, И. А. Иванов, П. М. Терехов // Бюл. результатов науч. исследований. – 2014. – Вып. 1 (10). – С. 58–68.
8. Иванов И. А. Оценка прочности режущего инструмента для обточки железнодорожных колес при температурно-силовом воздействии / И. А. Иванов, Д. А. Потахов, С. В. Урушев // Вестн. транспорта Поволжья. – Самара : СамГУПС, 2013. – № 4 (40). – С. 28–36.
9. Иванов И. А. Анализ напряженного состояния режущего инструмента при обточке колесных пар / И. А. Иванов, Д. А. Потахов, С. В. Урушев // Бюл. результатов науч. исследований. – 2014. – Вып. 1 (10). – С. 114–124.
10. Иванов И. А. Влияние твердости поверхности катания железнодорожных колес на параметры режима обработки / И. А. Иванов, А. А. Воробьев, В. С. Кушнер, А. С. Безнин // Новые материалы и технологии в машиностроении. – Брянск : БГИТА, 2004. – № 3. – С. 37–41.
11. Воробьев А. А. Влияние параметров восстановления на основные характеристики обработки поверхности катания колесных пар / А. А. Воробьев, И. А. Иванов, В. С. Кушнер // Тяжелое машиностроение. – М. : НПО ЦНИИ технологии машиностроения, 2010. – № 4. – С. 34–37.

12. Криворудченко В. Ф. Автоматизированные средства технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава : учеб.-метод. пособие к лабораторным и практическим занятиям / В. Ф. Криворудченко, Л. Г. Северинова, О. В. Кибальченко, А. В. Селезнев. – Ростов н/Д. : РГУПС, 2016. – 56 с.

13. Беломытцев В. Автоматизированный комплекс контроля колесных пар «Пеленг-автомат» / В. Беломытцев // Современные технологии автоматизации. – М. : СТА-Пресс, 2004. – № 3. – С. 42–46.

14. Воробьев А. А. Разработка рекомендаций по режимам обработки колесных пар повышенной твердости / А. А. Воробьев, И. А. Иванов, В. С. Кушнер, А. А. Крутько // Транспорт Урала. – Екатеринбург : УрГУПС, 2009. – № 2 (21). – С. 48–51.

15. Воробьев А. А. Испытания колесных сталей на износ и контактную усталость / А. А. Воробьев, Д. Е. Керенцев, И. В. Федоров // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 14. – Вып. 4. – С. 628–636.

16. Кононов Д. П. Повышение безопасности движения железнодорожного транспорта за счет увели-

чения усталостной прочности цельнокатаных колес / Д. П. Кононов, Н. Ю. Шадрин // Бюл. результатов науч. исследований. – 2014. – Вып. 1 (10). – С. 6–10.

17. Кротов С. В. Определение вертикальных динамических сил, действующих на колесо в контакте с рельсом / С. В. Кротов, Д. П. Кононов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Вып. 3 (44). – С. 70–76.

18. Губенко С. И. Влияние качества стали на усталостную прочность цельнокатаных колес / С. И. Губенко, И. А. Иванов, Д. П. Кононов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – М. : Изд-во «Тест-эл», 2018. – Т. 84. – № 3. – С. 52–60.

Дата поступления: 09.04.2020

Решение о публикации: 23.04.2020

Контактная информация:

КОНОНОВ Дмитрий Павлович – д-р техн. наук, доцент; d_kononov@mail.ru
ГОМОНЕЦ Юлия Витальевна – аспирант; homonets@mail.ru

Railway rolling stock wheelset defects monitoring method when treatment on car wheel lathes

D. P. Kononov, Yu. V. Gomonets

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

For citation: Kononov D. P., Gomonets Yu. V. Railway rolling stock wheelset defects monitoring method when treatment on car wheel lathes. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 275–281. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-275-281

Summary

Objective: To consider expanding the railway wheels operating life by using the optimal cutting conditions based the results of monitoring the defects of wheelsets during their treatment on car wheel lathes. **Methods:** A technique has been developed for analyzing and synthesizing data obtained from a defect monitoring system, which allows choosing the optimal cutting conditions for a wheelset being repaired on the basis of these data. **Results:** The difficulties that arise during turning of the railway wheels tread surfaces of increased hardness and improved quality, associated with the predominance of local defects – sliders and dents – on such wheelsets, have been analyzed. To minimize the problems arising

during the treatment of the above-mentioned wheelsets, a device is proposed that connects the defect monitoring system with a car wheel machining unit. The software architecture of the presented device has been described. The optimal cutting conditions, such as cutting speed, cutting depth and feed, have been determined, which make it possible to ensure the required accuracy and eliminate surges in cutting force (equivalent to impacts on the front surface of a carbide plate) resulting from increased mechanical performance of the wheels. **Practical importance:** The expediency of introducing a railway wheel defect converting device in car repair depots and factories has been shown. Such a device would help automatically set the optimal cutting modes used when turning the repaired wheelsets, which will greatly simplify the work of the machine operator and the machine setting up process, minimize tool breakage and expand the railway wheel operating life.

Keywords: Wheelset, tread surface restoration, cutting modes, cutting tools, wheel turning.

References

1. Vorob'yev A.A. *Prognozirovaniye resursa i sovershenstvovaniye tekhnologii remonta koles zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Forecasting the operating life and improving the technology of repairing railway rolling stock wheels]*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk, spetsial'nost': 05.22.07 [Abstract of the dis. of Dr. Sci. in Engineering, speciality: 05. 2207]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, 32 p. (In Russian)
2. Kononov D. P. *Povysheniye nadezhnosti tsel'nokatanykh koles [Improving the reliability of solid-rolled wheels]*. Monograph. Moscow, BIBLIO-GLOBUS Publishing House, 2018, 250 p. (In Russian)
3. Ivanov I.A., Gubenko S.I. & Vorob'yev A.A. K voprosu o vliyaniy struktury poverkhnosti sloya na eksploatacionnyye svoystva zheleznodorozhnogo koleasa [Discussing the influence of the layer surface structure on the operational properties of a railway wheel]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*. Yekaterinburg, UrGUPS [Ural State Transport University] Publ., 2010, no. 2, pp. 56–60. (In Russian)
4. Ivanov I.A. & Urushev S. V. O povyshenii resursa tsel'nokatanykh koles [Discussing the issue of expanding the solid-rolled wheel operating life]. *Zheleznodorozhnyy transport [The Railway Transport Magazine]*. Moscow, Ministry of Transport Publ., 2000, no. 3, p. 25. (In Russian)
5. Ivanov I.A., Kushner V. S., Vorob'yov A. A., Shadrina N. Yu. & Sorokin P. G. K voprosu o perspektivakh ispol'zovaniya bandazhnykh kolesnykh par povyshennoy tverdosti [Discussing the prospects for the use of increased hardness tyre wheelsets]. *Novyye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii [New Materials and Technologies in Mechanical Engineering magazine]*. Bryansk, BGITA [Bryansk State Engineering and Technological University] Publ., 2007, no. 7, pp. 39–43. (In Russian)
6. Krotov S. V. & Kononov D. P. Kontaktno-ustalostnaya dolgovechnost' rel'sovoy i kolesnoy staley [Contact fatigue life of rail and wheel steels]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, vol. 15, iss. 1, pp. 54–61. (In Russian)
7. Bogdanov A. F., Ivanov I.A. & Terekhov P.M. Vostanovleniye profilya poverkhnosti kataniya kolesnykh par bez vykatki [Restoring the wheelset tread surface profile without removing the wheels]. *Bulletin of scientific research results*, 2014, iss. 1 (10), pp. 58–68. (In Russian)
8. Ivanov I.A., Potakhov D.A. & Urushev S. V. Otsenka prochnosti rezhushchego instrumenta dlya obtochki zheleznodorozhnykh koles pri temperaturno-silovom vozdeystvii [Evaluation of the cutting tool strength for turning railway wheels under temperature and force action]. *Vestnik transporta Povolzh'ya [Transport Bulletin of the Volga region]*. Samara, SamGUPS [Samara State Transport University] Publ., 2013 no. 4(40), pp. 28–36. (In Russian)
9. Ivanov I.A., Potakhov D.A. & Urushev S. V. Analiz napryazhennogo sostoyaniya rezhushchego instrumenta pri obtochke kolesnykh par [Analysis of the cutting tool stress state when turning wheelsets]. *Bulletin of scientific research results*, 2014, iss. 1(10), pp. 114–124. (In Russian)
10. Ivanov I.A., Vorob'yev A.A., Kushner V. S. & Beznin A. S. Vliyaniye tverdosti poverkhnosti kataniya

zhelezodorozhnykh koles na parametry rezhima obrabotki [Influence of the railway wheel tread surface hardness on the treatment mode parameters]. *Novyye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii* [New Materials and Technologies in Mechanical Engineering magazine]. Bryansk, BGITA [Bryansk State Engineering and Technological University] Publ., 2004, no. 3, pp. 37–41. (In Russian)

11. Vorobyev A. A., Ivanov I. A. & Kushner V. S. Vliyaniye parametrov vosstanovleniya na osnovnyye kharakteristiki obrabotki poverkhnosti kataniya kolesnykh par [Influence of restoration parameters on the main characteristics of the wheelset tread surface treatment]. *Tyazheloyle mashinostroyeniye* [Heavy Mechanical Engineering]. Moscow, RPA CNIITMASH [Research and Production Association for Machine Building Technologies] Publ., 2010, no. 4, pp. 34–37. (In Russian)

12. Krivorudchenko V. F., Severinova L. G., Kibal'chenko O. V. & Seleznev A. V. *Avtomatizirovannyye sredstva tekhnicheskoy diagnostiki i nerazrushayushchego kontrolya detaley i uzlov podvizhnogo sostava*. Ucheb.-metod. posobiye k laboratornym i prakticheskim zanyatiyam [Automated means of technical diagnostics and non-destructive testing of rolling stock parts and units. Training and methodological laboratory manual]. Rostov-on-Don, RSTU [Rostov State Transport University] Publ., 2016, 56 p. (In Russian)

13. Belomyttsev V. Avtomatizirovannyy kompleks kontrolya kolesnykh par "Peleng-avtomat" [Peleng-Automat automated system for wheelset monitoring]. *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii* [Contemporary Automation Technologies]. Moscow, STA-Press, 2004, no. 3, pp. 42–46. (In Russian)

14. Vorobyev A. A., Ivanov I. A., Kushner V. S. & Krut'ko A. A. Razrabotka rekomendatsiy po rezhimam obrabotki kolesnykh par povyshennoy tverdosti [Development of recommendations for increased hardness wheelset treatment modes]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. Yekaterinburg, UrGUPS [Ural State Trans-

port University] Publ., 2009, no. 2(21), pp. 48–51. (In Russian)

15. Vorobyev A. A., Kerentsev D. E. & Fedorov I. V. Ispytaniya kolesnykh staley na iznos i kontaktnuyu ustalost' [Testing wheel steels for wear and contact fatigue]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, vol. 14, iss. 4, pp. 628–636. (In Russian)

16. Kononov D. P. & Shadrina N. Yu. Povysheniye bezopasnosti dvizheniya zhelezodorozhnogo transporta za schet uvelicheniya ustalostnoy prochnosti tsel'nokatanykh koles [Improving the railway transport safety by increasing the fatigue strength of solid-rolled wheels]. *Bulletin of scientific research results*, 2014, iss. 1(10), pp. 6–10. (In Russian)

17. Krotov S. V. & Kononov D. P. Opredeleniye v vertikal'nykh dinamicheskikh sil, deystvuyushchikh na koleso v kontakte s rel'som [Definition of vertical dynamic forces acting on the wheel in contact with the rail]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2015, iss. 3(44), pp. 70–76. (In Russian)

18. Gubenko S. I., Ivanov I. A. & Kononov D. P. Vliyaniye kachestva stali na ustalostnuyu prochnost' tsel'nokatanykh koles [Influence of the quality of steel on the fatigue strength of solid-rolled wheels]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Plant laboratory. Diagnostics of materials]. Moscow, Test-Zl Publishing House, 2018, vol. 84, no. 3, pp. 52–60. (In Russian)

Received: April 09, 2020

Accepted: April 23, 2020

Author's information:

Dmitry P. KONONOV – D. Sci. in Engineering, Associate Professor; d_kononov@mail.ru

Yulia V. GOMONETS – Postgraduate Student; homonets@mail.ru

УДК 625.033.34

Исследование эксплуатации вагонного парка операторских компаний

Г. И. Никифорова

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

Для цитирования: Никифорова Г. И. Исследование эксплуатации вагонного парка операторских компаний // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 282–287. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-282-287

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос о необходимости использования оборота вагона для оценки эффективности взаимодействия участников перевозочного процесса, представить оборот вагона как составляющую функции затрат, оценить участие показателя оборота вагона в логистических цепях доставки грузов с использованием железнодорожного транспорта, определить парк вагонов операторской компании с помощью оборота вагона. **Методы:** Применяются анализ эксплуатационных показателей, формализация затрат логистической цепи доставки груза, моделирование логистической цепи доставки груза с использованием оборота вагона. **Результаты:** Установлена необходимость применения показателя оборота вагона для оценки деятельности оператора, перевозчика и владельца инфраструктуры. Представлена функция минимизации затрат логистической цепи доставки грузов. Выявлена связь принципов логистики с базовыми эксплуатационными показателями при использовании железнодорожного транспорта. **Практическая значимость:** Показана важность оборота вагона для эффективного функционирования железнодорожного транспорта, представлена связь оборота вагона и оптимального количества вагонов в управлении операторской компании. Качественное взаимодействие всех участников перевозочного процесса позволит минимизировать затраты, повысить доходность их деятельности.

Ключевые слова: Эксплуатационные показатели, оборот вагона, парк вагонов, принципы логистики, функция затрат, оператор подвижного состава, логистическая цепь.

Передача вагонного парка операторским компаниям существенно отразилась на работе железнодорожного транспорта. К изменениям можно отнести значительную финансовую поддержку железнодорожной отрасли, повышение качества транспортных услуг, рост клиентоориентированности, однако при этом усложняется процесс перевозки, ухудшается ряд эксплуатационных показателей, теряется универсальность вагонного парка. Очевидно, что эффективное

управление вагонным парком должно входить в список приоритетных задач операторов железнодорожного подвижного состава. Но в тоже время нельзя нивелировать важность регулирования вагонного парка для ОАО «РЖД» как основного перевозчика и владельца инфраструктуры. Целесообразно выделить в качестве критериев оценки эксплуатационные показатели, которые использовались на протяжении многих лет на железнодорожном транспорте. Особое значение

приобретает оборот вагона, который связывает участников перевозочного процесса и показывает качественную составляющую деятельности каждого. Оборот вагона встраивается в логистическую цепь доставки груза на этапе продвижения грузопотока с участием железнодорожного транспорта. Оборот вагона определяет величину рабочего парка вагонов в управлении операторских компаний и может быть использован как инструмент регулирования парка вагонов. Потребный рабочий парк вагонов в управлении операторской компании можно определить среди прочих способов и через оборот вагона. Вагонный парк можно представить как запас, и тогда к нему будут применимы методы теории управления запасами.

Передача вагонного парка операторским компаниям существенно отразилась на работе железнодорожного транспорта. К положительным изменениям можно отнести значительную финансовую поддержку железнодорожной отрасли, повышение качества транспортных услуг, рост клиентоориентированности. Однако нельзя не отметить усложнение процесса перевозки, ухудшение ряда эксплуатационных показателей, потерю универсальности вагонного парка. Основная коммерческая цель любой операторской компании – это извлечение прибыли от предоставления вагонов под погрузку и перевозку груза. Очевидно, что эффективное управление вагонным парком должно входить в список приоритетных задач операторов железнодорожного подвижного состава. Но в то же время нельзя нивелировать важность регулирования вагонного парка для ОАО «РЖД» как основного перевозчика и владельца инфраструктуры. Качественное взаимодействие всех участников перевозочного процесса позволит минимизировать затраты, повысить доходность их деятельности. При этом своеобразным полем договоренности и критериями оценки должны выступать эксплуатационные показатели, которые использовались на протяжении многих лет на железнодорожном транспорте, например известные показатели [1]:

– средний оборот вагона, сут.;

- маршрутная скорость перевозки, км/сут.;
- средняя дальность доставки груза, км;
- время простоя под грузовыми операциями, сут.;
- коэффициент порожнего пробега вагонов, %;
- доля порожних групповых отправок и управительских маршрутов, %;
- среднее время нахождения вагона в нерабочем парке, сут.;
- доля отправок на основании постоянных договоров с грузоотправителем и на основании разовых заявок, %;
- доля сдвоенных операций при построении схем управления парком вагонов, %.

Рассмотрим такой важнейший показатель как оборот вагона.

Понятие оборота вагона подразумевает цикл операций с вагоном от начала (окончания) одной погрузки вагона до начала (окончания) следующей погрузки. Исследования в сфере грузовых перевозок на железнодорожном транспорте приводят к выводу [1, 2], что основными причинами, влияющими на увеличение оборота вагона, являются: избыток вагонов в управлении операторскими компаниями; проблемы во взаимодействии ОАО «РЖД», операторов и грузовладельцев; проблемы при передаче грузопотока на смежные виды транспорта, особенно на морской транспорт; ошибки в управлении вагонным парком со стороны операторов.

Известная трехчленная формула оборота вагона включает в себя три основных элемента – время нахождения вагона в поездах на участке, время нахождения вагона на технических станциях (с переработкой и без нее), время нахождения вагона под грузовыми операциями:

$$\Theta = \frac{1}{24} \left(\frac{l}{v_{\text{уч}}} + \frac{l}{L} t_{\text{тех}} + k_{\text{м}} t_{\text{гр}} \right),$$

в которой l – рейс вагона, $v_{\text{уч}}$ – участковая скорость, L – вагонное плечо, $t_{\text{тех}}$ – простой транзитных вагонов на технических станциях, $k_{\text{м}}$ – коэффициент местной работы, $t_{\text{гр}}$ – простой на одну грузовую операцию.

В этом показателе скрыт потенциал взаимодействия и участия перевозчика и владельца инфраструктуры ОАО «РЖД», операторской компании и грузовладельца. Очевидно, что минимизация оборота вагона выгодна всем участникам перевозочного процесса [3].

Можно встроить показатель оборота вагона и в логистическую цепь доставки груза «от двери до двери» на этапе продвижения грузопотока с участием железнодорожного транспорта (рисунки). Минимизация оборота вагона позволит сократить срок доставки груза, а реализация принципа «точно в срок» решается созданием терминалов [4] на стыках различных видов транспорта, при пересечении международных границ и т. д. [5, 6].

Если представить целевую функцию минимизации суммарных затрат всех элементов логистической цепи, состоящую из затрат на корреспонденцию вагонопотока от терминала станции отправления по железной дороге до терминала порта и затрат на обслуживание вагонопотока в системе «припортовая станция/морской порт», то в этом случае «считывается» оборот вагона:

$$F = \min \left[\sum_{i,n} c_{i,n} x_{i,n} + \sum_{n,j} c_n (x_{n,j} q_{n,j}) + \sum_{n,j} c_{n,j} x_{n,j} \right],$$

где $x_{i,n}, x_{n,j}$ – продвижение материальных потоков или отправка вагонов/контейнеров из пункта i (терминал станции отправления) в n (терминал морского порта отправления) и из n в j (терминал морского порта прибытия) соответственно; $c_{i,n}, c_{n,j}$ – затраты, отнесенные на один вагон/контейнер/единицу груза для заданных условий отправок; c_n – затраты на обслуживание потока вагонов/контейнеров в системе «припортовая железнодорожная станция/морской порт»; $q_{n,j}$ – масса судовой партии груза (количество контейнеров), доставляемая из порта отправления n на терминал порта назначения j .

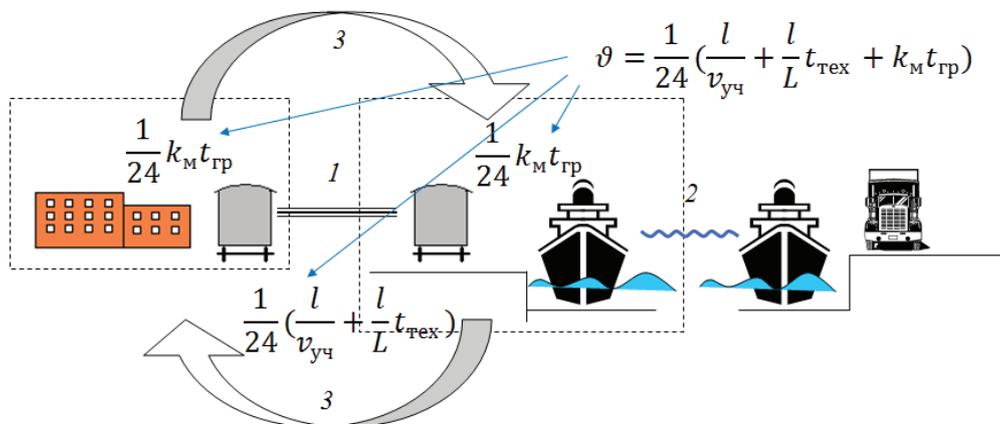
Потребный рабочий парк вагонов в управлении операторской компании можно определить среди прочих способов и через оборот вагона [7]:

$$R = \vartheta U,$$

здесь U – работа вагона.

Парк вагонов в управлении операторской компании также подлежит исследованию. Вагонный парк можно представить как запас, и тогда к нему будут применимы методы теории управления запасами. Например, метод Парето позволит классифицировать вагонный парк. Выделение синтетического критерия в частном случае может учитывать:

– прибыль от управления вагонами Π , тыс. руб.;



Оборот вагона в структуре логистической цепи:

1 – перевозка железнодорожным транспортом; 2 – перевозка морским транспортом;
3 – оборот вагона

- продолжительность оборота вагона Θ , ч;
- парк вагонов R , тыс. ваг.

Для каждого из этих показателей рассчитываются весовые критерии и определяется синтетический критерий классификации [8].

Общая экономическая ситуация в стране и мире оказывает значимое влияние на объемы перевозок железнодорожным транспортом. Использование транзитного потенциала железнодорожной сети России оправдывает прогнозирование потребности в вагонном парке R по некоторым индикаторам [9, 10]. Исследование эксплуатационной работы железнодорожного транспорта в современных условиях представляет огромный научный и экономический интерес.

Библиографический список

1. Бадах В.И. Управление эксплуатационной работой / В.И. Бадах, А.Г. Котенко, В.А. Кудрявцев, А.Т. Осьминин, В.М. Попков, Т.Г. Сергеева // Научные школы Петербургского государственного университета путей сообщения, 1809–2009 : к 200-летию со дня основания Университета / Авт.-сост. : Г.Н. Анисимов ; под ред. В.В. Сапожникова. – СПб. : ПГУПС, 2009. – С. 473–494.
2. Кизляк О.П. К вопросу выбора рациональных мероприятий по повышению пропускной способности железнодорожных участков / О.П. Кизляк, Т.Г. Сергеева // Проблемы безопасности на транспорте : материалы IX Междунар. науч.-практич. конференции / под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – СПб. : ИПТ РАН, 2019. – С. 134–136.
3. Никифорова Г.И. Исследование проблем управления вагонным парком операторской компании в современных условиях / Г.И. Никифорова // Б.П. Бе-
- щев. Выдающийся выпускник, великий железнодорожник. К 115-летию со дня рождения. – СПб. : ПГУПС, 2019. – С. 104–112.
4. Покровская О.Д. Логистика терминалов: перспективное направление логистики / О.Д. Покровская, Е.К. Коровяковский // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Вып. 3 (44). – С. 155–164.
5. Сергеева Т.Г. Проблемы развития транспортных коридоров в России / Т.Г. Сергеева // Актуальные проблемы управления перевозочным процессом : сб. науч. трудов / Т.Г. Сергеева. – СПб. : ПГУПС, 2006. – С. 146–150.
6. Никифорова Г.И. Взаимодействие железнодорожного и морского транспорта в логистической цепи доставки внешнеторгового грузопотока / Г.И. Никифорова // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2019. – Т. 16. – Вып. 3. – С. 339–346.
7. Грунтов П.С. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте : учебник для вузов / П.С. Грунтов, Ю.В. Дьяков, А.М. Макаровичкин и др. ; под ред. П.С. Грунтова. – М. : Транспорт, 1994. – 543 с.
8. Салимова Т.А. Управление качеством : учебник по специальности «Менеджмент организации» / Т.А. Салимова. – М. : Омега-Л., 2013. – 376 с.
9. Сергеева Т.Г. Совершенствование управления парком частных вагонов / Т.Г. Сергеева // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2019. – Т. 16. – Вып. 3. – С. 449–454.
10. Маликов О.Б. Деловая логистика / О.Б. Маликов. – СПб. : Политехника, 2003. – 223 с.

Дата поступления: 16.06.2020

Решение о публикации: 25.06.2020

Контактная информация:

НИКИФОРОВА Гузель Исламовна – канд. техн. наук, доцент; guzel.spb@mail.ru

Study of the car fleet operation of operating companies

G. I. Nikiforova

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

For citation: Nikiforova G. I. Study of the car fleet operation of operating companies. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 282–287. (In Russian)
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-282-287

Summary

Objective: To consider the need to use the car turnover to assess the efficiency of cooperation between the transportation process participants, present the car turnover as a component of the cost function, assess the involvement of the car turnover indicator in the railway cargo supply chains, determine the operating company's car fleet based on the car turnover. **Methods:** The study applies analysis of performance indicators, cost formalization of a cargo supply chain, modeling of a cargo supply chain based on the car turnover. **Results:** The necessity of using the car turnover indicator to assess the activities of the operator, carrier, and infrastructure owner has been established. The function of minimizing the costs of the cargo supply chain is presented. The relationship between the logistics approaches and the basic performance indicators when using railway transport has been revealed. **Practical importance:** The study shows the importance of car turnover for the efficient functioning of railway transport, the relationship between car turnover and the optimal number of cars managed by an operating company. Proper cooperation of all transportation process participants will minimize costs and increase the profitability of their activities.

Keywords: Performance indicators, car turnover, car fleet, logistics approaches, cost function, rolling stock operating company, supply chain.

References

1. Badakh V. I., Kotenko A. G., Kudryavtsev V. A., Os'minin A. T., Popkov V. M. & Sergeyeva T. G. Upravleniye ekspluatatsionnoy rabotoy [Operations management]. *Intellectual traditions of the Petersburg State Transport University, 1809–2009 honoring the 200th anniversary of the founding of the University*. Compiled by G. N. Anisimov. Edited by V. V. Sapozhnikov. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2009, pp. 473–494. (In Russian)
2. Kizlyak O. P. & Sergeyeva T. G. K voprosu vybora ratsional'nykh meropriyatiy po povysheniyu propusknoy sposobnosti zheleznodorozhnykh uchastkov [Discussing the selection of rational measures to increase the capacity of railway sections]. *Problemy bezopasnosti na transporte. Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Safety issues in transport. *Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference*]. Under general editorship of Yu. I. Kulazhenko. Saint Petersburg, IPT RAS [Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences] Publ., 2019, pp. 134–136. (In Russian)
3. Nikiforova G. I. Issledovaniye problem upravleniya vagonnym parkom operatorskoy kompanii v sovremennykh usloviyakh [Study of the problems of managing the operating company car fleet in the contemporary context]. *B. P. Beshchev. Vydayushchiysya vypuschnik, velikiy zheleznodorozhnik* [B. P. Beshchev. Outstanding graduate, great railroad worker. 115th Anniversary Celebration]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, pp. 104–112. (In Russian)
4. Pokrovskaya O. D. & Korovyakovskiy E. K. Logistika terminalov: perspektivnoye napravleniye logistiki [Terminal logistics: promising direction for logistics]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint

Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2015, iss. 3(44), pp. 155–164. (In Russian)

5. Sergeyeva T. G. Problemy razvitiya transportnykh koridorov v Rossii [Problems of transport corridors development in Russia]. *Aktual'nyye problemy upravleniya perevoznym protsessom. Sb. nauch. trudov* [Current problems of the transportation process management. Scientific proceedings]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2006, pp. 146–150. (In Russian)

6. Nikiforova G. I. Vzaimodeystviye zheleznodorozhnogo i morskogo transporta v logisticheskoy tsepi dostavki vneshnetorgovogo gruzopotoka [Interaction of rail and sea transport in the foreign cargo supply chain]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 339–346. (In Russian)

7. Gruntov P. S., D'yakov Yu. V., Makarochkin A. M. et al. *Upravleniye ekspluatatsionnoy rabotoy i kachestvom perevozok na zheleznodorozhnom transporte. Uchebnik dlya vuzov* [Management of operational work and

transportation quality in railway transport. Textbook for universities]. Edited by P. S. Gruntov. Moscow, Transport Publ., 1994, 543 p. (In Russian)

8. Salimova T. A. *Upravleniye kachestvom* [Quality management]. “Corporate Management” specialty textbook. Moscow, Omega–L. Publ., 2013, 376 p. (In Russian)

9. Sergeyeva T. G. Sovershenstvovaniye upravleniya parkom privatnykh vagonov [Private car fleet management refinement]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 449–454. (In Russian)

10. Malikov O. B. *Delovaya logistika* [Business logistics]. Saint Petersburg, Politehnika Publ., 2003, 223 p. (In Russian)

Received: June 16, 2020

Accepted: June 25, 2020

Author's information:

Guzel' I. NIKIFOROVA – PhD in Engineering, Associate Professor; guzel.spb@mail.ru

УДК 656.073:658.8

Принципы реализации комплексных транспортно-логистических услуг на железнодорожном транспорте и требования к ним

О. Д. Покровская

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

Для цитирования: Покровская О. Д. Принципы реализации комплексных транспортно-логистических услуг на железнодорожном транспорте и требования к ним // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 288–303.
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-288-303

Аннотация

Цель: Рассмотреть принципы реализации комплексных транспортно-логистических услуг на железнодорожном транспорте и требования к ним. **Методы:** Используются методы современной логистики, клиентоориентированности, синхромодальности, маркетинга. **Результаты:** Выделены ключевые перспективные направления научной работы, связанные с оказанием транспортно-логистических услуг. Описаны этапы реализации таких услуг. **Практическая значимость:** Приведенные необходимые условия и инструменты для реализации комплексных транспортно-логистических услуг на российских железных дорогах позволят ОАО «РЖД» вести работу по формированию системы стандартизации, паспортизации и оценки терминально-складской инфраструктуры.

Ключевые слова: Комплексные транспортно-логистические услуги, железнодорожный бизнес, цифровая платформа, цифровизация, клиентоориентированность.

Текущая ситуация

В условиях «оттока» высокодоходных грузов с железнодорожного транспорта на другие его виды отсутствуют: единая, общесетевая система терминологии, пакетов услуг, паспортов услуг и логистических объектов (ЛО); работающие инструменты продвижения и предоставления комплексных транспортно-логистических услуг (КТЛУ); клиентоориентированный формат подачи информации о КТЛУ для клиента; инструменты логистического аудита, система комплексной оценки и нормирования работы логистических цепей ОАО «РЖД» [1].

Эту ситуацию иллюстрирует рис. 1.

Сейчас предоставление комплексного сервиса ведется на сети опорных терминально-складских

объектов ОАО «РЖД», согласно Концепции создания сети терминально-логистических центров (ТЛЦ) на территории РФ до 2025 г., карта дислокации [2] которых по сети железных дорог РФ приведена на рис. 2.

Изолированная работа терминально-складской инфраструктуры не сможет привести к эффективному развитию интермодальных перевозок и привлечь инвестиции. Согласно Транспортной Стратегии РФ до 2030 г. [3], железнодорожному транспорту следует обеспечить прежде всего инфраструктурную подготовку имеющихся грузовых дворов и терминалов к оказанию комплексного транспортно-логистического обслуживания.

На рис. 3 показаны результаты анализа, проведенного для ОАО «РЖД» [4]. На нем видно,



Рис. 1. Текущая ситуация

что потенциальный рынок, который может быть охвачен комплексным обслуживанием, предоставляемым ОАО «РЖД», – это не менее 60 млн дополнительных тонн груза, привлекаемых на железнодорожный транспорт.

При этом, согласно рис. 3, от железнодорожного транспорта требуется не только решение сложной технологической задачи по консолидации поставок и «сборки» комплексной услуги из совокупности необходимых клиенту логистических операций, но и организация слаженной работы сети ТЛЦ (в соответствии с [2]). Последнее напрямую связано с решением задачи соответствующего инфраструктурного обеспечения КТЛУ, т. е. с развитием собственной терминальной сети (ТС) ОАО «РЖД», размещенной на опорных станциях сети, в непосредственной близости от транспортных коридоров и крупных транспортных узлов страны.

По данным проведенных нами исследований можно утверждать, что, к сожалению, не менее 50% услуг реализуются ОАО «РЖД» только в определенном сегменте (рис. 4).

Так, ОАО «РЖД», традиционно уделяя внимание к собственному перевозочному процессу, осуществляет тотальный контроль исключи-

тельно за перевозкой груза по схеме «от станции до станции». При этом искусственно исключаются ЛО, на которых выполняется 90% логистических операций по грузопереработке (операций добавленной стоимости). В условиях, указанных в Транспортной Стратегии РФ на период до 2030 г., компания «РЖД» трансформируется из чисто перевозочной в транспортно-логистическую, поэтому необходимо уделить максимум внимания КТЛУ, который может и должен оказывать железнодорожный перевозчик, обладающий исключительными инфраструктурными и провозными преимуществами перед другими видами транспорта. Рассмотрим ряд решений, направленных на научно-методическое обеспечение КТЛУ в свете трансформации ОАО «РЖД» в логистического провайдера-агрегатора комплексного «бесшовного» сервиса [5–7].

Предлагаемые решения

Терминология КТЛУ

Понятие «Комплексная транспортно-логистическая услуга» в виде «формулы» может быть представлено следующим образом:

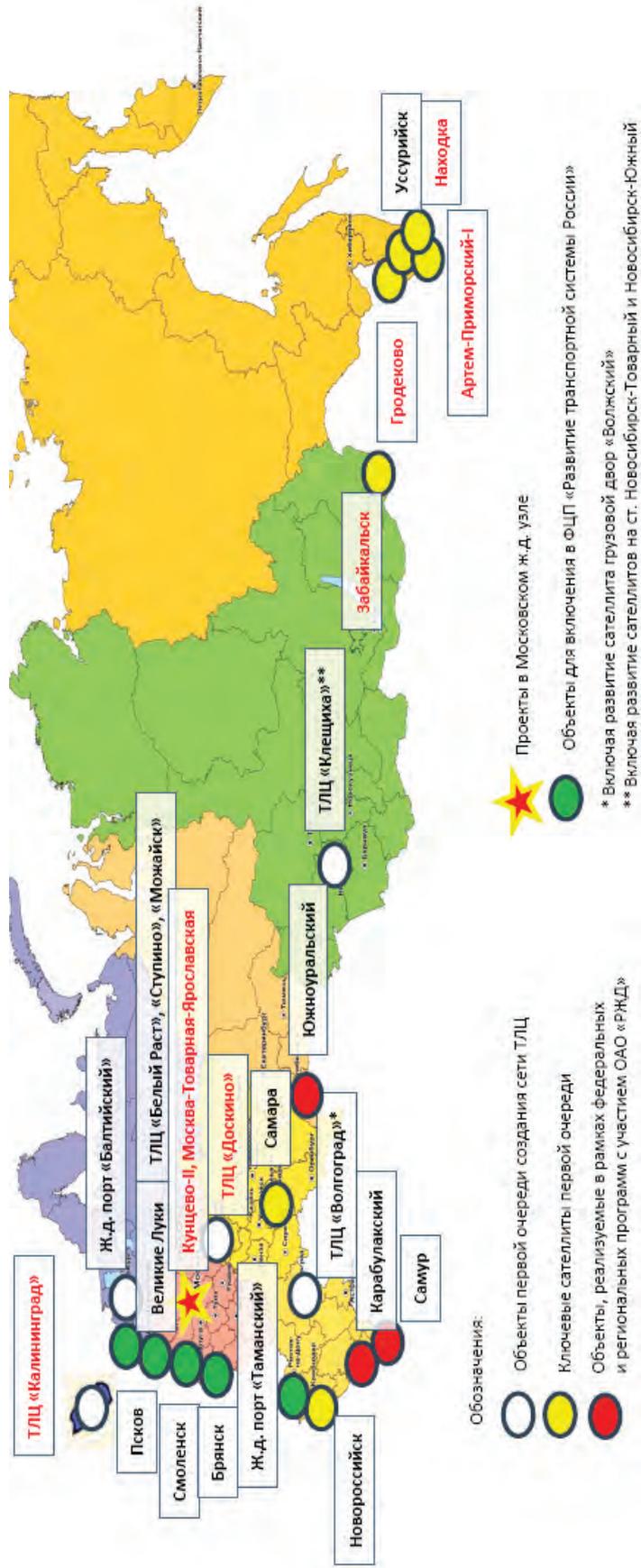


Рис. 2. География оказания КТЛУ

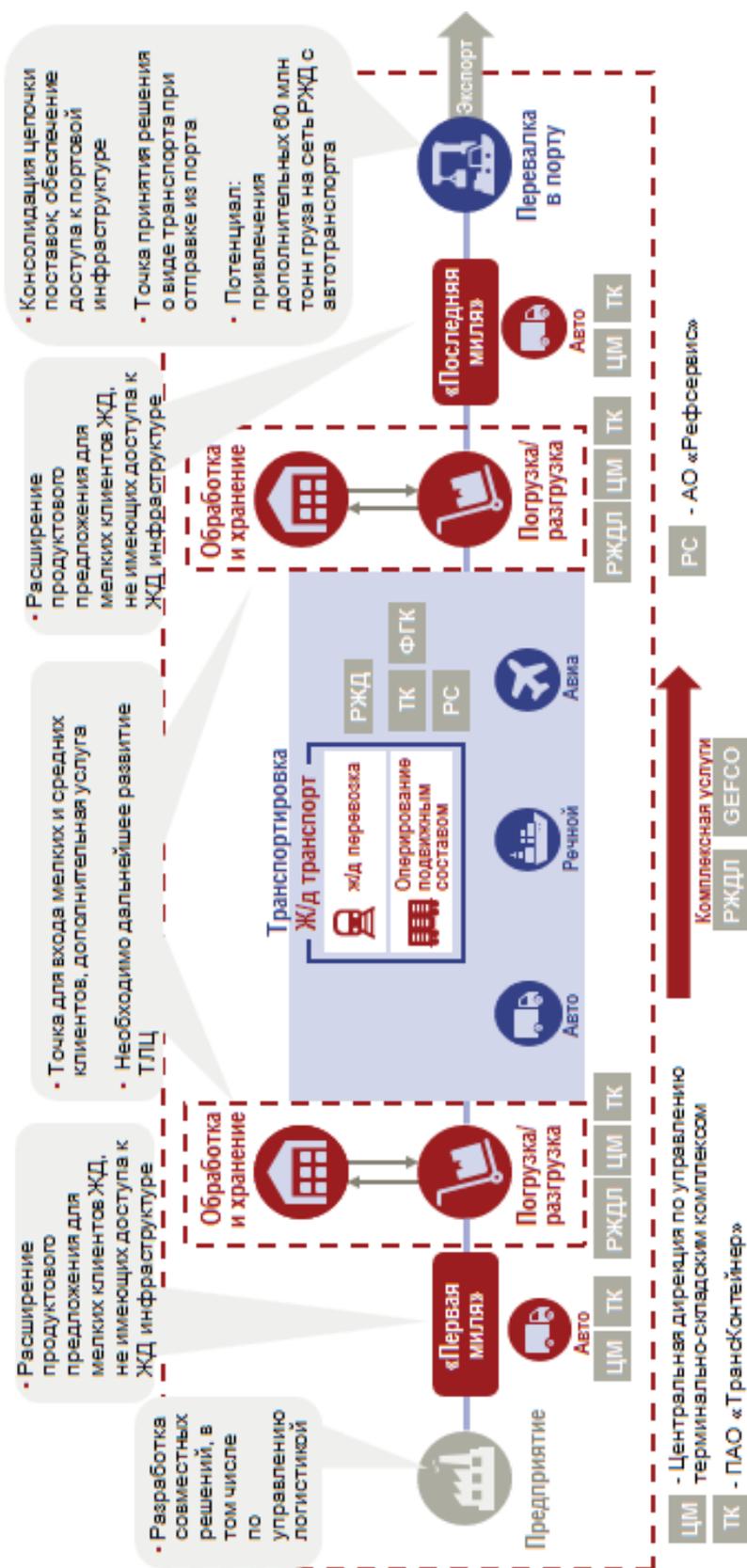


Рис. 3. Результаты анализа А. Т. Kearney

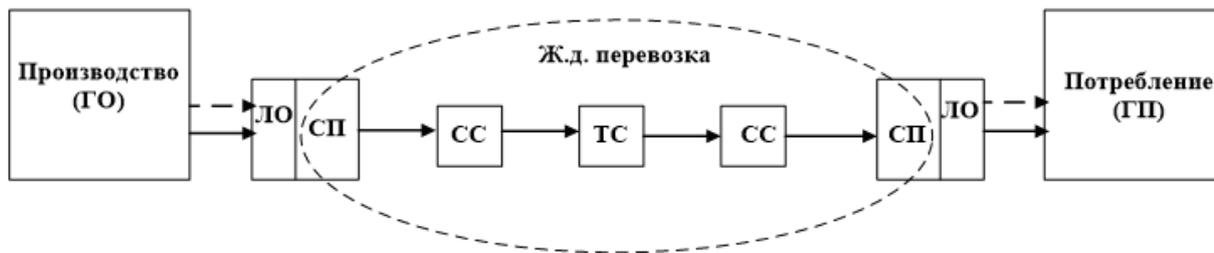


Рис. 4. Существующая система доставки груза и область покрытия комплексным сервисом: от сферы производства – грузоотправителей (ГО) к сфере потребления – грузополучателям (ГП) через станции примыкания (СП), сортировочные станции (СС) и технические станции (ТС), без рассмотрения работы объектов терминально-складской инфраструктуры, тяготеющих к ж.-д. (ЛО) и доставки груза до них автотранспортом (пунктирная линия) или ж.-д. транспортом (сплошная линия)

КТЛУ = (перевозка основная + околотранспортные услуги + расширенный сервис добавленной стоимости) · $K_{\text{компл}}$ · $K_{\text{совм.опер}}$ =>
=> 8 правил логистики.

Согласно такой формуле, КТЛУ имеет трехчленный состав: 1) перевозка – основная услуга; 2) «околотранспортные» услуги (дополнительные услуги, сопутствующие собственно перевозке, например погрузка и выгрузка, хранение, маркировка, оформление документации и др.); 3) расширенный сервис добавленной стоимости (так называемые «необязательные» услуги, которые по желанию клиента могут быть оказаны при перевозке, в частности услуга «первая миля/последняя миля» по подвозу–вывозу груза на/со станции, транспортное экспедирование, трекинг нахождения и состояния подвижного состава, таможенные операции и т. д.).

При этом, как указано в формуле, следует учитывать комплексность предоставляемых услуг (коэффициент комплексности обслуживания $K_{\text{компл}}$), а также коэффициент совмещения логистических операций ($K_{\text{совм.опер}}$), «собираемых» логистическим агрегатором в «пакет» КТЛУ: вышеречисленный сервис должен быть направлен на целевую реализацию всей совокупности логистических принципов в интересах конкретного клиента.

В соответствии с таким составом КТЛУ предлагается следующее определение КТЛУ:

КТЛУ, комплексная транспортно-логистическая услуга – это уникальная для конкретного

клиента совокупность логистических операций по организации доставки груза, связанных единым технологическим процессом и цифровым полем, «покрывающая» сквозным бесшовным обслуживанием необходимую длину и глубину логистической цепи в формате «одного окна», «одного договора» и «со скоростью клика».

Поставщиком КТЛУ предлагается считать генерального организатора/логистического агрегатора всей системы доставки, который способен «от одного лица» (вне зависимости от географии, сложности и типа услуги) предоставить клиенту персонализированные КТЛУ в требуемом формате/пакете, с адаптивным ситуационным управлением и сопровождением, по сквозному тарифу и одному договору.

Такие определения, на наш взгляд, отражают как качественные характеристики такого многогранного понятия как КТЛУ, так и особенности оказания этого вида сервиса.

Требования к КТЛУ

Требования к КТЛУ может сформулировать только сам клиент.

По характеру требования к КТЛУ можно классифицировать так: методические, цифровые, маркетинговые, правовые, технологические.

Со своей стороны, ОАО «РЖД» следует обеспечить:

– информирование и консультирование клиентов;

- персональное обслуживание;
- полное покрытие вопросов сложных систем доставки;
- оригинальные коммерческие предложения нового формата;
- «общий язык», «одно окно» и «единое поле» работы с клиентом.

Иными словами, от ОАО «РЖД» требуется сформировать для реализации КТЛУ адекватное рыночным условиям организационно-правовое, методическое, инфраструктурное, маркетинговое и цифровое обеспечение.

Обеспечение реализации КТЛУ

Для успешной «сборки» и продажи КТЛУ необходима реализация принципов логистики, открытости информации и клиентоориентированности, в частности:

Принципы реализации КТЛУ: клиентоориентированность (персонифицированность услуг), гибкая дифференцированная комплексность по уникальным пакетам сервиса для каждого клиента, полная доступность каждого клиента к любому пакету сервиса, цифровизация взаимодействия с клиентами, прозрачность блокчейн-цепей поставок и ценообразования в них, «бесшовность» и синхромодальность транспортного процесса [8, 9].

Необходимы *комплексный подход* к формированию методического, организационно-правового, цифрового, маркетингового и технологического обеспечения КТЛУ [10] и *совместная выработка* научно-практических решений.

Для реализации КТЛУ потребуется *последовательно создать условия для:* цифровизации («бизнес со скоростью клика», 4–5 PL) [11], оптимизации цепей поставок (максимальная интеграция, исключение посредников) [12], аутсорсинга («уберизация») [13] и провайдинга (сквозное бесшовное обслуживание цепи доставки любой сложности) [14].

Особо следует отметить, что адекватные требования к КТЛУ может сформулировать *только* клиент. Для уточнения требований рынка к КТЛУ и формулирования на основе их разум-

ных механизмов и эффективных инструментов для реализации КТЛУ потребуется выполнить крупномасштабное общесетевое маркетинговое исследование востребованности пакетов КТЛУ, наличия платежеспособного спроса на разные пакеты КТЛУ у разных целевых аудиторий, портрета типичного пользователя/заказчика КТЛУ, а также технико-технологических и качественных требований клиента к инфраструктурным объектам, предоставляющим КТЛУ на железнодорожном транспорте.

В данном исследовании сформулирован научно-теоретический аппарат, полезный для стратегического планирования деятельности по разработке новых транспортно-логистических продуктов и направлений совершенствования технологии и процедур оказания КТЛУ, их агрегирования в сложных цепях поставок на железнодорожном транспорте и управления ими.

Инструменты реализации КТЛУ

К ним относятся:

а) методические:

- логистическое нормирование работы транспорта по оказанию КТЛУ;
- методическое и программное обеспечение предоставления КТЛУ;
- разработка логистического руководства по реализации КТЛУ на железнодорожном транспорте;
- разработка и утверждение программного документа по развитию КТЛУ в Холдинге РЖД [15];

б) организационно-регулирующие и правовые:

- стандартизация ассортимента КТЛУ;
- закрепление требований к технологии предоставления и к качеству КТЛУ, а также унификация терминологии в сфере КТЛУ и юридического статуса поставщика КТЛУ/агрегатора/провайдера;
- общесетевое утверждение практических способов выполнения КТЛУ и оценки эффективности реализации КТЛУ;

– совершенствование транспортного законодательства и тарифной политики в сфере оказания КТЛУ;

– классификация и каталогизация КТЛУ по «линейкам» (целевым клиентским группам, пакетам услуг, тарифам);

– параметрические ряды, классификация и паспортизация железнодорожных ЛО и предоставляемых ими КТЛУ [16].

Условия реализации единого организационно-правового режима:

– определить и разграничить: статус перевозчика, ответственность сторон перевозочного процесса, полный перечень услуг с указанием стоимости и продолжительности выполнения каждой составной операции;

– создать систему логистического нормирования каждой операции с учетом продолжительности, трудозатрат, материальных затрат и оценки ее эффективного выполнения;

– каталогизация и контроллинг услуг со стандартизацией их качества;

– сквозная бесшовная услуга в «одно лицо», «одно окно», «один договор», «один перевозочный документ», «один ответственный» – генеральный поставщик (агрегатор, провайдер);

– повышение добавленной стоимости товара и ценности услуги на каждом участке и элементе ТС и цепи доставки;

– многофункциональность;

– сбалансированность функций элементов ТС;

– гибкость составления маршрута;

– устойчивость и адаптивность ТС при колебаниях спроса, объемов погрузки, объемов перевозок, изменениях условий поставок и транспортных тарифов и пр.;

– повышение клиентоориентированности и лояльности бренда ОАО «РЖД»;

– повышение информативности и доступности сервиса;

– цифровизация взаимодействия с клиентом, «умный терминал», «умный вагон», «цифровая услуга»;

– пакетные решения «под клиента» (дифференцированный подход и предоставление уникальной услуги для каждого клиента) [17];

в) информационные/цифровые:

– цифровизация взаимодействия участников цепи доставки «бизнес со скоростью клика»;

– формирование единой базы данных о ЛО с интерактивным контролем их текущего состояния, загрузки и ассортимента КТЛУ;

– обеспечение высокой доступности и маркетинговой эффективности информирования клиентов о новых продуктах Холдинга «РЖД» [18];

г) технологические:

– обеспечение станций современным оборудованием, предназначенным для перегрузочных работ, обновление оборудования;

– повышение пропускной способности линий, оптимизация отцепочного ремонта вагонов, сокращение срока доставки;

– быстровозводимые склады, мобильные бригады по грузопереработке;

– индивидуальный менеджер-консультант;

– ускоренная доставка грузов без переработки на сортировочных станциях, подача вагонов по графику, «вагон + перевозка» по расписанию, цепочка «клиент–клиент», приближение ЛО к клиенту;

– формирование опорной транспортной сети без разрывов и узких мест;

– ликвидация диспропорций в развитии инфраструктуры;

– реализация приоритетных инфраструктурных проектов;

– синхромодальность и мультимодальность перевозочного процесса;

– перевозки мультимодальные по терминальной схеме, осуществляет контроль и несет ответственность за нее один генеральный оператор;

– ускорение и непрерывность движения материальных потоков;

– обеспечение логистического сервиса на уровне международных стандартов;

– наличие: 1) единого оператора мультимодальных перевозок; 2) единого договора; 3) единого сквозного тарифа на всей транспортной цепи; 4) интермодального транспортного модуля для последовательной перевозки несколькими видами транспорта в одной и той же грузовой единице или транспортном средстве без

перегрузки самого груза при передаче на другой вид транспорта (бесперегрузочное сообщение); 5) в крупных транспортных узлах, тяготеющих к транспортным коридорам, мультимодальным транспортно-логистическим центрам как пункта стыка всех видов транспорта и участников процесса доставки; 6) единообразный коммерческо-правовой режим; 7) использование систем электронного обмена данными, обеспечивающих слежение за передвижением груза, передачу информации и связь; 8) единство всех звеньев транспортной цепи в организационно-технологическом аспекте (единый технологический процесс, контактный график); 9) единая форма взаимодействия всех звеньев транспортной цепи;

– доставка клиент–клиент, а не станция–станция;

– дифференциация тарифов по категориям качества;

– внимание не назначению вагона, а груза в вагоне или в другом транспортном средстве;

– разработка и внедрение совмещенной технологии, необходимой нормативной базы и мер, обеспечивающих своевременную оперативную информацию о фактических объемах погрузки грузов на перевалку, с распределением ее по конкретным транспортным узлам, а также по обеспечению пунктов погрузки и пунктов перевалки порожним подвижным составом [19].

Условия реализации синхромодального транспортного сервиса:

– прозрачная информационная система для синхронизации способов заказа/бронирования перевозки различных видов транспорта онлайн и оперативного управления перевозками;

– наличие у оператора синхромодальной перевозки полномочий по оперативному управлению товарным потоком в цепи поставок;

– наличие развитой мультимодальной инфраструктуры (сети терминалов на направлении поставок продукции, резерва складских площадей и т. д.);

– готовность всех участников процесса доставки к гибкому оперативному онлайн-управлению;

– система тарифов со справедливым распределением издержек и доходов между участниками процесса перевозки;

д) маркетинговые:

– стратегия ценности – это создание у клиента четкого понимания «Почему я должен работать с Вами?». За ценностью появляется лояльность, а за ценой скрывается только разовое использование;

– сетевой эффект/эффект масштаба – расширение клиентской базы при привлечении большого количества новых участников в систему доставки;

– согласованность, синхронность работы многих участников как «фабрики сервисных возможностей» и синергетический эффект;

– открытость данных для смарт-контрактов, прозрачных сделок, цен для удобства выбора клиента;

– ПРОКСИМА (ПРОгрессивность, Комплексность, Согласованность, Интеллектуальность, Мультипликативность, Адаптивность);

– «продвижение» КТЛУ и информирование целевых групп о КТЛУ в новом клиентоориентированном формате;

– повышение гибкости и дифференцированности системы тарифов, предоставление «пакетных» услуг и скидок на перевозку грузов, персонализация сервиса («built to suit»);

– переход на один язык с клиентом, создание единого информационного поля: системы стандартизации, нормирования, продажи услуг, паспортизация и каталогизация услуг, предоставление инновационных продуктовых линеек, раскрытие информации о параметрах и ценообразовании, оценки и контроля текущего состояния терминальной сети [20];

– предоставление персонализированного комплексного сервиса.

Пути и этапы реализации КТЛУ как CRM-решения

Рассмотрим возможные этапы реализации КТЛУ железнодорожным перевозчиком как логистическим провайдером-агрегатором. Как

известно, система управления взаимоотношениями с клиентами (CRM-система – Customer Relationship Management) – это прикладное программное обеспечение для автоматизации взаимодействия с клиентами, повышения уровня продаж, оптимизации маркетинга и улучшения обслуживания клиентов путем улучшения бизнес-процессов и последующего анализа результатов. КТЛУ является ключевым инструментом и драйвером успешного функционирования CRM-системы, адаптированной интересам клиента.

На рис. 5 приведен вариант поэтапного внедрения КТЛУ в основную операционную деятельность ОАО «РЖД», согласно возможным конфигурациям CRM-системы, выстраиваемой компанией.

На рис. 5 слева показан примерный состав этапов предоставления ОАО «РЖД» КТЛУ, начиная с первого – цифровизации распределения мощностей по обслуживанию клиентов, ведения каталогов услуг и продаж. Вторым этапом предполагается при достаточном уровне цифровизации переход к оптимизации предоставления КТЛУ, в частности повышение качества цепей поставок, исключение лишних звеньев, обеспечение прозрачности сделок в информационной среде. Третьим – проведение «уберизации» (передачи на аутсорсинг) терминально-складских мощностей, на базе которых осуществляются КТЛУ. И, наконец, на четвертом – собственно

провайдинг уровня 4–5PL, управление цепями поставок и агрегирование КТЛУ от одного лица (ОАО «РЖД»).

Учитывая вариант этапного внедрения КТЛУ в деятельность компании «РЖД», рассмотрим прикладной инструментарий, необходимый для реализации перечисленных требований к КТЛУ. Так, для реализации перечисленных выше требований отраслевая транспортная наука способна в синергии с ОАО «РЖД» предложить ряд инструментов, которые могут быть использованы при реализации КТЛУ. На рис. 6 показан примерный состав того инструментария оказания КТЛУ, который должен быть поддержан соответствующим теоретическим (научным) и практическим (административным) обеспечением.

В таблице приведены ожидаемые результаты, которые могут быть достигнуты при реализации предложений по видам обеспечения КТЛУ, предоставляемым отраслевой транспортной наукой.

Направления совершенствования КТЛУ в ОАО «РЖД»

Приоритетные задачи на 2–3-летний период: выработка конкретных инновационных механизмов реализации КТЛУ, их «линеек» и паспортов, клиентоориентированного формата информирования клиентов, бизнес-модели по предоставлению КТЛУ с цифровым обе-

Предложения и их ожидаемая результативность при организации КТЛУ

Предложение		Ожидаемый результат	Срок реализации
Организационно-правовое	Стандарт, класс, паспорт, руководство	Общий язык с клиентом	1 год
Цифровое	Проект цифровой платформы «Терминальная сеть»	Единое цифровое поле с клиентом	1 год
Методическое	Логистическое нормирование и логистический аудит	Оптимизация и реализация стратегических задач	1 год
Маркетинговое	Идентификация и маркировка	Расширение клиентской базы, повышение доходности, рост объемов сбыта услуг	1 год

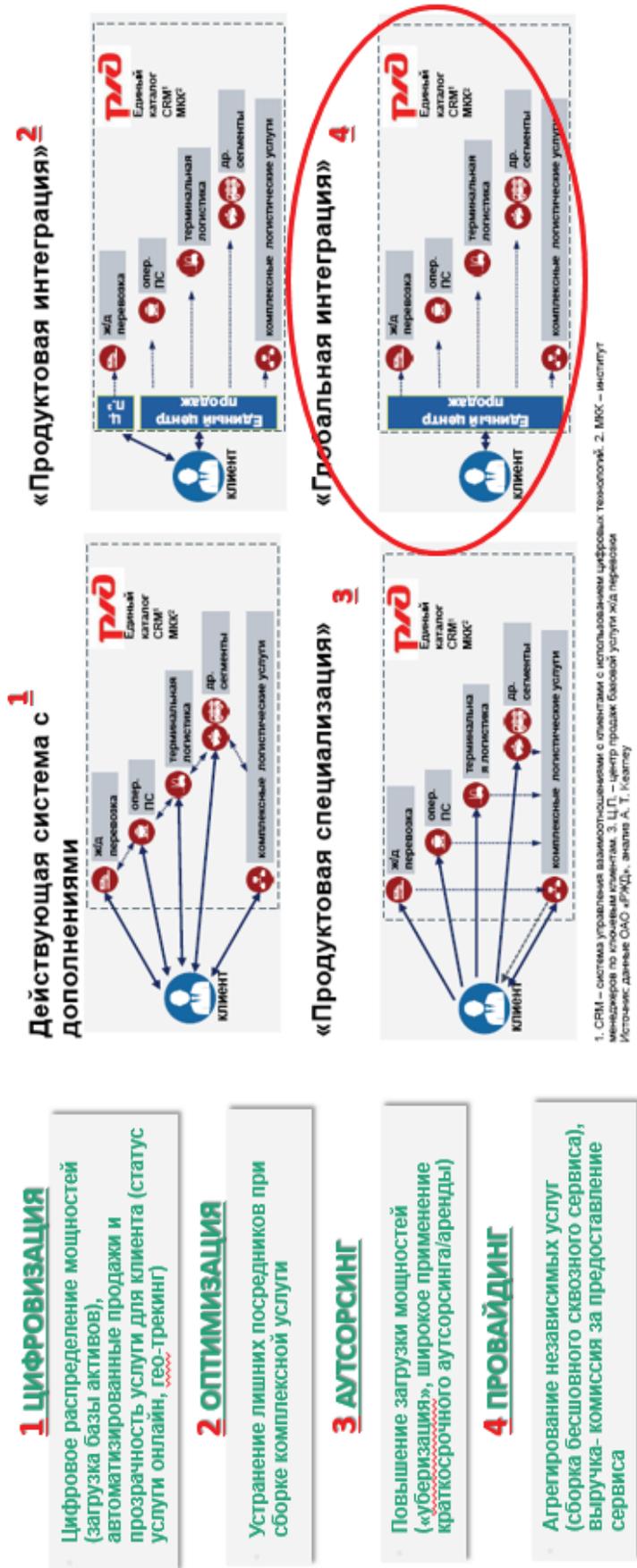


Рис. 5. Вариант поэтапного внедрения КТЛУ как CRM-решения в деятельность ОАО «РЖД»



Рис. 6. Совокупность усилий отраслевой науки и железнодорожного транспорта в реализации КТЛУ

спечением принятия решений по проектированию, нормированию и оценке терминально-складской инфраструктуры и КТЛУ.

Перспективные направления прикладных научных исследований в сфере методов, средств и механизмов оказания КТЛУ:

1) разработка логистического руководства по стандартизации, идентификации, классификации, маркировке и нормированию деятельности терминально-складской инфраструктуры железнодорожного транспорта, включая вопросы экологической составляющей [21, 22] и экономического обоснования технологических решений [23–28];

2) комплексная оценка и технико-экономическое обоснование вариантов развития терминальной сети Холдинга «РЖД»;

3) унификация и цифровизация оценки работы ТС.

Для повышения уровня доходности транспортно-логистического бизнес-блока компании ОАО «РЖД» и расширения клиентской базы, включая привлечение высокодоходных грузов на сеть, необходимо удовлетворение всем требованиям клиентоориентированности и единого языка с клиентом. В свою очередь, это обеспечит успешную цифровую трансформацию и реализацию логистических услуг уровня 4PL

(в том числе их аутсорсинг, агрегацию, продвижение и продажу).

Перечислим некоторые научно-практические направления, по которым в свете указанной проблематики работают ученые Петербургского государственного университета путей сообщения:

1-е направление: разработка логистического руководства по стандартизации, идентификации, классификации, маркировке и нормированию деятельности терминально-складской инфраструктуры железнодорожного транспорта.

В рамках направления подготовлен проект логистического руководства по идентификации, маркировке и нормированию деятельности терминально-складской инфраструктуры железнодорожного транспорта;

2-е направление: комплексная оценка и технико-экономическое обоснование вариантов развития терминальной сети Холдинга «РЖД».

В рамках данного направления проводятся маркетинговые исследования востребованности услуг, разработка новых транспортных продуктов, анализ клиентоориентированности, проектирование актуального состава опорной терминальной сети, разработка пакетов комплексных транспортных услуг, проведение логистического аудита и оценки работы термина-

лов, разработка проектов терминалов с применением авторского программного обеспечения «под заказчика»;

3-е направление: унификация и цифровизация оценки работы терминальной сети.

В рамках этого направления ведется разработка систем стандартизации, классификации, нормирования и оценки работы объектов терминально-складской инфраструктуры, версии цифровой платформы «Терминальная сеть», методического обеспечения (инструкции, проект стандарта и классификатора по КТЛУ).

Приведем некоторые *рекомендации*.

ОАО «РЖД» следует вести работы по формированию адекватной системы стандартизации, классификации, паспортизации и оценки как КТЛУ, так и объектов терминально-складской инфраструктуры – первичных поставщиков КТЛУ, в частности по:

– унификации и каталогизации комплексных транспортных услуг по пакетам;

– паспортизации комплексных транспортных услуг и грузовых терминалов, на которых выполняются эти услуги, установлению требований к ним (по группам: маркетинговых, технико-технологических, экономических, организационно-правовых и др.);

– классификации и стандартизации типов грузовых терминалов, осуществляющих комплексные транспортные услуги;

– разработке государственного стандарта в сфере терминально-логистической деятельности железнодорожного транспорта;

– активизации рекламной кампании и разработке инновационных инструментов рекламы комплексных транспортных услуг;

– нормированию работы терминально-складской инфраструктуры железных дорог;

– разработке эффективных систем комплексной оценки работы терминалов, расположенных на сети железных дорог;

– цифровизации взаимодействия с клиентами-заказчиками комплексных транспортных услуг на единой платформе;

– разработке программы реализации логистического провайдинга в ОАО «РЖД» и правовому

закреплению статуса ОАО «РЖД» как логистического агрегатора-провайдера услуг 4PL.

Библиографический список

1. Экономика России : прошлое, настоящее, будущее : колл. монография / под общ. ред. Н. А. Адамова. – М. : Ин-т исследования товародвижения и конъюнктуры оптового рынка, 2014. – 248 с.

2. Концепция создания сети ТЛЦ на территории РФ до 2025 года. – URL : https://test-cargo.rzd.ru/dbmm/download?vp=5&load=y&col_id=121&id=74208 (дата обращения : 15.02.2020 г.).

3. Транспортная Стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82617/ (дата обращения : 15.02.2020 г.).

4. Цифровая Россия : новая реальность : отчет McKinsey. – 2017. – 133 с. – URL : <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/russia/our%20insights/digital%20russia/digital-russia-report.ashx> (дата обращения : 15.02.2020 г.).

5. Loffredo A. Digital work in the transport sector: In search of the employer / A. Loffredo, M. Tufo. – Work Organisation, Labour and Globalisation. – 2018. – N 12 (2). – P. 23–37. – DOI :10.13169/workorglaboglob.12.2.0023

6. Kache F. Challenges and opportunities of digital information at the intersection of Big Data Analytics and supply chain management / F. Kache, S. Seuring // International journal of operations & production management. – 2017. – Vol. 37. – Iss. 1. – P. 10–36. – DOI : 10.1108/IJOPM-02-2015-0078

7. Цифровизация : тренды. – URL : https://transweek.ru/18/Digitization_of_container_shipments.pdf (дата обращения : 15.02.2020 г.).

8. Гришкова Д. Ю. Оптимизация выполнения операций на железнодорожной станции / Д. Ю. Гришкова, В. В. Наперов // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство : сб. науч. статей по итогам 11-й Междунар. науч. конференции. – Казань : КазГТУ, 2019. – С. 112–113.

9. Гришкова Д. Ю. Бережливое производство как основа повышения производительности тру-

да / Д. Ю. Гришкова, И. О. Тесленко // Сб. науч. трудов Донецк. ин-та ж.-д. транспорта. – Донецк : Донецк. ин-т ж.-д. транспорта, 2018. – № 51. – С. 45–52.

10. Покровская О. Д. Организация международной доставки груза через распределительный центр : учеб. пособие / О. Д. Покровская. – Новосибирск : Центр развития научного сотрудничества, 2015. – 102 с.

11. Покровская О. Д. Понятийный аппарат терминалистики / О. Д. Покровская, Т. С. Титова // Бюл. результатов науч. исследований. – 2018. – Вып. 2. – С. 29–43.

12. Покровская О. Д. Организация работы складской распределительной системы : учеб. пособие / О. Д. Покровская. – Новосибирск : Центр развития научного сотрудничества, 2015. – 72 с.

13. Покровская О. Д. Состояние транспортно-логистической инфраструктуры для угольных перевозок в России / О. Д. Покровская // Инновационный транспорт. – 2015. – № 1 (15). – С. 13–23.

14. Покровская О. Д. Эволюционно-функциональный подход к развитию транспортных узлов / О. Д. Покровская // Политранспортные системы : материалы IX Междунар. науч.-технич. конференции. – Новосибирск : Сиб. гос. ун-т путей сообщения, 2017. – С. 233–238.

15. Покровская О. Д. Вопросы логистической иерархии железнодорожных объектов / О. Д. Покровская, О. Б. Маликов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2016. – Вып. 4 (49). – С. 521–531.

16. Покровская О. Д. Эволюционно-функциональный подход к классификации транспортных узлов / О. Д. Покровская, О. Б. Маликов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 14. – Вып. 3. – С. 406–419.

17. Покровская О. Д. Международная логистика Транссибирской магистрали : использование транзитного потенциала России / О. Д. Покровская, В. М. Самуйлов // Инновационный транспорт. – 2016. – № 3 (21). – С. 3–7.

18. Самуйлов В. М. Концепция «Новый Шелковый путь» (Китай, Россия, Германия) / В. М. Самуйлов, О. Д. Покровская, Ц. Цун // Инновационный транспорт. – 2017. – № 4 (26). – С. 26–28.

19. Покровская О. Д. Определение параметров терминальной сети региона (на примере Кемеров-

ской области) / О. Д. Покровская // Транспорт Урала. – 2012. – № 1 (32). – С. 93–97.

20. Покровская О. Д. Анализ системы нормирования на железнодорожном транспорте с позиций клиентоориентированности / О. Д. Покровская, О. Б. Маликов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 14. – Вып. 2. – С. 187–199.

21. Ахтямов Р. Г. Геоэкологические проблемы обеспечения безопасности при обращении с отходами / Р. Г. Ахтямов, Т. С. Титова. – Saarbrücken, Германия : Lambert Academic Publishing, 2016. – 109 с.

22. Titova T. S. Lifetime of earth dams / T. S. Titova, A. Longobardi, R. G. Akhtyamov, E. S. Nasyrova // Инженер.-строит. журн. – 2017. – № 1 (69). – С. 34–43.

23. Быкадоров С. А. Анализ методов определения себестоимости грузовых перевозок / С. А. Быкадоров, П. В. Куренков, А. В. Серкова, О. В. Чиркова // Вестн. транспорта. – 2014. – № 3. – С. 30–41.

24. Ефремов В. А. Логистизация управления движением поездов / В. А. Ефремов, П. В. Куренков // Логистика сегодня. – 2004. – № 5. – С. 31–38.

25. Полянский Ю. А. Топологическое моделирование взаимодействия хозяйств железной дороги / Ю. А. Полянский, П. В. Куренков // Транспорт : наука, техника, управление : сб. НТИ/ВИНИТИ РАН. – 2003. – № 7. – С. 8–18.

26. Полянский Ю. А. Дорожный центр ситуационного управления : проблемы создания и функционирования / Ю. А. Полянский, П. В. Куренков // Экономика железных дорог. – 2003. – № 1. – С. 51–65.

27. Мохонько В. П. Ситуационное управление перевозочным процессом / В. П. Мохонько, В. С. Исаков, П. В. Куренков // Транспорт : наука, техника, управление : сб. ОИ/ВИНИТИ РАН. – 2004. – № 11. – С. 14–16.

28. Бубнова Г. В. Транспортные коридоры и оси в евразийских коммуникациях / Г. В. Бубнова, А. А. Зенкин, П. В. Куренков // Логистика – евразийский мост : материалы 12-й Междунар. науч.-практич. конференции. – 2017. – С. 25–33.

Дата поступления: 20.04.2020

Решение о публикации: 01.05.2020

Контактная информация:

ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна – д-р техн. наук, доцент; insight1986@inbox.ru

Implementation principles and requirements of transport and logistical services for railway transport

O. D. Pokrovskaya

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

For citation: Pokrovskaya O. D. Implementation principles and requirements of transport and logistical services for railway transport. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, iss. 3, pp. 288–303. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-288-303

Summary

Objective: To consider realization principles and requirements of a package of transport logistics services for railway transport. **Methods:** The methods of modern logistics, synchronous modality and marketing, as well as the client-oriented approach were applied in the study. **Results:** Key promising areas of the research, related to rendering of transport logistics services, were singled out. Implementation phases of the above-mentioned services were described. **Practical importance:** The given required conditions and tools for implementation of transport logistics services for Russian railways will make it possible for Russian Railways to work on system building in standardization, certification as well as terminal storage infrastructure.

Keywords: A package of transport logistics services, railroad business, digital platform, digitalization, client-oriented approach.

References

1. *Ekonomika Rossii: proshloye, nastoyashcheye, budushcheye* [The economy of Russia: past, present, future]. Multi-authored monograph. Under gen. ed. of N. A. Adamov. Moscow, ITCOR [Research Institute of Distribution and Wholesale Market Condition] Publ., 2014, 248 p. (In Russian)
2. *Kontseptsiya sozdaniya seti TLTs na territorii RF do 2025 goda* [The concept of creating terminal and logistics centers on the territory of the Russian Federation by 2025]. Available at: https://test-cargo.rzd.ru/dbmm/download?vp=5&load=y&col_id=121&id=74208 (accessed: February 15, 2020) (In Russian)
3. *Transportnaya Strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda* [Transport strategy of the Russian Federation for the period until 2030]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82617/ (accessed: February 15, 2020) (In Russian)
4. *Tsifrovaya Rossiya: novaya realnost*. Otchet McKinsey [Digital Russia: new reality. A report by McKinsey]. Available at: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/russia/our%20insights/digital%20russia/digital-russia-report.ashx> (accessed: February 15, 2020). (In Russian)
5. Loffredo A. & Tufo M. Digital work in the transport sector: In search of the employer. *Work Organisation, Labour and Globalisation*, 2018, no. 12 (2), pp. 23–37. DOI:10.13169/workorgalaboglob.12.2.0023
6. Kache F. & Seuring S. Challenges and opportunities of digital information at the intersection of Big Data Analytics and supply chain management. *International journal of operations & production management*, 2017, vol. 37, iss.1, pp. 10–36. DOI: 10.1108/IJOPM-02-2015-0078
7. *Tsifrovizatsiya: trendy* [Digitization: trends]. Available at: https://transweek.ru/18/Digitization_of_container_shipments.pdf (accessed: February 15, 2020). (In Russian)
8. Grishkova D. Yu. & Naperov V. V. Optimizatsiya vypolneniya operatsiy na zheleznodorozhnoy stantsii [Optimization of operation performance at the railway station]. *Peredoviye innovatsionnye razrabotki. Perspektivy i opyt ispolzovaniya, problemy vnedreniya v proizvodstvo* [Advanced innovative solutions. Prospects and

experience of using, problems of product introduction process]. Sbornik nauchnykh statey po itogam 11-oy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Collection of scientific articles summarizing the results of the 11th International research conference]. Kazan, KazGTU [Kazan National Research Technological University] Publ., 2019, pp. 112–113. (In Russian)

9. Grishkova D. Yu. & Teslenko I. O. Berezhlivoye proizvodstvo kak osnova povysheniya proizvoditelnosti truda [Lean manufacturing as the basis for improving labour efficiency]. *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Collection of scientific papers of Donetsk Institute of Railway Transport]. Donetsk, Donetsk Institute of Railway Transport Publ., 2018, no. 51, pp. 45–52. (In Russian)

10. Pokrovskaya O. D. *Organizatsiya mezhdunarodnoy dostavki gruzha cherez raspredelitelnyy tsentr* [Organization of international cargo delivery via distribution center]. Teaching aid. Novosibirsk, Tsentrazvitiya nauchnogo sotrudnichestva [Cooperation Center for Scientific Research] Publ., 2015, 102 p. (In Russian)

11. Pokrovskaya O. D. & Titova T. S. Ponyatiyniy apparat terminalistiki [Research vocabulary of terminalistics]. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results], 2018, iss. 2, pp. 29–43. (In Russian)

12. Pokrovskaya O. D. *Organizatsiya raboty skladskoy raspredelitelnoy sistemy* [Operation management of storage distribution system]. Teaching aid. Novosibirsk, Tsentrazvitiya nauchnogo sotrudnichestva [Cooperation Center for Scientific Research] Publ., 2015, 72 p. (In Russian)

13. Pokrovskaya O. D. Sostoyaniye transportno-logisticheskoy infrastruktury dlya ugolnykh perevozok v Rossii [The state of transport and logistics infrastructure for coal shipment in Russia]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport], 2015, no. 1(15), pp. 13–23. (In Russian)

14. Pokrovskaya O. D. Evolyutsionno-funktsionalniy podkhod k razvitiyu transportnykh uzlov [Evolutionary functional approach to the development of transportation hubs]. *Polytransportniye sistemy*. Materialy 12-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Polytransportation systems. Proceedings of the 9th International Research and Training Conference]. Novosibirsk,

Siberian Transport University Publ., 2017, pp. 233–238. (In Russian)

15. Pokrovskaya O. D. & Malikov O. B., Voprosy logisticheskoy ierarkhii zheleznodorozhnykh obyektov [The issues of logistics hierarchy of railroad facilities]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, iss. 4(49), pp. 521–531. (In Russian)

16. Pokrovskaya O. D. & Malikov O. B. Evolyutsionno-funktsionalniy podkhod k klassifikatsii transportnykh uzlov [Evolutionary functional approach to classification of transportation hubs]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, vol. 14, iss. 3, pp. 406–419. (In Russian)

17. Pokrovskaya O. D. & Samuilov V. M. Mezhdunarodnaya logistika Transsibirskoy magistraly: ispolzovaniye tranzitnogo potentsiala Rossii [International logistics of the Trans-Siberian Railroad: using transit capacity of Russia]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport], 2016, no. 3(21), pp. 3–7. (In Russian)

18. Samuilov V. M., Pokrovskaya O. D. & Tsun Ts. Kontseptsiya “Noviy shelkoviy put” (Kitay, Rossiya, Germaniya) [The “New Silk Road” concept (China, Russia, Germany)]. *Innovatsionnyy transport* [Innovative transport], 2017, no. 4(26), pp. 26–28. (In Russian)

19. Pokrovskaya O. D. Opredeleniye parametrov terminalnoy sety regiona (na primere Kemerovskoy oblasti) [Determination of parameters of terminal network (by the example of the Kemerovo region)]. *Transport Urala* [Ural Transport], 2012, no. 1(32), pp. 93–97. (In Russian)

20. Pokrovskaya O. D. & Malikov O. B. Analiz sistemy normirovaniya na zheleznodorozhnom transporte s pozitsiy klientoorientirovannosti [The analysis of railway rationing system from the viewpoint of client-oriented approach]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, vol. 14, iss. 2, pp. 187–199. (In Russian)

21. Akhtyamov R. G. & Titova T. S. *Geoekologicheskiye problemy obespecheniya bezopasnosti pry obrashchenii s otkhodami* [Geocological issues related to secu-

riety support when handling waste products]. Saarbrucken, Germany, Lambert Academic Publishing, 2016, 109 p. (In Russian)

22. Titova T. S., Longobardi A., Akhtyamov R. G. & Nasyrova E. S. Lifetime of earth dams. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal* [Construction engineering journal], 2017, no. 1(69), pp. 34–43.

23. Bykadorov S. A., Kurenkov P. V., Serkova A. V. & Chirkova O. V. Analiz metodov opredeleniya sebestoimosti gruzovykh perevozok [Analysis of methods for determining the prime cost of freight service]. *Vestnik transporta* [Transport bulletin], 2014, no. 3, pp. 30–41. (In Russian)

24. Efremov V. A. & Kurenkov P. V. Logistizatsiya upravleniya dvizheniyem poezdov [Train control system logistization]. *Logistika segodnya* [Logistics today], 2004, no. 5, pp. 31–38. (In Russian)

25. Polyanskiy Yu. A. & Kurenkov P. V. Topologicheskoye modelirovaniye vzaimodeistviya khozyaistv zheleznoy dorogy [Topological interaction modeling of railway facilities]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye* [Transport: science, equipment, management]. Sbornik OI/VINITI RAS [Coll. Volume PI/All-Union Institute of Scientific and Technical Information RAS], 2003, no. 7, pp. 8–18. (In Russian)

26. Polyanskiy Yu. A. & Kurenkov P. V. Dorozhniy tsentr situatsionnogo upravleniya: problem sozdaniya i

funktsionirovaniya [Road center for situation management: problems of formation and functioning]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Railway economics], 2003, no. 1, pp. 51–65. (In Russian)

27. Mokhonko V. P., Isakov V. S. & Kurenkov P. V. Situatsionnoye upravleniye perevozochnym protsessom [Situation management of transportation process]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye* [Transport: science, equipment, management]. Sbornik OI/VINITI RAS [Coll. Volume PI/All-Union Institute of Scientific and Technical Information RAS], 2004, no. 11, pp. 14–16. (In Russian)

28. Bubnova G. V., Zenkin A., A. & Kurenkov P. V. Transportniye koridory i osy v evraziyskikh kommunikatsiyakh [Transport corridors and axes in Eurasian communication lines]. *Logistika – evraziyskiy most* [Logistics – Eurasian bridge]. Materialy 12-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Proceedings of the 12th International Research and Training Conference], 2017, pp. 25–33. (In Russian)

Received: April 20, 2020

Accepted: May 01, 2020

Author's information:

Oksana D. POKROVSKAYA – D. Sci. in Engineering, Associate Professor; insight1986@inbox.ru

УДК 331.456.202011

Сравнительный анализ нормативно-правовой документации России и Китая в области охраны труда при работах на строительной технике

Тан Чжуншэн

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

Для цитирования: Чжуншэн Тан. Сравнительный анализ нормативно-правовой документации России и Китая в области охраны труда при работах на строительной технике // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 304–310. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-304-310

Аннотация

Цель: Рассмотреть законы о работе строительной техники, чтобы укрепить безопасность труда на работе. Так как время, место аварии и тяжести непредсказуемы, любая авария имеет свою неизбежную статистическую закономерность, развитие несчастных случаев происходит из-за многих взаимосвязанных событий последовательно. Сравнение норм охраны труда, действующих в России и Китае при применении строительной техники, анализ их характеристик. **Методы:** Применяется анализ правовой документации России и Китая в области охраны труда при эксплуатации строительной техники. Отмечается высокая степень проработанности требований в области охраны труда в Российской Федерации на примере правил по охране труда на автомобильном и стационарном транспорте. Анализируется контроль и надзор в сфере охраны труда путем сравнения методов, используемых в России и Китае. **Результаты:** Контроль в Китае за соблюдением организации трудового законодательства осуществляется отделом труда, который имеет право приостановить деятельность предприятия и наложить штрафы за нарушения. Китаю не хватает такого мониторинга условий труда, а Россия добилась большего успеха в этом направлении. **Практическая значимость:** Анализируя документы по охране труда в Российской Федерации и Китайской Народной Республике, можно выявить и устранить недостатки, чтобы помочь защитить работников на оборудовании, тем самым уменьшая вред и нестабильность из-за несовершенных документов по охране труда.

Ключевые слова: Охрана труда, строительство, требования безопасности, трудовое право, условия труда.

Все использующееся на стройке оборудование может представлять собой опасность. Она может заключаться как в самом оборудовании, так и в лице, управляющем строительной техникой, или строителях, работающих в непосредственной близости от оборудования.

Строительная отрасль была, есть и будет одной из самых опасных отраслей ввиду ее отличительных характеристик, к которым относят:

1) временность и мобильность проводимых работ;

2) проведение работ в условиях неблагоприятного климата;

3) проведение работ подрядчиками и субподрядчиками;

4) тяжелые и неблагоприятные условия работы (шум, пыль, вибрации и т. д.).

Соответственно необходимы определенные правила и требования к проведению работ на строительной площадке, а также правила эксплуатации самой строительной техники. Эта задача разрешается посредством правильной

организации охраны труда, под которой понимается система обеспечения благоприятных условий с целью сохранения здоровья и жизни работников при осуществлении их трудовой деятельности. Стоит отметить, что охрана труда реализуется посредством проведения организационно-технических, правовых, социально-экономических, реабилитационных и лечебно-профилактических мероприятий [1, ст. 209].

Охрана труда в Российской Федерации и Китайской Народной Республике несколько отличается, так как принципы охраны труда в России основываются на принципах конвенций Международной охраны труда и своей целью имеют безопасность труда, в то время как в Китае охрана труда в первую очередь направлена на продуктивность и результат.

С теоретической и правовой точек зрения охрану труда в Российской Федерации многие ученые рассматривают в широком и узком смысле. Следует отметить, что охрана труда, в узком смысле, характеризуется как институт в области трудового права, который включает в себя нормы, обеспечивающие адекватные условия труда, безопасные для жизни и здоровья работников (см. раздел 10 в [1], 2002, ст. 3; 2013, ст. 6986):

1) нормы, регулирующие технику безопасности во время строительных работ, а также производственную санитариию на объекте строительства;

2) нормы, регулирующие охрану труда работников, осуществляющих строительную деятельность в условиях тяжелого, вредного и опасного производства;

3) нормы, регулирующие планирование обеспечения охраны труда, а также деятельность государственных органов в данной сфере;

4) нормы, регулирующие охрану труда лиц с пониженной трудоспособностью, несовершеннолетних и женщин.

Охрана труда, в широком смысле, рассматривается как система обеспечения благоприятных условий с целью сохранения здоровья и жизни работников при осуществлении трудовой деятельности. Здесь прежде всего необходимо обра-

тить внимание на субъективные права, которыми наделяется работник при заключении трудового договора с работодателем [1, гл. 36]:

1) на безопасное от воздействия вредных факторов рабочее место;

2) на овладение навыками осуществления безопасной трудовой деятельности;

3) на информирование относительно безопасности условий труда и безопасности рабочего места;

4) на отказ от выполнения работ в случае негативного воздействия производственных факторов, о которых умолчал работодатель.

Требования, которые устанавливаются государством в области охраны труда, обязательны для исполнения при любом виде деятельности, а также при проектировании и строительстве объектов, при конструировании машин, механизмов и другого оборудования, а также при его эксплуатации.

Проведение эффективной политики охраны труда в Китайской Народной Республике ввиду стремительного развития всех отраслей государства являлось главной задачей. Все дело в том, что в стране уровень несчастных случаев на предприятиях и объектах строительства очень высок, поэтому национальное трудовое законодательство нуждалось во внесении изменений. Так, был пересмотрен Закон Китайской Народной Республики «О труде» [2], в результате чего были ужесточены требования относительно организации безопасности рабочих мест на предприятиях, фабриках, заводах и объектах строительства, а также мониторинга соблюдения данных требований. Стоит также отметить Закон Китайской Народной Республики «О строительстве» [3], который регламентирует правила работы как на строительных площадках, так и на строительной технике. После внесения изменений в трудовые акты безопасность на рабочих местах в Китае значительно улучшилась за первый квартал 2018 г. по сравнению с тем же периодом предыдущего года. Количество происшествий на производстве и строительстве упало на 16,1%. Это было связано с ростом надзора и качеством его проведения, в результате

которого количество административных штрафов выросло на 34,1 % в сравнении с соответствующим периодом 2017 г. В общей сложности 2109 компаний получили предписание приостановить производство для проведения ремонтных работ строительной техники, что на 7,9 % больше, чем годом ранее. Падение количества несчастных случаев и смертей на производстве носит устойчивый характер и продолжается из года в год [4].

Обращая внимание на охрану труда и технику безопасности при эксплуатации строительной техники, следует отметить основные нормативные акты, которые применяются для организации работ на технике такого вида, а также определенные требования, важные для создания безопасной обстановки.

Особого внимания в данном контексте заслуживает эксплуатация строительной техники, которая требует от работников профессиональных навыков, чтобы оградить от несчастных случаев не только других работников, но и себя. Проведение строительных работ с использованием строительной техники в Российской Федерации регулируется Постановлением Госстроя РФ от 23.07.2011 г. № 80 «О принятии строительных норм и правил Российской Федерации “Безопасность труда в строительстве. Часть 1. Общие требования. СНиП 12-03–2001”» [5]. В гл. 7 данного документа присутствуют нормы, регулирующие правила эксплуатации транспортных средств, средств механизации, строительных и ручных машин, а также строительного инструмента. В настоящем документе также устанавливаются общие требования к транспортным средствам, строительным машинам (как мобильным, так и стационарным), которые должны прежде всего отвечать требованиям, содержащимся в государственных стандартах в области безопасности труда, а также иметь сертификат на соответствие данным стандартам. В нем также предусматривается правило, которое запрещает эксплуатацию строительных машин и других средств производства без установления соответствующих стандартам ограждений, систем блокировок и сигнализации для

предупреждения несчастных случаев на объектах строительства. Сама же строительная техника должна использоваться строго по назначению в специально организованных условиях, за которыми должен проводиться постоянный контроль с целью обеспечения безопасных условий труда работников на объекте строительства. Еще одним немаловажным правилом является установление заводом-изготовителем неисправностей строительной техники, при которых их эксплуатация строго запрещается.

С точки зрения самого процесса строительства необходимо помнить о том, что до его начала необходимо:

- определить рабочую зону, в которой будет осуществляться эксплуатация строительной техники;
- определить опасную зону, в которой запрещается находиться другим работникам, не осуществляющим эксплуатацию строительной техники;
- обеспечить обзорность рабочей зоны для лиц, осуществляющих эксплуатацию строительной техники. В случае ее недостаточности следует выделить специального сигнальщика.

В отношении стационарной строительной техники предусмотрена отдельная подглава в Постановлении Госстроя, в которой исчерпывающим образом регулируется эксплуатация стационарной строительной техники. Так, при ее вводе в эксплуатацию необходимо совместное решение лиц, которые назначены ответственными за безопасность условий труда на конкретном объекте строительства. Также могут при необходимости привлекаться и органы, осуществляющие государственный надзор в области охраны труда. В случае, если эксплуатируемые стационарные машины имеют движущиеся части, представляющие особую опасность жизни и здоровью работников на объекте строительства, то необходимо их ограждение металлической затяжкой и т. д.

Существуют также требования к техническому состоянию и оборудованию техники, как мобильной, так и стационарной, находящейся в эксплуатации. Требования регулируются Прика-

зом Министерства труда России от 06.02.2018 г. № 59 н «Об утверждении Правил по охране труда на автомобильном транспорте» [6]. Согласно настоящим правилам, работодатель обязан [1, ст. 22]:

1) организовывать такие условия труда, которым соответствуют требования законодательства в области охраны труда;

2) предоставлять работникам, которые проводят работы с использованием строительной техники, специальные инструменты и оборудование, а также техническую документацию в области оперирования строительной техникой для правильного и эффективного выполнения возложенных на них обязанностей;

3) ознакомливать работников с локальными нормативно-правовыми актами, регулирующими деятельность по выполнению работ с помощью строительной техники.

Ввиду того, что мобильная и стационарная строительная техника служит источником повышенной опасности, в расходные обязанности работодателя в области охраны труда входят [7, ч. 6, ст. 52; 8; 9]:

– внедрение в процесс строительных работ систем, которые позволяют автоматизировать строительный процесс либо предоставляют возможность его дистанционного управления;

– оборудование объекта строительства, а также самой техники системами сигнализации, аварийной остановки, а также специальных устройств, которые приводят к предупреждению несчастных случаев в процессе строительства;

– ограждение рабочей зоны строительной техники для предупреждения несчастных случаев в процессе строительства;

– оснащение строительной и любой другой техники знаками безопасности, а также специальными сигнальными цветами;

– оснащение строительной и любой другой техники специальными устройствами, которые защищают и сигнализируют об опасной ситуации на объекте строительства.

Исходя из проведенного анализа, можно сделать вывод, что Российская Федерация, ратифицировав конвенции Международной организа-

ции труда, имплементировала и расширила требования в области охраны труда в строительстве при эксплуатации как мобильной, так и стационарной строительной техники.

Что касается законодательства Китая в области охраны труда при эксплуатации строительной техники, то прежде всего следует обратить внимание на Закон Китайской Народной Республики от 05.07.1995 г. «О труде» [2], в котором гл. 6 посвящена данной области. Так, при организации безопасности рабочих мест и охраны труда в целом работодатель обязан постоянно реализовывать мероприятия по совершенствованию системы безопасности и гигиены рабочих, по воспитанию рабочих в области обеспечения собственной безопасности и надлежащего уровня гигиены, а также не допускать возникновения опасных ситуаций в процессе строительных работ и осуществлять мероприятия по предупреждению несчастных случаев на объекте строительства. Необходимо отметить требование, согласно которому как работодатель, так и работники обязаны всевозможными средствами уменьшать вредность условий труда для сохранения приемлемого уровня здоровья работников [2, ст. 52].

В области государственного надзора за соблюдением установленного уровня охраны труда была создана специальная система учета строительной техники на конкретном объекте строительства, которая предоставляет органам трудовой администрации и народным правительствам информацию о количестве строительной техники на объекте, о мероприятиях, проводимых для создания безопасной рабочей среды в процессе строительства, а также о несчастных случаях на конкретном объекте строительства. На основании представленной информации вышеуказанные органы выносят рекомендации по профилактике несчастных случаев, которые приводят к потере трудоспособности работников или травматизму на объекте строительства [2, ст. 56].

В связи с резко возросшим уровнем несчастных случаев в 1997 г. в Китае был также принят Закон Китайской Народной Республики

«О строительстве» [3], в который впоследствии в 2011 г. были внесены изменения с упором на обеспечение безопасности труда в процессе строительства объектов. Он направлен на усиление контроля и регулирования строительных работ, поддержания порядка на строительном рынке, обеспечения качества и безопасности строительных проектов, а также здорового развития строительной отрасли.

В части государственных требований безопасности при проведении различных видов строительных работ к эксплуатации строительной техники и в России, и в Китае предъявляются почти аналогичные требования к регистрации строительной техники, ее осмотру и вводе в эксплуатацию. Однако в связи с тем, что в Российской Федерации охрана труда занимает особое место в трудовой деятельности организаций, предусматриваются также и специальные оценки условий рабочих мест и труда в целом, действуют специальные нормативно-правовые акты в области обеспечения надлежащего уровня охраны труда. В КНР такого всестороннего контроля в области охраны труда нет. Хотя органы трудовой администрации и народные правительства обладают полномочиями приостановления процесса строительства, выписывания штрафов в случае обнаружения нарушения законодательства в области охраны труда, эффективная система контроля за условиями труда в стране пока не сформирована. Следует создать организацию для лучшей защиты законных прав и интересов работников [10].

Библиографический список

1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 г. № 197-ФЗ (ред. от 11.10.2018 г.) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2002. – № 1. – Ст. 3; 2013. – № 52.
2. Закон КНР «О труде». – Принят на 8-м заседании Постоянного комитета Всекитайского Собрания Народных Представителей восьмого созыва 5 июля 1994 г. – Введен в действие с 1 января 1995 г. – URL : <http://qikan.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=4001413833> (дата обращения : 17.11.2019 г.).
3. Закон КНР «О строительстве». – Принят на 28-й сессии Постоянного Комитета Всекитайского Собрания Народных Представителей восьмого созыва 1 октября 1997 г. (Исправлен в соответствии с решением 20-й сессии Постоянного Комитета Всекитайского Собрания Народных Представителей 11-го созыва об изменениях Закона о строительстве от 22 апреля 2011 г.). – URL : http://www.china.com.cn/guoqing/zwxh/2011-11/07/content_23849255.htm (дата обращения : 17.11.2019 г.).
4. Охрана труда в Китае растет вместе со сборами штрафов за нарушения // Информационное агентство Regnum. – URL : <https://regnum.ru/news/2413653.html> (дата обращения : 17.11.2019 г.).
5. Постановление Госстроя РФ от 23.07.2001 г. № 80. О принятии строительных норм и правил Российской Федерации «Безопасность труда в строительстве. Часть 1. Общие требования. СНиП 12-03–2001». – М. : Госстрой РФ, 2001. – 45 с.
6. Приказ Министерства труда России от 06.02.2018 г. № 59 н. Об утверждении Правил по охране труда на автомобильном транспорте. – URL : <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=310340> (дата обращения : 23.03.2018 г.).
7. Гражданский кодекс Российской Федерации (часть первая) от 30.11.1994 г. № 51-ФЗ (ред. от 16.12.2019 г.). – URL : <https://fzrf.su/kodeks/gk-1/> (дата обращения : 20.03.2020 г.).
8. Приказ Министерства здравоохранения и социального развития России от 1 марта 2012 г. № 181 н. Об утверждении Типового перечня ежегодно реализуемых работодателем мероприятий по улучшению условий и охраны труда и снижению уровней профессиональных рисков // Российская газета. – 2012. – 28 марта (с изм).
9. Правила по охране труда в строительстве. – Утв. Приказом Министерства труда России от 1 июня 2015 г. № 336 н. – URL : <http://docs.cntd.ru/document/420281004> (дата обращения : 23.01.2020 г.).
10. Department of Justice. The Laws of Hong Kong. Occupational Safety and Health Ordinance Cap. 398, Hong Kong Special Administrative Region, 2018. – URL : <https://www.elegislation.gov.hk/hk/cap398> (дата обращения : 23.01.2020 г.).

Дата поступления: 15.06.2020
Решение о публикации: 23.06.2020

Контактная информация:
ТАН Чжуншэн – аспирант; ху809685543they@gmail.com

Comparative analysis of regulatory documentation in the sphere of occupational safety and health when working with construction equipment in Russia and China

Tang Zhongsheng

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

For citation: Zhongsheng Tang. Comparative analysis of regulatory documentation in the sphere of occupational safety and health when working with construction equipment in Russia and China. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 304–310. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-304-310

Summary

Objective: To consider the acts on construction equipment operation in order to reinforce labour safety. As accident time, scene and severity are unpredictable, any accident has its inevitable statistic pattern and the development of accidents comprises a considerable number of interrelated events. The comparison of labour safety norms when working with construction equipment between Russia and China was fulfilled as well as the analysis of characteristics was made. **Methods:** The analysis of regulatory documentation of in Russia and China in the sphere of labour safety when working with construction equipment was applied. It was noted that the requirements in the sphere of labour safety in the Russian Federation were highly elaborated. This conclusion was made after the study of rules on labour safety for automobile and mechanical transport. Control and supervision in the sphere of labour safety is analyzed through a comparison of methods applied in Russia and China. **Results:** In China control over labour regulations followed by an organization is carried out by the department of labour; the latter is authorized to halt enterprise activity and impose penalties for violations. China lacks such supervision of labour conditions, while Russia achieved a greater success in this direction. **Practical importance:** The analysis of the documents on labour protection of the Russian Federation and the People's Republic of China will make it possible to eliminate some drawbacks of the above-mentioned deficient documents, thus protect those employees who work with construction equipment.

Keywords: Labour safety, construction, safety requirements, labour law, conditions of work.

References

1. Trudovoy kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 30.12.2001 g. no. 197-FZ (red. ot 11.10.2018 g.) [The Russian Federation Labor Code dated December 30th, 2001, no. 197-Federal Law (last updated October 11th, 2018). *Sobraniye zakonodatelstva Rossiyskoy Federatsii* [The Russian Federation Code], 2002, no. 1, art. 3; 2013, no. 52. (In Russian)
2. *Zakon KNR "O trude"*. Prinyat na 8-m zasedanii Postoyannogo Komiteta Vsekitaiskogo Sobraniya Narodnykh Predstaviteley vosmogo sozyva 5 iyulya 1994 g., vveden v deistviye s 1 yanvarya 1995 g. [PRC "Labour law". Passed

at the 8th session of the Standing Committee of the National People's Congress on July 05th, 1994, the 8th calling, enacted January 1st, 1995]. Available at: <http://qikan.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=4001413833> (accessed: November 17, 2019).

3. *Zakon KNR "O stroitelstve"*. Prinyat na 28-oy sessii Postoyannogo Komiteta Vsekitaiskogo Sobraniya Narodnykh Predstaviteley vosmogo sozyva 1 oktyabrya 1997 g. (Ispravlen v sootvetstvii s resheniyem 20-oy sessii Postoyannogo Komiteta Vsekitaiskogo Sobraniya Narodnykh Predstaviteley 11-go sozyva ob izmeneniyakh Zakona o Stroitelstve ot 22 aprelya 2011 g.) [PRC "Construction Act". Passed at the 28th session of the Standing Committee of the National People's Congress October 1st, 1997, the 8th calling. (Amended in accordance with the resolution of the National People's Congress on the "Construction Act" amendments, 11th calling, April 22nd, 2011)]. Available at: http://www.china.com.cn/guoqing/zwx/2011-11/07/content_23849255.htm (accessed: November 17, 2019).

4. *Okhrana truda v Kitae rastet vmeste so sboramyshtrafoy za narusheniya* [Labour safety in China grows together with penalties for violation]. Informatsionnoye agenstvo [News agency] Regnum. Available at: <https://regnum.ru/news/2413653.html> (accessed: January 20, 2020). (In Russian)

5. Postanovleniye Gosstroya RF ot 23.07.2001 g. no. 80. *O prinyatii stroitelnykh norm i pravil Rossiyskoy Federatsii "Bezopasnost truda v stroitelstve. Chast 1. Obshchiye trebovaniya. SNiP 12-03-2001"* [Regulation of the Russian Federation State Committee for Construction, Architecture and Housing Policy dated July 23rd, 2001. N 80. *Adoption of construction norms and regulations of the Russian Federation "Construction safety requirements. Part 1. General requirements. SNiP Construction Rules and Regulations 12-03-2001"*. Moscow, Gosstroy RF [the Russian Federation State Committee for Construction, Architecture and Housing Policy] Publ., 2001, 45 p. (In Russian)

6. Prikaz Ministerstva truda Rossii ot 06.02.2018 g. no. 59n. *Ob utverzhdenii Pravil po okhrane truda na avtomobilnom transporte* [Order of the Ministry of Russia dated February 6th, 2018, N 59n. *On approval of occupational safety rules for automobile transport*]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?modu>

leId=1&documentId=310340 (accessed: January 22, 2020) (In Russian)

7. *Grazhdanskiy kodeks Rossiyskoy Federatsii (chast pervaya) ot 30.11.1994 g. no. 51-FZ (red. ot 16.12.2019 g.)*. [Civil Code of the Russian Federation (Part 1) dated November 30th, 1994, N 51-FL (edited December 16th, 2019)]. Available at: <https://fzrf.su/kodeks/gk-1/> (accessed: January 22, 2020).

8. Prikaz Ministerstva zdravookhraneniya i sotsialnogo razvitiya Rossii ot 1 marta 2012 g. no. 181n. *Ob utverzhdenii tipovogo perechnya ezhegodno realizuemykh rabotodatelem meropriyatiy po uluchsheniyu usloviy i okhrany truda i snizheniyu urovney professionalnykh riskov*. 28 marta (s izm.) [Order of the Ministry of health care and social development of Russia dated March 1st, 2012. N 181n. Approval of the Standard list of measures to improve conditions and labour safety and reduce the levels of occupational risks annually implemented by the employer]. *Rossiyskaya gazeta* [Russian paper], 2012, March 28th (amended) (In Russian)

9. *Pravila po okhrane truda v stroitelstve*. Utv. Prikazom Ministerstva truda Rossii ot 1 iyunya 2015 g. no. 336n [Rules on labor safety in construction industry. Approved by the order of the Ministry of Russia dated June 1st, 2015, N 336n]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/420281004> (accessed: January 23, 2020) (In Russian)

10. Department of Justice, "The Laws of Hong Kong," Occupational Safety and Health Ordinance Cap. 398, Hong Kong Special Administrative Region, 2018. Available at: <https://www.elegislation.gov.hk/hk/cap398> (accessed: January 23, 2020).

Received: June 15, 2020

Accepted: June 23, 2020

Author's information:

Tang ZHONGSHENG – Postgraduate Student;
xy809685543they@gmail.com

УДК 502.175

Устьевые участки рек как индикаторы антропогенных изменений геоэкологического состояния устьевых областей рек Арктической зоны Российской Федерации¹

М. В. Третьяков, В. А. Брызгало, Е. В. Румянцева

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Российская Федерация, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

Для цитирования: Третьяков М. В., Брызгало В. А., Румянцева Е. В. Устьевые участки рек как индикаторы антропогенных изменений геоэкологического состояния устьевых областей рек Арктической зоны Российской Федерации // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 311–323.
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-311-323

Аннотация

Цель: Дать оценку антропогенных изменений геоэкологического состояния устьевых областей рек Арктической зоны Российской Федерации. **Методы:** В качестве интегрального индикатора антропогенных изменений геоэкологического состояния территорий предлагается рассматривать состояние устьевых областей рек Арктики, водосборы которых включают эти территории. Объектом исследования выбраны устьевые участки рек Обско-Тазовской устьевой области. **Результаты:** Показано, что устьевые экосистемы Обско-Тазовской устьевой области функционируют в условиях постоянной или временной внешней антропогенной нагрузки за счет поступления многих химических веществ с речным стоком и находятся под определяющим влиянием геоэкологического состояния их водосборов. **Практическая значимость:** Полученные результаты способствуют углублению понимания изменчивости (эволюции) абиотической компоненты устьевых участков арктических рек под действием техногенной нагрузки на окружающую среду российского арктического побережья при все возрастающем промышленным освоением богатейших ресурсов Арктики.

Ключевые слова: Арктика, геоэкологическое состояние, устьевая область реки, Обско-Тазовская устьевая область, компонентный состав водной среды.

В соответствии с п. 15 указа Президента Российской Федерации [1] основными задачами в сфере охраны окружающей среды являются: совершенствование системы мониторинга окружающей среды, обеспечение минимизации сбросов в водные объекты загрязняющих веществ, снижение негативного влияния на окружающую среду при ведении хозяйственной деятельности

и др. Поэтому оценка геоэкологического состояния Арктики – актуальная задача, в условиях сокращенной государственной наблюдательной сети требующая применения инновационных подходов. В качестве интегрального индикатора антропогенных изменений геоэкологического состояния территорий будем рассматривать состояние устьевых областей рек Аркти-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-60192).

ки, водосборы которых включают эти территории.

В настоящее время в большинстве регионов российской Арктики сопротивляемость пресноводных экосистем антропогенному прессингу заметно снизилась, следствием чего стало резкое ухудшение их состояния [2–5].

Наиболее сильное воздействие испытывают устьевые области арктических рек за счет антропогенных изменений речного стока воды, наносов, компонентного состава растворенных химических веществ. Устьевые области представляют собой «промежуточные» и весьма специфические природные системы, где взаимодействуют, смешиваются и трансформируются два принципиально различных по многим параметрам водных потока (речной и морской) и которые являются своеобразным барьером между рекой и приемным водоемом [6].

Устьевая область реки – это особый географический объект, охватывающий район впадения реки в приемный водоем (океан, море, озеро) и имеющий специфический природный комплекс, структура и формирование которого регулируются такими устьевыми процессами как динамическое взаимодействие и смешение вод реки и приемного водоема, а также отложением и перетотложением речных и частично морских наносов [7]. Выполняя роль барьера между рекой и приемным водоемом, устьевые области рек играют важную роль в формировании геоэкологического состояния побережий арктических морей.

Несмотря на относительно небольшие размеры, устья рек имеют большое геоэкологическое и хозяйственное значение, поскольку обладают огромными водными и биологическими ресурсами.

Устьевые процессы включают [8]:

- физические процессы, создающие рассматриваемые объекты и определяющие их пространственно-временные изменения;
- химические процессы, формирующие химический состав и качество вод в устьях рек;
- биохимические процессы, управляющие взаимодействием биоты и химического состава вод;

– биологические процессы, регулирующие развитие наземной, водной и околоводной биоты в устьях рек.

Типизация и районирование устьевых областей рек [8, 9] показали, что устьевая область реки может включать до четырех частей:

– устьевой участок реки: нижний отрезок реки, подверженный воздействию приливов и нагонов;

– эстуарий: полузамкнутая система водотоков и водоемов в пределах устьевой области реки, которая хотя бы периодически сообщается с открытым морем и внутри которой существует барьерная зона (эстуарный барьер) с изменением солености от 1 до 8‰;

– дельта: низменность в устье реки, расчлененная сложной и изменчивой гидрографической сетью;

– устьевая зона приемного водоема: часть приемного водоема, подверженная значительному влиянию речного стока, которое в морских устьях рек в основном проявляется в опреснении воды.

В случае отсутствия дельты и эстуария нижняя граница устьевого участка реки соответствует месту втекания реки в приемный водоем, т. е. устьевому створу реки. При этом в устьевом участке реки преобладают речной гидрологический и гидрохимический режимы, на которые влияют морские факторы, а в устьевом взморье доминируют морской гидрологический и гидрохимический режимы, на которые воздействует речной сток.

Устьевые участки реки как область взаимодействия реки и моря (озера) обладают такими особенностями как [8]:

- занимают обширную площадь в прибрежной зоне моря (озера) и береговой зоне суши;
- могут изменить свое географическое геоположение, форму, границы и размеры при крупномасштабных изменениях уровней моря (озера) и стока рек;
- вследствие замедления скоростей течения и обратных течений в них создаются условия для задержки и накопления загрязняющих веществ.

Несмотря на научные результаты, полученные с 1960-х годов по изучению устьевых областей рек, внимание к этим объектам не снижается [8, 10, 11]. Это можно объяснить тем, что:

– устья рек в современных условиях – одни из самых изменчивых и экологически уязвимых географических водных объектов;

– хозяйственное освоение богатых природных ресурсов устьевых областей рек постоянно расширяется, что требует более широкого внедрения режимного, геоэкологического и гидролого-экологического мониторинга изменчивости их состояния.

Принимая во внимание специфику устьевых областей рек, актуальными остаются исследования, касающиеся оценки возможных негативных изменений состояния наиболее значимых устьевых областей арктических рек с учетом специфики антропогенной нагрузки и региональных особенностей компонентного состава водной среды и структурной организации сообществ водных организмов.

В качестве объекта исследования были выбраны устьевые участки рек Обско-Тазовской устьевой области.

Особенности освоения минеральных ресурсов на территории протекания этих рек привела к формированию Нижнеобского импактного района, для которого характерны следующие основные направления изменения геосистем: трансформация естественного геохимического фона, изменение растительного покрова и почв в сторону обеднения и нарушения природного состояния, загрязнение вод [3]. Повсеместно химическому загрязнению сопутствуют механические изменения вследствие нарушения почвенно-растительного покрова, термоэрозии, роста площадей отвалов и свалок и т. п.

Большую роль в возникновении данного импактного района играют местные природные особенности территории [4], которые, наряду с мощностью и структурой выбросов, формируют его размеры.

Высокая интенсивность техногенных нагрузок приводит к глубокой трансформации природной среды, в том числе и водных объектов.

Используя внедренную в Росгидромете методику оценки степени загрязненности водной среды [12], была проведена классификация включенных в исследование устьевых участков арктических рек, впадающих в Обско-Тазовскую губу. Согласно этой классификации, степень загрязненности водной среды на устьевых участках за период с 1980 по 2014 г. (табл. 1) менялась на:

– р. Оби – от грязной в 1980–1989 гг. до очень грязной в 1990–2014 гг.;

– р. Надым – от грязной в 1980–1999 гг. до очень грязной и экстремально грязной в 2004–2014 гг.;

– р. Ныде – от грязной в 1980–1989 гг. до очень грязной и экстремально грязной в 1990–2009 гг.;

– р. Пур – от грязной до экстремально грязной за весь обследуемый период;

– р. Таз – от грязной в 1980–1994 гг. до очень грязной в 1995–2014 гг.

Ретроспективный анализ режимной информации государственной наблюдательной сети (ГСН) о степени загрязненности исследуемых экосистем выявил, что используемые при оценке качества их водной среды гидрохимические показатели (табл. 2) подразделяются на:

– приоритетные, концентрация которых за весь исследуемый период периодически превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК) во всех исследуемых устьевых участках;

– критические, концентрация которых с разной частотой повторяемости обуславливает перевод водной среды по степени загрязненности в класс «очень грязной» и «экстремально грязной».

В зависимости от кратности превышения ПДК по критическим ингредиентам в изучаемых устьевых участках периодически возникали кризисные экологические ситуации, характеризующиеся относительно быстрой структурно-функциональной изменчивостью водной экосистемы [13].

В исследуемых устьевых экосистемах рек к таким ингредиентам следует отнести (табл. 3):

ТАБЛИЦА 1. Временная изменчивость степени загрязненности водной среды устьевых участков рек Обско-Тазовской губы

Река	Пункт наблюдений	Степень загрязненности водной среды						
		1980–1984 гг.	1985–1989 гг.	1990–1994 гг.	1995–1999 гг.	2000–2004 гг.	2005–2009 гг.	2010–2014 гг.
Обь	г. Салехард	Грязная	Грязная	Очень грязная	Очень грязная	Очень грязная	Очень грязная	Очень грязная
Надым	г. Надым	Грязная	Грязная	Грязная	Грязная	Очень грязная	Экстремально грязная	Очень грязная
Ныда	пос. Ныда	Грязная	Грязная	Экстремально грязная	Очень грязная	Экстремально грязная	Очень грязная	Грязная
Пур	г. Самбург	Очень грязная	Очень грязная	Экстремально грязная	Нет данных	Очень грязная	Очень грязная	Очень грязная
Таз	пос. Сидоровск	Грязная	Грязная	Грязная	Очень грязная	Очень грязная	Очень грязная	Очень грязная

ТАБЛИЦА 2. Приоритетные и критические показатели загрязненности водной среды устьевых участков рек Обско-Тазовской губы

Устьевой участок	Период наблюдений, годы	O ₂	БО	БПК ₅	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	Соединения					Фенолы	НП
							Fe	Cu	Zn	Ni	Mn		
р. Обь, г. Салехард	1980–1999	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	2000–2014	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
р. Надым, г. Надым	1980–1999	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+
	2000–2011	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
р. Ныда, пос. Ныда	1980–1999		+	+	+		+	+	+			+	+
	2000–2012	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+
р. Пур, г. Самбург	1980–1994	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+
	2000–2014	+	+		+	+	+	+	+			+	+
р. Таз, пос. Сидоровск	1980–1999	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+
	2000–2014	+	+		+	+	+	+	+	+		+	+

Примечание: + – приоритетные загрязняющие показатели, $\boxed{+}$ – критические показатели загрязнения, НП – нефтепродукты.

ТАБЛИЦА 3. Кризисные экологические ситуации в водной среде устьевых участков рек Обско-Тазовской губы

Река	Пункт наблюдений	Критические показатели загрязненности*	Максимальная кратность превышения ПДК
Обь	г. Салехард	Соединения железа	21–66
		Нефтяные углеводороды	19–61
		Соединения меди	18–60
		Фенолы	16–36
Ныда	пос. Ныда	Соединения меди	10–78
		Нефтяные углеводороды	10–45
		Соединения железа	10–22
Надым	г. Надым	Соединения железа	11–93
		Нефтяные углеводороды	10–65
		Соединения меди	14–48
Пур	г. Самбург	Соединения меди	50–112
		Соединения железа	10–86
		Нефтяные углеводороды	15–57
Таз	пос. Тазовский	Соединения меди	14–62
		Соединения железа	10–48
		Нефтяные углеводороды	15–47
		Фенолы	20–36

* Упомянуты по мере уменьшения кратности превышения ПДК.

– соединения железа, максимальная кратность превышения ПДК периодически достигала 66 в р. Обь, 86 в р. Пур и 93 в р. Надым;

– соединения меди, максимальная кратность превышения ПДК могла достигать 60–62 в реках Обь и Таз и 112 в р. Пур;

– нефтяные углеводороды, максимальная кратность превышения ПДК периодически достигала 61 в р. Обь, 65 в р. Надым и 57 в р. Пур.

Хорошим индикатором возможного развития кризисных экологических ситуаций служит увеличение внутри- и межгодовой амплитуд колебания концентрации системообразующих параметров компонентного состава водной среды.

Следует обратить внимание на то, что при оценке характера и уровня изменчивости компо-

нентного состава водной среды определяющим является выбор информативных гидрохимических показателей, с помощью которых можно достаточно объективно оценить особенности их изменчивости во взаимосвязи не только с региональными природными особенностями, но и с его спецификой внешнего антропогенного воздействия.

Анализ пространственно-временной изменчивости компонентного состава водной среды с использованием многолетней (1980–2014 гг.) гидрохимической информации ГСН позволил заключить, что на замыкающих створах исследуемых рек отмечаются высокие межгодовая и внутригодовая изменчивости компонентного состава водной среды с общей тенденцией расширения общих диапазонов колебания кон-

ТАБЛИЦА 4. Приоритетные параметры компонентного состава водной среды устьевых участков рек Обско-Тазовской губы

Ингредиент (ПДК, мг/дм ³)	Общий диапазон колебания концентраций, мг/дм ³				
	р. Обь, г. Салехард	р. Надым, г. Надым	р. Ныда, пос. Ныда	р. Пур, г. Самбург	р. Таз, пос. Тазовский
Растворенный кислород	0,28–17,7	0,60–23,1	2,20–17,0	0,70–18,1	2,60–20,0
Хлориды (300)	0,60–17,3	0,30–10,8		0,40–49,0	0,30–13,8
Сульфаты (100)	1,10–43,7	0,40–31,8	4,30–26,0	0,60–35,9	1,60–34,8
ЛООВ по БПК ₅ (2,0)	0,16–8,20	0,96–8,30	0,54–12,8	1,05–5,82	0,30–6,40
Азот аммонийный (0,39)	н. о.–3,49	н. о.–3,20	0,06–1,85	н. о.–4,80	н. о.–2,44
Азот нитритный (0,02)	н. о.–0,238	н. о.–0,051	н. о.–0,037	н. о.–0,251	н. о.–0,040
Азот нитратный (9,0)	н. о.–0,910	н. о.–0,211	н. о.–0,150	н. о.–0,520	н. о.–0,364
Фосфор фосфатный	0,011–0,460	0,030–0,950		0,010–0,540	0,010–0,790
Фенолы (0,001)	н. о.–0,036	н. о.–0,021	н. о.–0,012	н. о.–0,027	н. о.–0,036
Нефтяные углеводороды (0,05)	н. о.–3,08	0,01–3,29	0,09–2,25	н. о.–2,84	н. о.–2,37
Соединения железа (0,10)	0,10–6,60	0,20–9,30		0,09–8,60	0,10–4,80
Соединения меди (0,001)	н. о.–0,060	н. о.–0,048	н. о.–0,078	н. о.–0,112	н. о.–0,062
Соединения цинка (0,010)	н. о.–0,380	н. о.–0,227	н. о.–0,350	н. о.–0,530	н. о.–0,524
Соединения никеля (0,010)	н. о.–0,032	н. о.–0,018		н. о.–0,148	н. о.–0,020
Соединения марганца (0,010)	н. о.–0,588	н. о.–0,596		н. о.–0,958	н. о.–1,15

Примечание: н. о. – ниже предела обнаружения.

центрации комплекса изучаемых ингредиентов (табл. 4).

Анализ долгопериодной режимной гидрохимической информации показал довольно отчетливую тенденцию ослабления устойчивости (стабильности) исследуемых устьевых экосистем, в первую очередь за счет таких изменений компонентного состава их водной среды как:

– пространственно-временная изменчивость гидрохимического режима по растворенному кислороду, легкоокисляемым органическим веществам (ЛООВ), хлоридам и сульфатам;

– повышение уровня накопления в водной среде минеральных форм азота и нарушение естественного соотношения аммонийных, нитритных и нитратных ионов;

– периодическое или постоянное возрастание содержания приоритетных соединений антропо-

генного происхождения, к числу которых следует прежде всего отнести соединения тяжелых металлов, нефтяные углеводороды и фенолы; – повышение повторяемости экстремально высокого уровня загрязненности водной среды.

Длительная антропогенная нагрузка на исследуемые устьевые участки рек на фоне приведенной в табл. 4 значительной изменчивости компонентного состава их водной среды сформировала новый антропогенно-измененный природный фон, верхние границы которого заметно превышают принятые в России ПДК.

Результаты расчета модальных интервалов (МИ) значений концентрации приоритетных компонентов водной среды (табл. 5) позволили отметить изменчивость сформировавшегося природного фона за счет:

– расширения диапазонов колебания содержания многих ингредиентов до концентраций, превышающих принятые ПДК;

– заметной межсистемной пространственной неоднородности природного фона по БПК₅, азоту нитритному, азоту нитратному, фосфору фосфатному, соединениям меди, цинка;

– общей тенденции накопления в водной среде азот- и фосфорсодержащих соединений, регулирующих внутрисистемные биохимические процессы функционирования пресноводных экосистем.

Такой характер сформировавшегося антропогенно-измененного природного фона дает возможность предположить заметное изменение к настоящему времени состояния исследуемых экосистем.

Систематизация результатов расчета МИ значений концентрации ЛООВ (по БПК₅), азота аммонийного и минимальных величин растворенного в воде кислорода, приведенных в табл. 6, и использование утвержденного в Росгидромете классификатора состояния экосистем [14] позволили заключить, что устьевой участок:

– р. Обь находится по растворенному кислороду в переходном из катастрофического в кризисное, по ЛООВ (БПК₅) – в равновесном и по азоту аммонийному – в переходном из естественного в кризисное;

– р. Надым находится по растворенному кислороду в переходном из катастрофического в равновесное, по ЛООВ (БПК₅) – в переходном из равновесного в кризисное и по азоту ам-

ТАБЛИЦА 5. Экологически допустимые уровни изменчивости концентрации доминирующих компонентов водной среды устьевых участков рек Обско-Тазовской губы

Ингредиент	Общий диапазон колебания концентраций, мг/дм ³				
	р. Обь, г. Салехард	р. Надым, г. Надым	р. Ныда, пос. Ныда	р. Пур, г. Самбург	р. Таз, пос. Тазовский
Растворенный кислород	5,10–15,0	7,00–14,5	8,40–11,0	8,76–12,3	7,10–11,7
Хлориды	4,30–6,40	1,60–5,30		0,40–6,20	2,40–4,30
Сульфаты	2,00–15,7	1,00–12,4	14,6–18,2	0,60–12,2	1,60–9,50
ЛООВ по БПК ₅	1,57–1,98	1,00–3,89	1,60–2,20	1,00–1,77	2,50–4,00
Азот аммонийный	н. о.–0,93	н. о.–0,96	0,06–0,48	н. о.–0,89	0,10–0,96
Азот нитритный	н. о.–0,022	н. о.–0,008	н. о.–0,007	н. о.–0,016	н. о.–0,022
Азот нитратный	н. о.–0,102	н. о.–0,040	н. о.–0,030	н. о.–0,080	н. о.–0,060
Фосфор фосфатный	0,010–0,188	0,030–0,396		0,030–0,290	0,010–0,142
Фенолы	н. о.–0,005	н. о.–0,003	н. о.–0,003	н. о.–0,005	н. о.–0,006
Нефтяные углеводороды	н. о.–0,53	0,01–0,52	0,09–0,55	н. о.–0,60	н. о.–0,65
Соединения железа	0,10–1,53	0,10–1,98		0,10–1,62	0,10–1,10
Соединения меди	н. о.–0,007	н. о.–0,005	0,001–0,002	н. о.–0,017	н. о.–0,006
Соединения цинка	н. о.–0,024	н. о.–0,036		н. о.–0,037	н. о.–0,086
Соединения никеля	н. о.–0,004	н. о.–0,004		н. о.–0,016	н. о.–0,003
Соединения марганца	н. о.–0,129	н. о.–0,167		н. о.–0,195	н. о.–0,278

Примечание: н. о. – ниже предела обнаружения.

ТАБЛИЦА 6. Состояние устьевых участков рек Обско-Тазовской губы по интегральным гидрохимическим показателям

Устьевой участок реки	Растворенный кислород		ЛООВ (по БПК ₅)		Азот аммонийный	
	МИ, мг/дм ³	Состояние	МИ, мг/дм ³	Состояние	МИ, мг/дм ³	Состояние
Обь, г. Салехард	0,28–2,72	Переходное из катастрофического в кризисное	1,57–1,98	Равновесное	н. о.–0,93	Переходное из естественного в кризисное
Надым, г. Надым	1,20–7,20	Переходное из катастрофического в равновесное	1,00–3,89	Переходное из равновесного в кризисное	н. о.–0,96	Переходное из естественного в кризисное
Ныда, пос. Ныда	5,19–11,3	Естественное	1,60–2,20	Переходное из равновесного в кризисное	0,06–0,48	Равновесное
Пур, г. Самбург	0,70–4,50	Переходное из катастрофического в равновесное	1,00–1,77	Равновесное	н. о.–0,89	Переходное из естественного в кризисное
Таз, пос. Тазовский	1,20–5,80	Переходное из критического в равновесное	2,50–4,00	Кризисное	0,10–0,96	Переходное из равновесного в кризисное

монийному – в переходном из естественного в кризисное;

– р. Ныда находится по растворенному кислороду в естественном и азоту аммонийному в равновесном, а по ЛООВ (БПК₅) – в переходном из равновесного в кризисное;

– р. Пур находится по растворенному кислороду в переходном из катастрофического в равновесное, азоту аммонийному – в переходном из естественного в кризисное, а по ЛООВ (БПК₅) – в равновесном;

– р. Таз находится по растворенному кислороду в переходном из критического в равновесное, по азоту аммонийному – в переходном из равновесного в кризисное, а по ЛООВ (БПК₅) – в кризисном.

Сформировавшийся в современных условиях компонентный состав водной среды на устьевых участках обследуемых рек позволяет заключить, что физический перенос многих

химических веществ преобладает над внутриводоемными процессами их трансформации, и поэтому заметная доля их количества может достигать устьевых областей рек.

Расчет притока приоритетных ингредиентов компонентного состава водной среды на устьевых участках рек на замыкающих створах, проведенный с использованием гидрологической и гидрохимической режимной информации, показал значительные временную и межсистемную изменчивости их объема [15].

Результаты, приведенные в табл. 7, показали, что наиболее высокими объемами притока на замыкающие створы рек, впадающих в Обско-Тазовскую губу, по всем растворенным химическим соединениям выделяется р. Обь, которая является основным поставщиком легкоокисляемых органических веществ, минеральных форм азота, нефтяных углеводородов и соединений железа. Объемы притока приоритетных

ТАБЛИЦА 7. Объемы и модуль притока приоритетных химических соединений с речным стоком в устьевые участки рек Обско-Тазовской губы

Ингредиент	Объемы притока приоритетных химических соединений (тыс. т/км в год, над чертой) и модуль притока (т/км ² в год, под чертой)			
	р. Обь, г. Салехард	р. Надым, г. Надым	р. Пур, г. Самбург	р. Таз, пос. Тазовский
ЛООВ по БПК ₅	<u>324–1383</u> 0,133–0,569	<u>27,4–66,6</u> –	– –	<u>48,0–118</u> 0,480–1,18
Азот аммонийный	<u>136–1007</u> 0,056–0,200	<u>3,59–16,2</u> –	<u>9,15–115,4</u> 0,096–0,475	<u>10,2–37,7</u> 0,102–0,377
Азот нитритный	<u>2,80–14,7</u> 0,001–0,006	<u>0,051–0,304</u> –	<u>0,079–1,41</u> 0,0008–0,015	<u>0,116–0,768</u> 0,001–0,008
Соединения железа	<u>223–981</u> 0,092–0,403	<u>3,0–45,0</u> –	<u>32,6–88,7</u> 0,343–0,933	<u>11,5–75,2</u> 0,110–0,752
Соединения меди	<u>0,878–8,15</u> 0,0004–0,003	<u>0,008–0,395</u> –	<u>0–1,79</u> 0–0,019	<u>0–0,468</u> 0–0,005
Соединения цинка	<u>0,197–20,8</u> 0,0001–0,008	<u>0,009–1,55</u> –	<u>0,171–3,63</u> 0,002–0,038	<u>0,019–1,89</u> 0,0002–0,019
Соединения никеля	<u>0–7,16</u> 0–0,003	<u>0–0,93</u> –	<u>0–3,52</u> 0–0,037	<u>0–0,113</u> 0–0,001
Фенолы	<u>0–0,5,70</u> 0–0,002	<u>0–0,155</u> –	<u>0–0,277</u> 0–0,003	<u>0–0,347</u> 0–0,004
Нефтяные углеводороды	<u>84,2–631</u> 0,035–0,259	<u>3,10–23,8</u> –	<u>4,62–37,1</u> 0,048–0,390	<u>6,62–26,9</u> 0,066–0,269

химических соединений на замыкающие створы устьевых участков других исследуемых рек на порядок и более уступают объемам их притока в р. Обь.

Вполне обоснованно можно сделать заключение о том, что устьевые участки Обско-Тазовской губы функционируют в условиях уже длительной внешней антропогенной нагрузки, в первую очередь за счет поступления многих загрязняющих веществ с речным стоком.

Учитывая основные положения, изложенные ранее в руководящих документах Росгидромета по комплексной оценке степени загрязненности поверхностных вод [12], оценка уровня антропогенной нагрузки выполнена по изменчивости объемов стока таких приоритетных для оценки изменчивости состояния водных экосистем как

азот аммонийный, ЛООВ (по БПК₅) и нефтяные углеводороды. Принимая во внимание значительные различия исследуемых устьевых участков по объемам водного стока и площади водосбора, для сравнительной оценки изменчивости антропогенной нагрузки использованы модули стока этих соединений.

Результаты проведенной оценки показали, что обследуемые устьевые участки испытывают нагрузку (табл. 8) по:

– азоту аммонийному – от критической (р. Обь) до переходной, от высокой к очень высокой (реки Пур, Таз);

– ЛООВ (по БПК₅) – от умеренной (р. Обь) до критической (р. Надым);

– нефтяным углеводородам – от критической (реки Обь, Таз) до переходной, от критической к высокой (реки Надым, Пур).

ТАБЛИЦА 8. Антропогенная нагрузка на устьевых участках рек

Устьевой участок реки	Антропогенная нагрузка по модулю притока, т/км ² в год					
	азота аммонийного		ЛООВ (по БПК ₅)		нефтяных углеводородов	
	диапазон максимальных значений	нагрузка	диапазон максимальных значений	нагрузка	диапазон максимальных значений	нагрузка
Обь, г. Салехард	0,16–0,20	Критическая	0,33–0,57	Умеренная	0,12–0,26	Критическая
Надым, г. Надым	0,28–0,34	Переходная от критической к высокой	1,00–1,39	Критическая	0,27–0,50	Переходная от критической к высокой
Пур, г. Самбург	0,22–0,48	Переходная от высокой к очень высокой	Нет данных	Нет данных	0,21–0,39	Переходная от критической к высокой
Таз, пос. Тазовский	0,27–0,38	Переходная от высокой к очень высокой	0,98–1,20	Переходная от умеренной к критической	0,21–0,27	Критическая

Характер пространственно-временной изменчивости компонентного состава водной среды, сформировавшегося «природного фона» и объемов притока с речным стоком приоритетных загрязняющих веществ отчетливо показывает, что устьевые экосистемы Обско-Тазовской устьевой области функционируют в условиях постоянной или временной внешней антропогенной нагрузки за счет поступления многих химических веществ с речным стоком и находятся под определяющим влиянием геоэкологического состояния их водосборов.

Библиографический список

1. Указ Президента Российской Федерации от 05.03.2020 г. № 164 «Об основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года». – URL : <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202003050019> (дата обращения : 27.07.2020 г.).
2. Арктика на пороге третьего тысячелетия (ресурсный потенциал и проблемы экологии) / под ред. И. С. Грамберга, Н. П. Лаверова. – СПб. : Наука, 2000. – 247 с.
3. Евсеев А. В. Эколого-географические особенности состояния природной среды районов Крайнего Севера России / А. В. Евсеев, Т. М. Красовская. – Смоленск : Изд-во СГУ, 1996. – 232 с.
4. Алексеевский Н. И. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / Н. И. Алексеевский. – М. : ГЕОС, 2007. – 585 с.
5. Зильчек Г. Е. Экологические проблемы Российской Арктики / Г. Е. Зильчек, Т. М. Красовская, А. В. Цыбанов, В. В. Гилюканов, Е. Н. Селина // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. Обзорная информация. – 1996. – Вып. 7. – С. 1–46.
6. Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: гидролого-морфологические процессы, геоморфологический прогноз развития / под ред. В. Н. Коротаева, В. Н. Михайлова, Д. Б. Бабич, Ли Цзунсяна и Люшишана. – М. : ГЕОС, 2007. – 445 с.

7. Михайлов В. Н. Гидрология / В. Н. Михайлов, А. Д. Добровольский, С. А. Добролюбов. – М. : Высшая школа, 2005. – 463 с.
8. Михайлов М. В. Современное состояние и перспективы гидрологии устьев рек / М. В. Михайлов, В. Н. Михайлов // Избр. труды Ин-та водных проблем РАН : 1967–2017. – В 2 т. – М. : КУРС, 2007. – С. 253–280.
9. Михайлов В. Н. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей – эстуариев / В. Н. Михайлов, С. Л. Горин // Водные ресурсы. – 2012. – Т. 39. – № 3. – С. 243–257.
10. Михайлов М. В. Многолетние изменения строения речных дельт / М. В. Михайлов // Водные ресурсы. – 2016. – Т. 43. – № 5. – С. 488–501.
11. Михайлов В. Н. Дельты как индикаторы естественных и антропогенных изменений режима рек и моря / В. Н. Михайлов, М. В. Михайлов // Водные ресурсы. – 2003. – Т. 30. – № 6. – С. 602–612.
12. РД 52.24.643–2002 МУ. Методические указания. Охрана природы. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям. – СПб. : Гидрометеопиздат, 2003. – 33 с.
13. Верниченко А. А. Классификация поверхностных вод, основывающаяся на оценке их качественного состояния / А. А. Верниченко // Комплексные оценки качества поверхностных вод / под ред. А. М. Никанорова и др. – Л. : Гидрометеопиздат, 1989. – С. 14–24.
14. РД 52.24.661–2004. Рекомендации. Оценка риска антропогенного воздействия приоритетных загрязняющих веществ на поверхностные воды суши. – М. : Метеоагентство Росгидромета, 2006. – 25 с.
15. Никаноров А. М. Реки России. Ч. II. Реки Европейского Севера и Сибири (гидрохимия и гидроэкология) : монография / А. М. Никаноров, В. А. Брызгалов. – Ростов н./Д. : НОК, 2010. – 296 с.

Дата поступления: 08.06.2020

Решение о публикации: 18.06.2020

Контактная информация:

ТРЕТЬЯКОВ Михаил Вячеславович – канд. геогр. наук; tmv@aari.ru

БРЫЗГАЛО Валентина Александровна – канд. хим. наук; vbyzgalo@yandex.ru

РУМЯНЦЕВА Елена Владимировна – канд. геогр. наук; rev@aari.ru

Estuarial river zones as indicators of anthropogenic changes of geo-ecological condition of the estuarial areas in the Arctic region of the Russian Federation

M. V. Tretiakov, V. A. Bryzgalov, E. V. Rumiantseva

Arctic and Antarctic Research Institute, 38, Bering ul., Saint Petersburg, 199397, Russian Federation

For citation: Tretiakov M. V., Bryzgalov V. A., Rumiantseva E. V. Estuarial river zones as indicators of anthropogenic changes in geo-ecological condition of the estuarial areas in the Arctic region of the Russian Federation. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 311–323. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-311-323

Summary

Objective: To assess changes in geo-ecological condition of estuarial river zones in the Arctic region of the Russian Federation. **Methods:** It is suggested to consider the condition of estuarial river zones in the Arctic region as an integral indicator of anthropogenic changes in geo-ecological state of the territories, being part of catchment areas. Estuarial river zones of the Ob-Tazovsky estuarial area are treated as the study object. **Results:** It was demonstrated that the estuarial ecosystems of the Ob-Tazovsky estuarial area function under the conditions of constant or temporary external anthropogenic load due to a vast

quantity of chemicals that comes with the river flow, thus, the former depend mainly on geo-ecological condition of the catchment areas. **Practical importance:** The obtained data allow for a deeper insight into changeability (evolution) of an abiotic componentry of estuarial zones in the arctic rivers under the influence of development pressure on the environment of the Russian Arctic coast, taking into account the increasing commercial exploitation of the lucrative resources of the Arctic region.

Keywords: Arctic, geo-ecological condition, estuarial river zone, the Ob-Tazovsky estuarial area, fractional analysis of aquatic environment.

References

1. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 05.03.2020 g. no. 164 "Ob osnovakh gosudarstvennoy politiki Rossiyskoy Federatsii v Arktike na period do 2035 goda" [Order of the President of the Russian Federation dated March 5th, 2020, N 164 "On foundations of the state policy of the Russian Federation in the Arctic region for the period through to 2035"]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202003050019> (accessed: July 27, 2020) (In Russian)
2. Arktika na poroge tretiego tysyacheletiya (resursniy potencial i problem ekologii) [The Arctic at the turn of the third millennium (resource potential and environmental problems)]. Edited by I. S. Gramberg, N. P. Laverov. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2000, 247 p. (In Russian)
3. Evseev A. V. & Krasovskaya T. M. Ekologo-geograficheskiye osobennosti sostoyaniya prirodnoy sredy rayonov Krainego Severa Rossii [Environmental and geographical features of the Russian Far North areas]. Smolensk, SGU [Smolensk State University] Publ., 1996, 232 p. (In Russian)
4. Alekseevskiy N. I. Geoekologicheskoye sostoyaniye arkticheskogo poberezhya Rossii i bezopasnost prirodopolzovaniya [Geo-ecological condition of the Russian arctic coast and nature management safety]. Moscow, GEOS Publ., 2007, 585 p. (In Russian)
5. Zilchek G. E., Krasovskaya T. M., Tsybanov A. V., Gilyukanov V. V. & Selina E. N. Ekologicheskiye problem Rossiyskoy Arktiki [Ecological problems of the Russian Arctic]. *Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnikh resursov. Obzornaya informatsiya* [Problems of environment and natural resources. Background information], 1996, iss. 7, pp. 1–46. (In Russian)
6. Estuarno-deltoviye sistemy Rossii i Kitaya: gidrologo-morfologicheskkiye protsessy, geomorfologicheskii prognoz razvitiya [Estuarial-deltaic systems of Russia and China: hydrological and physiographic processes, geomorphological forecast]. Edited by V. N. Korotaev, V. N. Mikhailov, D. B. Babich, Li Tszunshyan and Lyushishchana. Moscow, GEOS Publ., 2007, 445 p. (In Russian)
7. Mikhailov V. N., Dobrovolskiy A. D. & Dobrolyubov S. A. *Gidrologiya* [Hydrology]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005, 463 p. (In Russian)
8. Mikhailov M. V. & Mikhailov V. N. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy gidrologii ustiyev rek [Modern condition and prospects of the river mouth hydrology]. *Izbrannyye trudy Instituta vodnykh problem RAN* [Selected works of Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences]: 1967–2017. In 2 vol. Moscow, KURS Publ., 2007, pp. 253–280. (In Russian)
9. Mikhailov V. N. & Gorin S. L. Novyye opredele-niya, raionirovanie i tipizatsiya ustyevykh oblastey rek i ikh chastey – estuariy [New definitions, zoning and typification of estuarial areas of rivers and their parts – estuaries]. *Vodniye resursy* [Water resources], 2012, vol. 39, no. 3, pp. 243–257. (In Russian)
10. Mikhailov M. V. Mnogoletniye izmeneniya stroyeniya rechnykh del't [Long-term changes of the structure of river deltas]. *Vodniye resursy* [Water resources], 2016, vol. 43, no. 5, pp. 488–501. (In Russian)
11. Mikhailov V. N. & Mikhailov M. V. Delt'y kak indikator estestvennykh i antropogennykh izmeneniy rezhima rek i more [Deltas as indicators of natural and anthropogenic changes of river and sea behavior]. *Vodniye resursy* [Water resources], 2003, vol. 30, no. 6, pp. 602–612. (In Russian)
12. RD 52.24.643–2002 MU. *Metodicheskkiye ukazaniya. Okhrana prirody. Metod kompleksniy otsenky stepeny zagryaznennosti poverkhnostnykh vod sushy po gidrokhimicheskim pokazatelyam* [Guidance Document RD 52.24.643–2002 MU. Guidelines. Nature protection.

Comprehensive assessment of surface water pollution level based on hydrochemical indices. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 2003, 33 p. (In Russian)

13. Vernichenko A. A. Klassifikatsiya poverkhnostnykh vod, osnovyvyayushchayasya na otsenke ikh kachestvennogo sostoyaniya [Surface water classification based on its quality assessment]. *Kompleksniye otsenky kachestva poverkhnostnykh vod* [Comprehensive assessment for surface-water quality]. Edited by A. M. Nikanorov et al. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989, pp. 14–24. (In Russian)

14. RD 52.24.661–2004. *Rekomendatsii. Otsenka riska antropogenного vozdeistviya prioritetnykh zagryaznyayushchikh veshchestv na poverkhnostniye vody sushy* [Guidance Document RD 52.24.661–2004. *Recommendations. Risk assessment of anthropogenic impact of polluting substances on surface water of dry land*]. Moscow,

Meteoagenstvo Rosgidrometa [Meteorological agency of Roshydromet] Publ., 2006, 25 p. (In Russian)

15. Nikanorov A. M. & Bryzgalov V. A. *Reky Rossii. Ch. II. Reky Evropeiskogo Severa i Sibiry (gidrokhimiya i gidroekologiya)* [Russian Rivers. Pt II. Rivers of the European North and Siberia (hydrochemistry and hydroecology)]. Monograph. Rostov-on-Don, NOK [Science Education Culture] Publ., 2010, 296 p. (In Russian)

Received: June 08, 2020

Accepted: June 18, 2020

Author's information:

Mikhail V. TRETIAKOV – PhD in Geography;
tmv@aari.ru

Valentina A. BRYZGALO – PhD in Chemistry;
vbyzgalov@yandex.ru

Elena V. RUMIANTSEVA – PhD in Geography;
rev@aari.ru



УДК 629.4.05

Анализ методов измерений силового воздействия подвижного состава на путь и систем технического контроля колес при движении поезда

Ю. П. Бороненко¹, Р. В. Рахимов¹, Р. Ю. Григорьев¹, В. В. Попов²

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

² Октябрьская железная дорога, Российская Федерация, 191023, Санкт-Петербург, пл. Островского, 2

Для цитирования: Бороненко Ю. П., Рахимов Р. В., Григорьев Р. Ю., Попов В. В. Анализ методов силового воздействия подвижного состава на путь и систем технического контроля колес при движении поезда // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 324–344. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-324-344

Аннотация

Цель: Выбор перспективных способов выявления дефектов колес подвижного состава на ходу поезда, определение требований к перспективным системам диагностики и необходимой нормативной базе для применения на железных дорогах колеи 1520 мм. **Методы:** Используются статистические, аналитические и графические методы. **Результаты:** Определены преимущества и недостатки существующих систем технического контроля колес, а также сформированы требования по дальнейшему развитию систем диагностики подвижного состава при движении поезда. **Практическая значимость:** Анализ существующих систем технической диагностики подвижного состава на ходу поезда указывает на необходимость перехода от контроля геометрических размеров дефектов на поверхности катания колес к автоматизированному выявлению дефектов по оценке сопутствующих эффектов, сопровождающих качения неисправного колеса по рельсу, и разработки новой нормативной документации в виде ГОСТов по каждому способу измерений, в том числе внесение изменений в Правила технической эксплуатации железных дорог.

Ключевые слова: Подвижной состав, воздействие на путь, динамическая нагрузка, обследование колеса, система технического контроля, схема измерительного участка пути, измерительная зона, диагностика подвижного состава на ходу поезда.

1. Введение

На поверхности катания колес железнодорожного подвижного состава в процессе эксплуатации возникают ползуны, выщербины, на-

вары и другие дефекты, которые существенно увеличивают динамические нагрузки на путь и подвижной состав. Выявление колес с такими дефектами производится осмотрщиками вагонов на слух при встрече поезда с ходом, а затем

после остановки поезда внешним осмотром и измерениями геометрических размеров дефекта. Нахождение и измерение размеров дефекта на колесе является трудоемкой операцией, выполняемой зачастую в сложных погодных условиях, при недостаточной освещенности. Кроме того, в зависимости от положения колеса при остановке поезда дефект может оказаться в зоне, недоступной для измерений.

Поэтому в последние годы наметился переход от измерений геометрии дефектов к определению сил воздействия колес с дефектами на железнодорожный путь или других сигналов, сопровождающих движение колеса, с дефектом на железнодорожные пути.

Такой подход представляется более правильным. Ведь именно динамические силы, возникающие при качении колес с дефектами по рельсам, приводят к усталостным повреждениям рельсов, колес, подшипников и других элементов ходовых частей. В настоящее время в мире разработано около десятка способов выявления дефектных колес, которые в дальнейшем применяются в автоматизированных комплексах диагностики подвижного состава на ходу поезда.

Используемые в различных странах комплексы диагностики отличаются друг от друга способами и средствами измерений сил, системами градуировки, точностью измерений и предельными значениями показателей, по которым проводится браковка колес. В дальнейшем с целью выбора перспективных способов выявления дефектов колес на ходу поезда производится обзор существующих методов и формируются требования к перспективным системам диагностики и необходимой нормативной базе для применения на железных дорогах колеи 1520 мм.

2. Методы измерения вертикального воздействия подвижного состава на железнодорожный путь

Анализ отечественного и мирового опыта оценки вертикального воздействия подвижного

состава на путь позволяет все известные методы классифицировать следующим образом:

- измерения по напряжениям или деформациям в рельсе;
- измерения по усилиям на шпалы;
- измерения по прогибу рельса;
- измерения по ускорениям рельса или других элементов верхнего строения пути;
- измерения по уровню акустической эмиссии;
- измерения по уровню шума;
- совмещенные методы измерения.

По длительности измерений и охвату всей поверхности катания колеса их можно разделить на: точечные (измерения проводятся в момент прохождения датчика колесом); кусочно-непрерывные (измерения проводятся периодически при прохождении части окружности колеса, постепенно охватывая всю поверхность катания); непрерывные (измерения ведутся во время всего оборота колеса или даже нескольких оборотов).

2.1. Измерения по напряжениям или деформациям в рельсе

Измерения сил взаимодействия между колесом и рельсом представляют самостоятельный научный и практический интерес даже при качении колеса без дефектов. Их результаты используются для оценки как прочности самого пути, так и динамических качеств вагонов.

2.1.1. Измерения по кромочным напряжениям в подошве рельса

Поскольку максимальные напряжения возникают в кромках подошвы рельса, то первоначально силы, действующие на рельс от колеса подвижного состава, определяли по их корреляционным зависимостям от полусуммы и полуразности кромочных напряжений, измеренных в одном поперечном сечении рельса датчиками 1 и 2 (рис. 1) [1]. Несмотря на хорошую корреляционную зависимость, погрешность измерения сил, действующих в контакте колеса и

рельса, по кромочным напряжениям в рельсе могла составлять порядка 30 %. Основным недостатком такого способа измерения является зависимость результатов измерений от упругих свойств пути [2].

2.1.2. Измерения по напряжениям в трех точках: в кромках подошвы рельса и в наружном сечении головки рельса

Позже под руководством Е. М. Бромберга был разработан, а в работах [3, 4] О. П. Ершковым теоретически обоснован и практически реализован более точный экспериментальный метод измерения сил, действующих в одном поперечном сечении рельса, путем одновременной регистрации напряжений в трех точках («трехточечный» метод) – измерения напряжений в кромках подошвы рельса (тензорезисторы 1 и 2) и в наружном сечении головки рельса (тензорезистор 3) с последующим вычислением алгебраической комбинации расчетных напряжений (рис. 1). В основе метода лежит разработанная М. Ф. Вериги и О. П. Ершковым теоретическая зависимость между напряжениями в подошве рельса, вызываемыми действием крутящего момента и боковой силы [5].

По данному методу параметры силового воздействия колеса подвижного состава на рельс определяются по формулам [1]

вертикальная сила

$$Q = A_1 S_{\text{нр}}^{\text{п}} + A_2 S_{\text{вр}}^{\text{п}},$$

боковая сила

$$P = B_1 S_{\text{нр}}^{\text{п}} + B_2 S_{\text{вр}}^{\text{п}} + B_3 S_{\text{нр}}^{\text{г}},$$

крутящий момент в сечении

$$M = PL_y - QL_x,$$

где $S_{\text{нр}}^{\text{п}}$, $S_{\text{вр}}^{\text{п}}$, $S_{\text{нр}}^{\text{г}}$ – показания тензорезисторов в наружной, внутренней кромках подошвы и на наружной стороне головки рельса; L_y – превышение плоскости действия боковой силы над

центром изгиба сечения; L_x – эксцентриситет приложения вертикальной нагрузки относительно продольной оси рельса; A_1, A_2, B_1, B_2, B_3 – расчетные коэффициенты, определяемые по положению мест наклейки тензорезисторов, плоскости приложения боковой силы и размеров элементов сечения рельса.

Следует отметить, что точность измерения напряжений в рельсе при применении данного метода практически не зависит от возможного на практике выбора места для установки тензорезисторов в одном поперечном сечении рельса. Однако из-за отсутствия в то время вычислительных мощностей «трехточечный» метод О. П. Ершкова в последующем был заменен на метод Шлюмпфа, который в дальнейшем был включен в ГОСТ Р 55050–2012 [6].

2.1.3. Измерения по нормальным напряжениям на шейке рельса

В настоящее время на железных дорогах России для определения сил в контакте колеса и рельса применяется ГОСТ Р 55050-2012, основанный на измерении нормальных напряжений тензорезисторами 4, 5 (рис. 1), установленными вертикально с двух сторон в одном сечении на нейтральной оси шейки рельса, по сумме которых вычисляются вертикальные силы. Тензорезисторы 6–9 определяют боковые силы. Такая схема измерения вертикальных сил мало зависит от горизонтальной силы и эксцентриситета вертикальной силы.

Непосредственно величина вертикальных динамических сил между колесом и рельсом не ограничивалась, а устанавливалась допускаемая динамическая погонная нагрузка на железнодорожный путь от тележки:

$$q = \frac{nP_0(1 + K_{\text{до}}^{\text{пг}})}{l + 2,2},$$

где n – число осей в тележке; P_0 – статическая осевая нагрузка от колесной пары на рельсы; l – расстояние между крайними осями в группе; $K_{\text{до}}^{\text{пг}}$ – коэффициент, равный отношению дина-

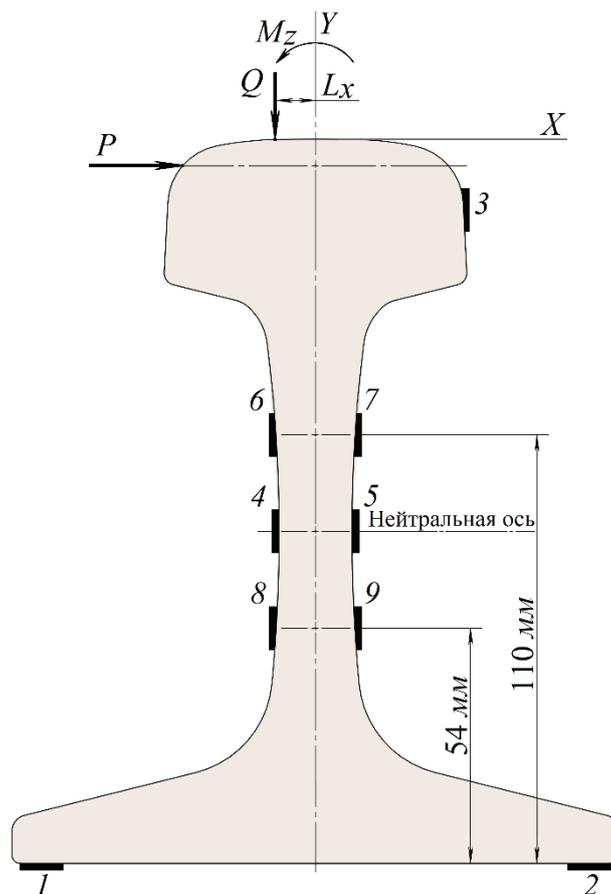


Рис. 1. Варианты наклейки тензорезисторов на шейку рельса для определения силового воздействия подвижного состава на путь:

1–9 – номера тензорезисторов; Q – вертикальная сила; P – боковая сила; M_z – изгибающий момент; X, Y – направления осей системы координат

мической составляющей вертикальной силы, действующей на подрессоренную массу, возникающей от колебаний подпрыгивания и галопирования, к ее статической составляющей. То есть в первоначальном варианте этого ГОСТа силы в контакте колеса и рельса самостоятельного значения не имели.

В 2014 г. ГОСТ Р 55050–2012 был дополнен Изменением № 1, в котором как показатели допустимого воздействия на железнодорожный путь введены вертикальные силы от колес подвижного состава, имеющие дефекты на поверхности катания, и рекомендовано с их помощью выявлять колеса с дефектами на поверхности катания.

Для обнаружения дефектов предлагается оборудовать участок пути длиной не менее одной

длины окружности колеса у измерительной аппаратуры, увеличить частотный диапазон до 1 кГц и установить скорость движения при измерениях не менее 25 км/ч. При вертикальных силах 370–450 кН вагон может следовать до ближайшего пункта технического обслуживания вагонов, где должно быть проведено определение геометрических размеров дефекта. При силах свыше 450 кН вагон подлежит немедленной отцепке для замены колесной пары. Однако в Изменении № 1 не регламентировались ни методика измерения сил, ни требования к количеству устанавливаемых датчиков. В литературе отсутствуют публикации об апробации этого ГОСТа, а некоторые попытки создания измерительных участков на основе рекомендаций Изменения

№ 1 на Горьковской и Западно-Сибирской железных дорогах так и не привели к положительным результатам.

На рис. 2 показана схема измерительного участка межшпального промежутка рельса для выявления дефектов колес с 24 парами тензорезисторов для измерения вертикальных сил, установленными через 136 мм на длине 3264 мм, превышающей длину окружности колеса. Даже при такой частой установке тензорезисторов вероятность попадания дефектов за оборот колеса на датчик менее 20 %.

Практика применения ГОСТ Р 55050–2012 показала его недостаточную точность и в измерении боковых сил. Поэтому в настоящее время подготовлен проект нового стандарта [7], в котором заменено измерение боковых сил с метода Шлюмпфа на метод «РЖД–2016» [8]. Принци-

пиальное отличие метода «РЖД–2016» состоит в совместном измерении боковой и вертикальной сил, а также суммарного момента в поперечном сечении рельса при движении по нему подвижного состава при любом положении точки контакта в системе «колесо–рельс». Три указанных компонента полностью определяют нагруженность поперечного сечения рельса [9].

Для измерения сил, действующих на головку рельса, метод предусматривает установку четырех тензорезисторов симметрично на обе стороны шейки рельса. Регистрация сигналов осуществляется с каждого тензорезистора отдельно. При этом для получения выходных сигналов тензорезисторы 6–9 (см. рис. 1) соединяются в четыре измерительных моста, и каждый измерительный мост содержит по одному рабочему тензорезистору и три компенсационных

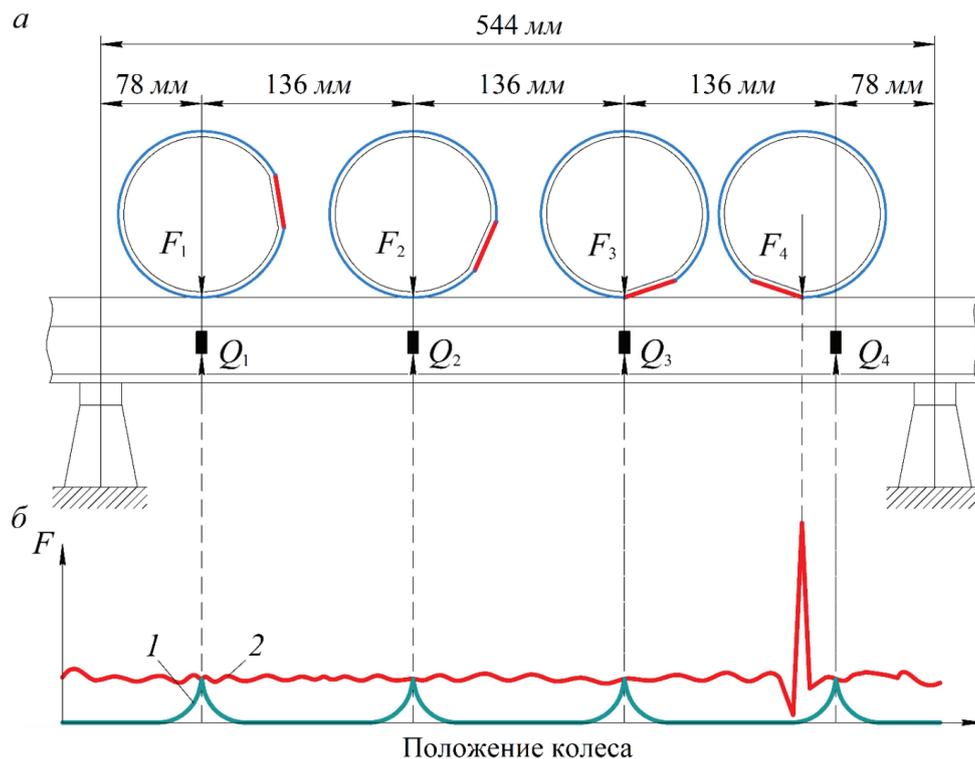


Рис. 2. Схема измерительного межшпального участка пути, основанная на измерении нормальных напряжений на шейке рельса:

a – схема расположения датчиков; $б$ – записи возникающих сил (то же для рис. 5, 6, 7, 12); 1 – усилия, регистрируемые датчиками; 2 – вертикальная сила, действующая на рельс от колеса с ползуном; $F_1–F_4$ – восстанавливаемые вертикальные усилия; $Q_1–Q_4$ – поперечные усилия на рельсе

тензорезистора, которые через тензоусилители подключаются к регистрирующим устройствам.

Для получения связи между показаниями тензорезисторов и силовыми воздействиями по методу «РЖД–2016» проводятся тарировочные эксперименты, включающие в себя четыре варианта нагружения измерительного сечения рельса: вертикальной силой в середине головки рельса; одновременно вертикальной силой в середине головки рельса и боковой силой; вертикальной силой, смещенной на L_x наружу от середины головки рельса; вертикальной силой, смещенной на L_x внутрь от середины головки рельса. В результате тарировок с использованием линейной суперпозиции из показаний тензорезисторов S формируется матрица влияния $[G]$ и вычисляется псевдообратная матрица $[G]^+$ к матрице $[G]$, что позволяет получить в каждый момент времени t возможность определять фактические значения силовых факторов, действующих на головку рельса от колес подвижного состава, по поступающим сигналам тензорезисторов по матричному уравнению

$$\{F \{S(t)\}\} = \begin{Bmatrix} Q(t) \\ P(t) \\ M_z(t) \end{Bmatrix} = [G]^+ \cdot \{S(t)\}.$$

В работе [9] по результатам расчетов методом конечных элементов установлено, что восстановление вертикальных сил с помощью метода «РЖД–2016», как и ГОСТ Р 55050–2012, дает погрешность не более 1,5%. Однако, если дефект поверхности катания не придется на измерительное сечение, погрешность в зависимости от величины дефекта может достигать 200–300%. Поэтому проект нового межгосударственного стандарта «Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний» не предусматривает его использования для диагностики колес подвижного состава. ГОСТ Р 55050–2012 остается действующим, но, на наш взгляд, необходима разработка отдельного ГОСТа для измерения воздействия на путь колес с дефектами.

Было установлено, что системы диагностики с использованием методов измерений по нормальным напряжениям, в том числе методы, согласно ГОСТ 5050–2012 и «РЖД–2016», не могут выявлять дефекты на поверхности катания колес, оказывающие короткие ударные воздействия, так как величина измерительной зоны мала [10, 11].

2.1.4. Измерения по деформации отверстия в рельсе

В работах [12–14] предлагается одновременно измерять вертикальные и боковые силы, приложенные колесами к рельсам, по деформации отверстия в рельсе. При этом в [13] для измерения обеих сил цилиндрические датчики, смонтированные на двух кольцеобразных вкладышах, с применением фиксирующих плоских шайб и болтового соединения монтируются в отверстия, высверленные в шейке рельса в зоне горизонтальной нейтральной оси поперечного сечения рельса, где каждая составляющая силы может измеряться отдельно. Аналогичным образом в [14] разработан простой преобразователь, который позволяет отделить эффекты вертикальной силы от боковых, поместив его в отверстиях, сделанных в шейке рельса вблизи центра поперечного кручения рельса.

При прохождении колесной пары измерительной зоны рельсы претерпевают деформацию, которая пропорционально деформирует чувствительную втулку (рис. 3). Механические изменения втулки преобразуются в электрический сигнал пропорционально вертикальной силе, нагружаемой на рельс. Область измерения предлагаемыми датчиками может составлять от 16 до 32 датчиков. Основными недостатками методов являются нарушение целостности рельса и точечная оценка сил.

2.1.5. Измерения по касательным напряжениям на шейке рельса

Дальнейшим развитием методов измерения сил, действующих в контакте колеса подвижно-

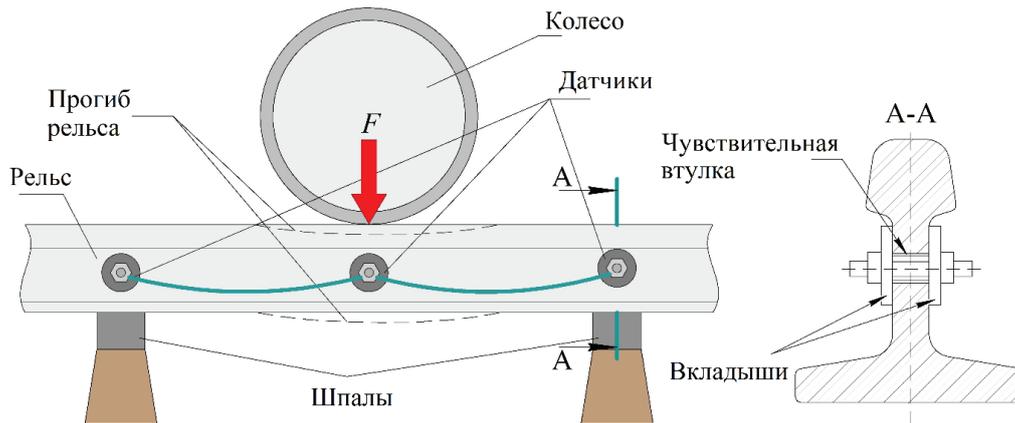


Рис. 3. Схема расположения датчиков с отверстием в рельсе

го состава с рельсом, существенно увеличивающим объем регистрируемых экспериментальных данных, является тензометрическая схема «кусочно-непрерывной» регистрации [15].

Данная схема измерения вертикальной силы, так называемый метод измерений поперечной силы, широко применяется на железных дорогах зарубежных стран и состоит из двух комплексов тензорезисторов, устанавливаемых на нейтральной оси шейки рельса под углом 45° симметрично относительно середины межшпального промежутка, формирующих полный мост Уитстона, где сигналы из восьми тензорезисторов суммируются [16, 17]. При такой схеме измеряется разность сдвигов между двумя сечениями, расположенными на некотором расстоянии друг от друга в пределах одного межшпального промежутка, и поэтому на результатах не отражается фактическое положение вертикальной нагрузки. При этом полностью исключается воздействие боковой силы, которое вызывает сдвиг, изгиб в горизонтальной плоскости и кручение рельса. Таким образом, получается постоянное измеренное значение для нескольких десятков сантиметров, обеспечивая более надежные измерения.

Такая схема «кусочно-непрерывной» регистрации сил, учитывающая специфику отечественных железнодорожных путей, разработана, теоретически обоснована и экспериментально проверена в работах [15, 18]. Наилучшая точ-

ность восстановления вертикальной силы на типовой конструкции верхнего строения железнодорожного пути в «Пространстве – 1520», который имеет существенные отличия от путей колеи 1435 мм, по разработанному методу [19] измерений касательных напряжений в двух сечениях рельса обеспечивается при установке тензорезисторов на расстоянии 204 мм от центра межшпального промежутка (расстояние между измерительными сечениями 408 мм) с длиной измерительной зоны примерно 220 мм (рис. 4), что позволяет измерить вертикальные силы, действующие от колеса на рельс, с относительной погрешностью не более 3 % и, следовательно, обнаружить дефекты на поверхности катания колес с минимальной глубиной.

Данный метод является классическим способом непрерывной регистрации вертикальных усилий и широко применяется в полевых условиях для определения дефектов на поверхности катания колеса (рис. 5).

В США для проверки состояния колес и предупреждения дефектов, влияющих на безопасность движения, применяется система диагностики Wheel Impact Load Detector (WILD) [20], реализованная по измерению касательных напряжений в двух сечениях рельса. Система диагностики WILD имеет измерительный участок общей длиной 16 м, который устанавливается на железнодорожный путь над 25 шпалами. Конструктивно участок состоит из трех обла-

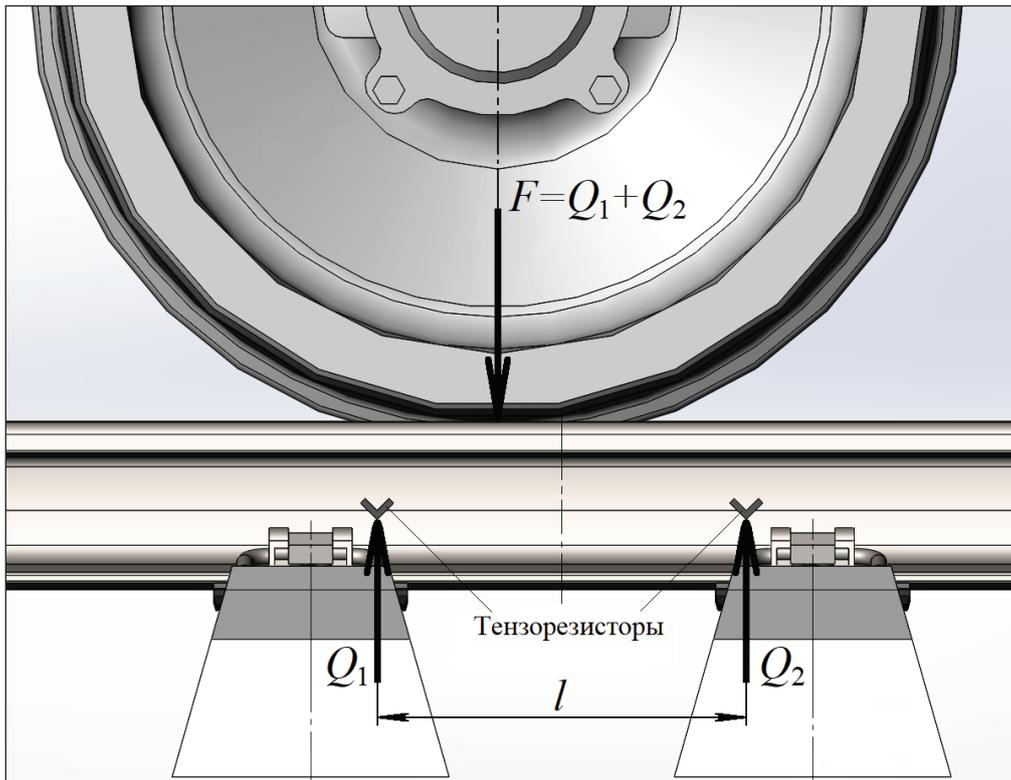


Рис. 4. Схема кусочно-непрерывной регистрации вертикальных сил по измерению касательных напряжений в двух сечениях рельса:

l – расстояние между тензорезисторами(обозначения см. рис. 2)

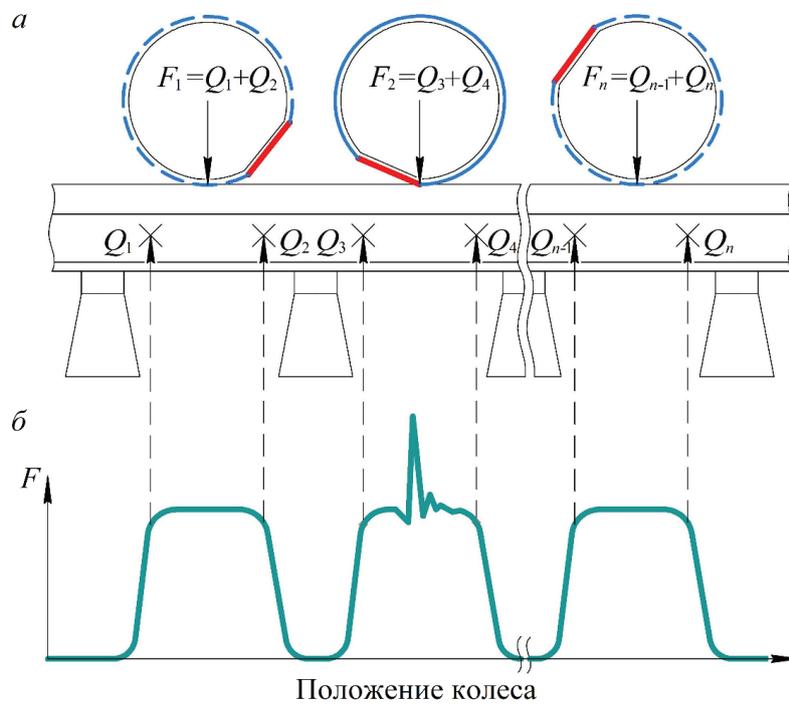


Рис. 5. Схема измерительного участка пути с реализацией метода кусочно-непрерывной регистрации вертикальных сил по измерению касательных напряжений в двух сечениях рельса (обозначения см. рис. 2)

стей регистрации: центральной и двух боковых. Расстояние между зонами ограничивается тремя шпалами, где длина центральной зоны – семь шпал, а боковых зон – шесть. При движении подвижного состава по измерительному участку пути со скоростью от 40 до 300 км/ч тензорезисторы, размещенные на шейке рельса, регистрируют значения сил, передаваемые от колеса на рельс. Сигнал с выхода мостовой схемы направляется в центральный процессор системы. Если сигнал превышает заданный критический уровень, то в центр управления движением направляется предупреждение об этом. Такая система позволяет выявлять длинные неровности на колесных парах при высоких скоростях движения, которые являются причиной наибольшего динамического возмущения, не поддающегося визуальному выявлению.

Все вышерассмотренные методы измерения силового воздействия колеса с рельсом основаны на использовании тензорезисторов, устанавливаемых на рельсе, отличаются расположением тензорезисторов и спецификой обработки получаемых сигналов. В мировой практике экспериментальных исследований также известны другие различные методы измерения сил, возникающих в месте контакта колеса подвижного состава с рельсом.

2.2. Измерения по усилиям на шпалы

Другим способом измерения сил, передающихся колесами на рельсы, также являются методы, где регистрация осуществляется с помощью силоизмерительных элементов, установленных на рельсовых подкладках (прокладках) различных типов, адаптированных к конструкции рельсовых скреплений на измерительных участках пути [2, 21, 22].

Метод измерения воздействий на шпалы лежит в основе существующих систем диагностики Sensorline и Multirail WheelScan. Отличием этих систем является применение волоконно-оптических датчиков, где измерительный элемент располагается между подошвой рельса

и шпалой. При воздействии колеса на шпалу волоконно-оптический датчик претерпевает деформацию, ограничивающую доступ света внутри датчика на определенное количество. При этом принимаемое количество света преобразуется в электрический сигнал, который перемещается через обрабатывающие устройства с выводом на монитор оператора. Использование оптоволоконной техники позволяет устранить электрические шумы, возникающие в традиционной измерительной аппаратуре. Методы измерения по усилиям на шпалы сложны в плане учета жесткости балласта, рельсовых подкладок, в том числе влияния соседних колес и применения способа в целом. Данный метод используется в нескольких исполнениях: измерения по усилиям на шпалы с длинным рельсом и коротким рельсом (изолированный блок).

2.2.1. Измерения по усилиям на шпалы коротким рельсом (изолированный блок)

Метод определения нагрузок на рельс с помощью изолированного блока связан с изолированием зоны измерений за счет зазоров между рельсами (рис. 6).

На большинстве дорог короткие рельсы не допускаются, поэтому способ применяют в основном в отдельных участках пути при низких скоростях движения подвижного состава.

2.2.2. Измерения по усилиям на шпалы длинным рельсом

Для заблаговременного обнаружения нарушений целостности поверхности катания колесной пары во многих зарубежных странах реализуется диагностическая система Sensorline [23], основанная по измерению сил, которые передаются колесами шпалам с помощью встраиваемых датчиков (рис. 7), разработанных на основе волоконно-оптических технологий. За счет нагрузки колесной пары на рельсы увеличиваются силы реакции в системе «рельс–шпала», вызывающие деформацию датчика.

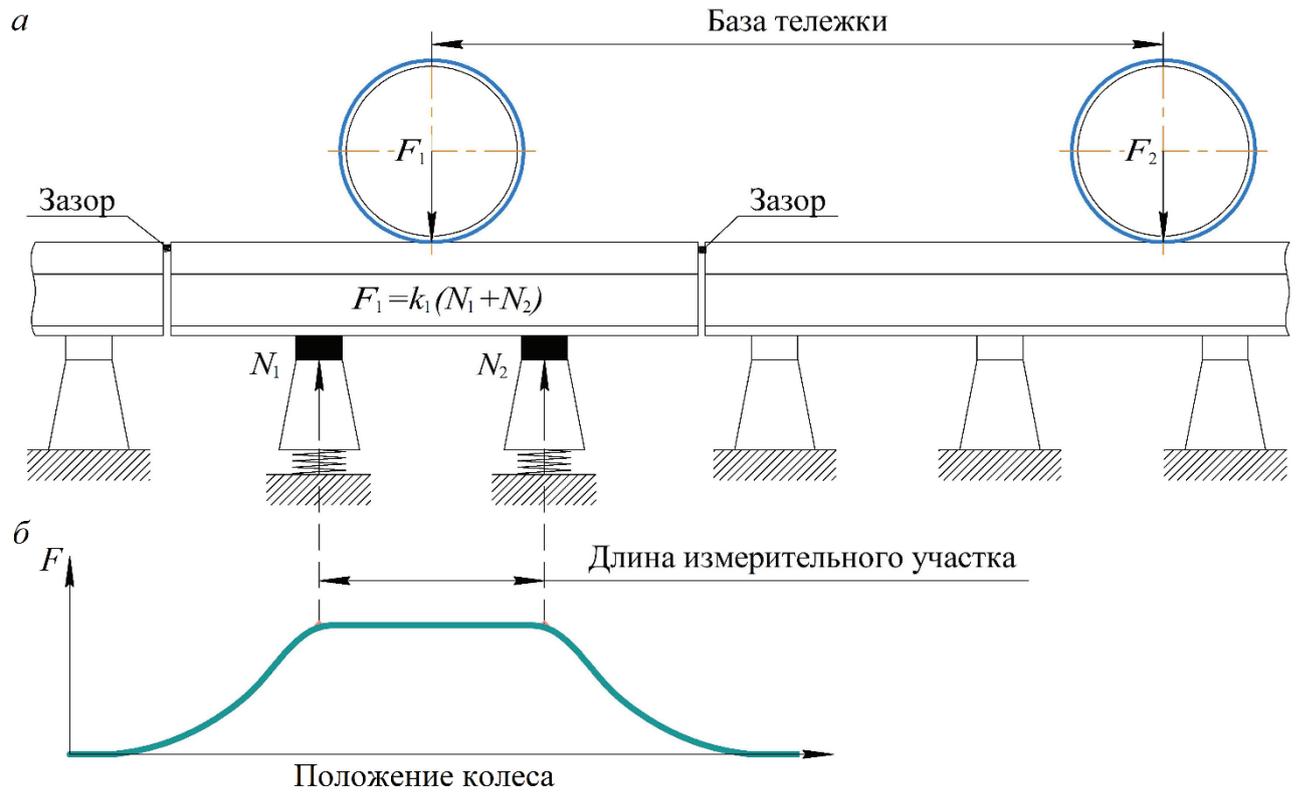


Рис. 6. Схема измерительного участка пути с измерением нагрузки на шпалы коротким рельсом (изолированный блок): k_1 – весовой коэффициент; N_1-N_2 – усилия на шпалы (обозначения см. рис. 2)

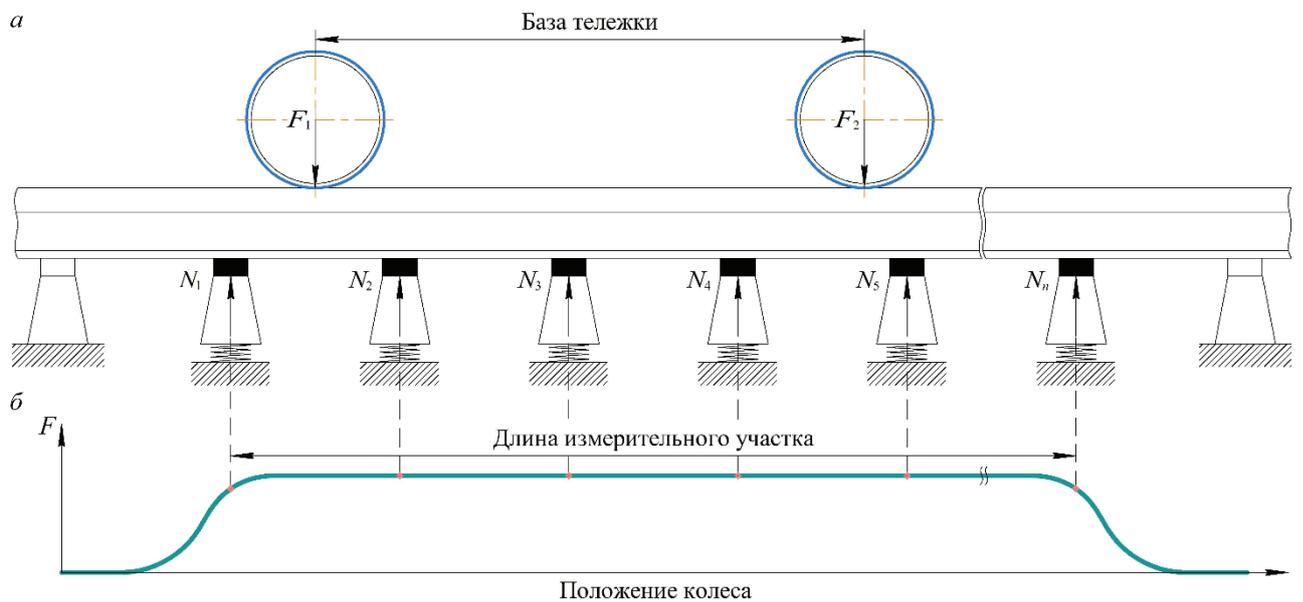


Рис. 7. Схема измерительного участка пути с измерением усилий на шпалы (обозначения см. рис. 2, б)

Уравнение равновесия усилий способа имеет следующий вид:

$$F_i = \sum_{i=0}^n k_i \cdot N_i,$$

где k_i – весовой коэффициент; N_i – усилия на шпалы.

Длина измерения диагностируемого участка системы Sensorline изменяется от 4,2 до 7,8 м. Для наиболее точной обработки данных также в системе возможно изменение длины участка измерения. Колесная пара в процессе движения производит два оборота или более. Система работает на скоростях движения от 35 до 350 км/ч. Минимальная погрешность измерения 3 % достигается при скорости движения до 60 км/ч. На точность измерений влияют весовые коэффициенты k_i . Обоснованное их определение представляется сложным из-за влияния соседних колес и неравномерности деформаций балласта.

Полученные данные от датчика обрабатываются программным кодом, определяя колеса с дефектом и внося их в базу данных. Система имеет связь с диспетчерским пунктом, который принимает сигнал о состоянии колесных пар в движении.

2.3. Измерения по прогибу в рельсе

На железных дорогах Голландии для мониторинга ходовых частей и массы единицы подвижного состава применяется диагностический

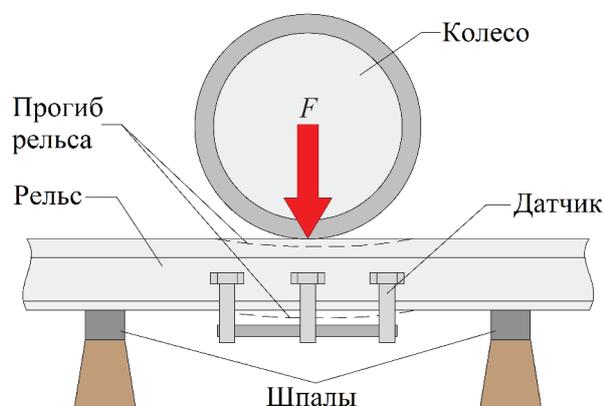


Рис. 8. Схема расположения датчика системы Quo Vadis

комплекс Quo Vadis [24], где измерения осуществляются с помощью волоконно-оптических датчиков (рис. 8). Для получения необходимой и достоверной информации три датчика монтируются на рельсы. Значения нагрузок, действующих на рельсы, рассчитываются по прогибу рельса с учетом текущего состояния пути.

К недостаткам этой системы можно отнести низкий диапазон скоростей.

Аналогическая система с использованием волоконно-оптических датчиков – система диагностики Lasca – применяется в Германии [25]. Измерительный участок системы представляет собой шесть пар лазерных датчиков, располагающихся параллельно рельсам между шпалами (рис. 9). В процессе перемещения колесной пары на измерительном участке лазер, расположенный на центральной оси рельса, передает луч на чувствительный элемент. При появлении нагрузки на измерительном участке луч отклоняется на определенный угол, пропорциональный изгибу рельса. При появлении дефекта чувствительный элемент регистрирует увеличение нагрузки.

В то время, когда колесо проходит по поверхности рельса, информация, показывающая динамические показатели взаимодействия колеса и рельса, является частью сигнала в диапазоне времени. Длина регистрируемого участка составляет 900 мм.

В России по этому принципу действует система контроля вертикальных динамических нагрузок (СКВДН), измеряющая прогиб рельса с помощью волоконно-оптических датчиков.

2.4. Измерения по ускорениям

Суть метода заключается в измерении ускорений элементов верхнего строения пути акселерометрами при проходе колеса с дефектами [26].

2.5. Измерения по уровню акустической эмиссии

Метод акустической эмиссии применяется для регистрации развивающихся дефектов. От-

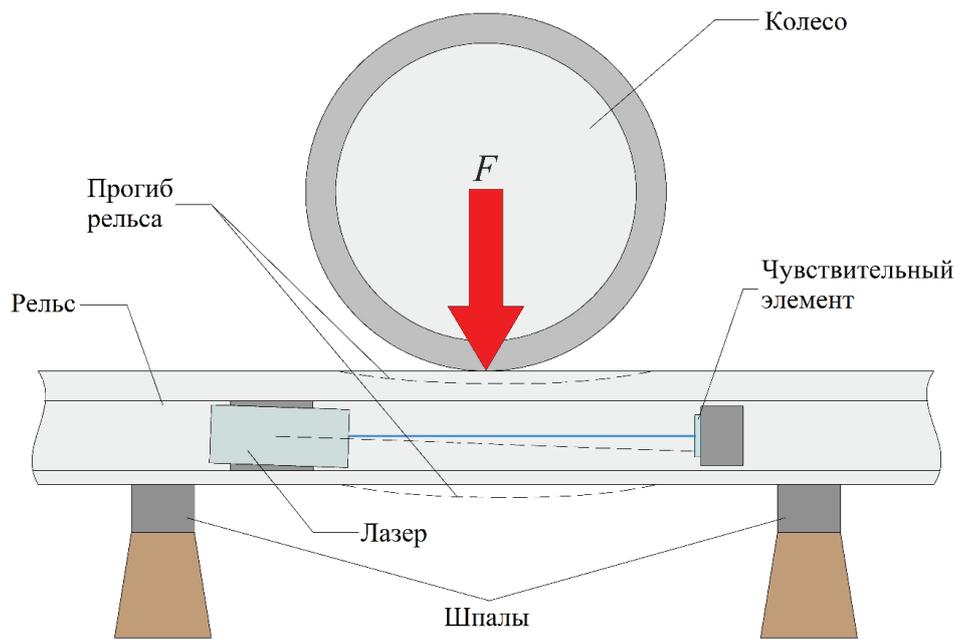


Рис. 9. Схема регистрации вертикальной нагрузки диагностической системы Lasca

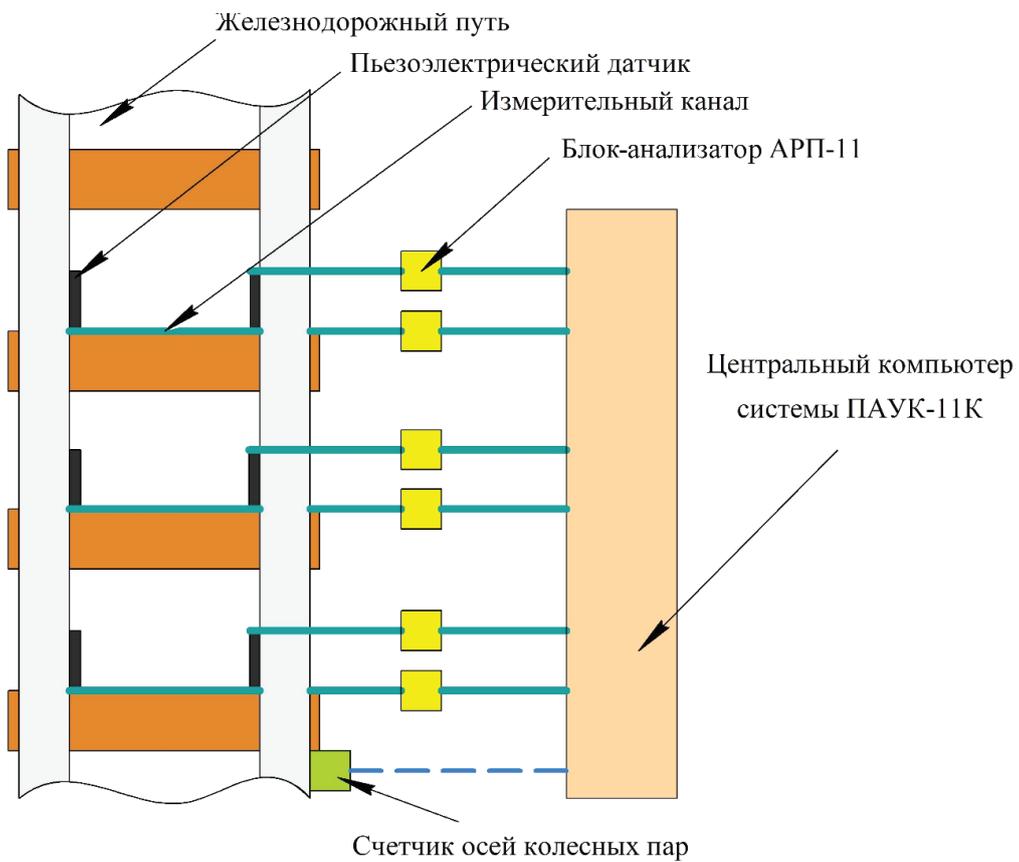


Рис. 10. Компонентная схема ПАУК-11К

личие акустической эмиссии от других методов неразрушающего контроля состоит в источнике сигнала, которым служит сам материал, а не внешняя среда, поэтому принято считать метод акустической эмиссии пассивным. Также метод акустической эмиссии регистрирует развивающиеся дефекты, которые уже являются потенциально опасными [27, 28].

По описанному выше принципу разработан диагностический комплекс пост акустического ультразвукового контроля экипажной части подвижного состава «ПАУК-11К» (рис. 10) [29]. Комплекс предназначен для мониторинга и диагностики состояния поверхности катания колесных пар подвижного состава. При прохождении подвижного состава над измерительным участком пьезоэлектрический датчик принимает сигнал и передает его через измерительные каналы в устройство регистрации и обработки данных (блок-анализатор АРП-11), где результаты выводятся на центральный компьютер оператору. Трудности использования этого метода связаны с определением источника сигнала.

2.6. Измерения по шуму

Суть метода акустического шума по определению усилий в ответственных узлах грузовых вагонов заключается в считывании статистических показаний в виде звуковых значений. В исследовании [30] авторы сделали акцент на регистрации данных через чувствительные микрофоны. С помощью программного обеспечения пункт измерительного контроля обрабатывает полученные сигналы на наличие возмущений, относящихся к периоду прохождения колесной пары через измерительный участок.



Рис. 11. Схема работы методом акустического шума

В момент прохождения колесной пары через пост акустического контроля (ПАК) появляются динамические акустические шумы, которые регистрируются системой измерения (рис. 11). В зависимости от степени повреждения поверхности катания колесной пары амплитуда акустических импульсов может достигать 90 дБ и более.

Трудности применения метода связаны с установлением связи между уровнем шума и видом дефекта.

2.7. Совмещенные методы измерения

Для точного измерения нагрузок и расширения зоны измерений в мировой практике также применяются системы диагностики подвижного состава, в которых динамические показатели определяются совмещенными методами измерения. Пример такой схемы, где диагностическая система представляет совокупность двух методов: измерения по усилиям в рельсе и измерения по усилиям на шпалы, представлена на рис. 12.

Метод является модернизированным и применяется для рельсовых путей, предназначенных для высокоскоростного транспорта. При этом уравнение равновесия имеет следующий вид:

$$F_i = Q_1 - Q_2 + \sum_{i=0}^n k_i \cdot N_i,$$

где Q_1 и Q_2 – поперечные усилия на рельсе; N_i – усилия на шпалы; k_i – весовой коэффициент.

Для автоматизации контроля подвижного состава при движении поезда на железных дорогах Германии используется диагностическая

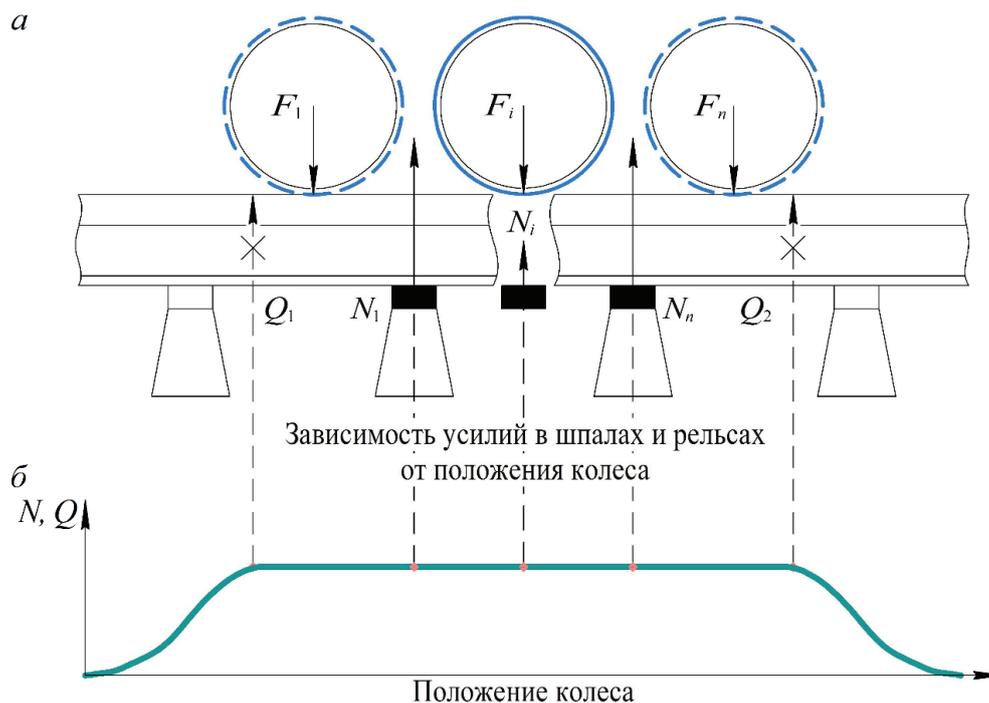


Рис. 12. Схема диагностической системы с совмещенными методами измерения (обозначения см. рис. 2, 6)

система Multirail WheelScan [31], основанная на измерении сил реакции шпал тензодатчиками и вибродатчиками. Суть системы Multirail WheelScan – в применении специализированных весоизмерительных шпал, которые устанавливаются вместо стандартных на исследуемом участке железнодорожного пути. Эта система позволяет регистрировать нагрузки, действующие в контакте «колесо–рельс» при движении подвижного состава. Опираясь на полученные данные, определяются дефекты, опасные для подвижного состава и верхнего строения пути.

На основе данного метода в Австралии разработана система мониторинга Wheel Condition Monitor (WCM) [32]. WCM – это гибридный зажимной комплекс, применяющий акселерометры и тензодатчики, обеспечивающий полное покрытие поверхности катания колесной пары. WCM включает в себя накладные датчики, закрепленные на подошве рельса, и полевые процессоры для обработки данных. Изолированные кабели используются по мере необходимости

для электрифицированных сред. Система является съемной, поэтому имеется возможность для быстрого демонтажа. Комплекс применяется для обнаружения дефектов колесных пар и автоматического контроля их состояния. Система обеспечивает контроль на скорости движения поезда от 25 до 130 км/ч.

На сети железных дорог Германии для автоматизированного контроля состояния колес подвижного состава внедрена система Dafur, основанная на измерении усилий на рельсе и на шпалы с использованием тензодатчиков [33]. Измерительный участок системы Dafur, состоящий из трех измерительных зон, позволяет на расстоянии 4,2 м осуществлять непрерывную регистрацию вертикальных динамических усилий, действующих от колес на рельсы. Чтобы определить вид и форму дефекта колеса, оказывающих негативное воздействие как на колесо, так и на верхнее строение пути, измеренный сигнал сравнивается с характеристиками других сигналов, записанных для известных геометрий колеса.

Аналогичная система для обнаружения дефектов на поверхности катания колеса – диагностическая система ScalexWild – широко применяется на железных дорогах Финляндии [34]. В процессе движения подвижного состава по измерительному участку динамические усилия от колеса на рельс воспринимаются тензодатчиками, установленными между шпалами и рельсами, а также на шейке рельса. Каждое колесо, проходя по измерительному участку системы ScalexWild, длина которой составляет 10 м, делает два полных оборота, что повышает надежность и позволяет контролировать силы воздействия от колеса на рельс при скоростях движения поезда до 250 км/ч. Погрешность измерений динамических нагрузок от колеса на рельс при скорости движения поезда от 15 до 150 км/ч составляет 10 %.

В Российской Федерации в течение последнего десятилетия установлены несколько систем автоматической диагностики дефектов поверхности катания колес (ПАК, ДДК, СКВДН, ПАУК-11, WILD, WCM и др.), но их функционирование построено по следующему принципу: тревожная информация от системы диагностики в автоматическом режиме передается с пульта оператора на пункт технического обслуживания вагонов, затем в ручном режиме осматривателю вагонов и он на основании внешнего осмотра и измерений принимает решение о возможности дальнейшей эксплуатации колесной пары, сравнивая ее геометрические размеры с нормативами, указанными в Правилах технической эксплуатации железных дорог (ПТЭ) [35] и Инструкции осматривателя вагонов. То есть работу автоматизированной системы дублирует осматриватель вагонов.

Такой подход не позволяет получить видимый эффект от применения дорогостоящей автоматизированной системы: подтверждение дефекта производится в ручном режиме; количество осматривателей не сокращается; время, отведенное на осмотр поезда, не уменьшается.

По нашему мнению, необходимо внесение изменений в нормативные документы, которые позволяли принимать решение об отцепке ваго-

на и направлении его в ремонт по показаниям диагностических систем без участия человека. Кроме того, доступ к информации о состоянии колес вагона должен иметь его собственник через систему распределенного хранения данных (блокчейн). Это позволило бы операторам вагонов следить за состоянием вагонов и колесных пар в режиме реального времени. В дальнейшем ОАО «РЖД» могло бы перейти к взиманию платы с операторов вагонов за увеличенное воздействие на путь, а операторы своевременно выставлять претензии за повреждения колесных пар к «РЖД» или предприятиям, эксплуатирующим вагоны на подъездных путях.

3. Заключение

В результате проведенного исследования было установлено, что

1) методы измерений по нормальным напряжениям или деформациям в рельсе не способны обследовать всю поверхность колеса и могут пропускать короткие ударные воздействия от дефектов, так как величина измерительной зоны мала. Их применение в системах мониторинга технического состояния подвижного состава бесперспективно;

2) методы измерений по касательным напряжениям в двух сечениях рельса или прогибу рельсов в межшпальном промежутке позволяют обследовать значительную часть поверхности колеса. При увеличении числа измерительных зон до длины 3–4 оборота колеса можно добиться 100%-ного выявления дефектов и использовать их для мониторинга подвижного состава;

3) методы измерений по нагрузкам на шпалы дают возможность обеспечить непрерывность регистрации силовых воздействий от колеса на рельсы со значительно меньшей длиной измерительной зоны. Однако точность определения усилий связана с необходимостью учета влияния соседних колес и изменением состояния подрельсового основания;

4) методы оценки состояния колес по ускорениям, уровню шума и акустической эмиссии поз-

воляют определять дефекты на поверхности катания колес с минимальным количеством участков. Вопрос точности этих измерений, с точки зрения метрологии, остается открытым из-за множества влияющих факторов. Для их применения в системах мониторинга необходимы разработка новых критериев установления связей между дефектами колес и выходными сигналами и на этой основе браковка колес;

5) для перехода от контроля геометрических размеров ползунов, вышербин, наваров, неравномерного проката и других дефектов на поверхности катания колес к автоматизированному выявлению дефектов по оценке сопутствующих эффектов, сопровождающих качения неисправного колеса по рельсу, необходимы разработка новой нормативной базы в виде ГОСТов по каждому способу измерений и внесение изменений в ПТЭ [35] в части критериев отцепки вагонов по дефектам колес.

Статья подготовлена в рамках программы приграничного сотрудничества Kolarctic CBC Programme 2014–2020 (проект КО2011: «Инфраструктура арктических железных дорог в регионе Kolarctic»).

Библиографический список

1. Ромен Ю. С. Определение сил взаимодействия в системе колесо–рельс на основании измерения напряжений в шейке рельса / Ю. С. Ромен, О. А. Сулов, А. А. Баляева // Вестн. ВНИИЖТ. – 2017. – Т. 76. – № 6. – С. 354–361.
2. Бромберг Е. М. Взаимодействие пути и подвижного состава / Е. М. Бромберг, М. Ф. Вериги, В. Н. Данилов, М. А. Фришман. – М. : Трансжелдориздат, 1956. – 280 с.
3. Ершков О. П. Исследование жесткости железнодорожного пути и ее влияние на работу рельсов в кривых участках / О. П. Ершков // Труды ЦНИИ МПС. – Вып. 264. – М. : Трансжелдориздат, 1963. – С. 39–98.
4. Ершков О. П. Установление коэффициентов, учитывающих боковой изгиб и кручение рельсов / О. П. Ершков // Труды ЦНИИ МПС. – Вып. 97. – М. : Трансжелдориздат, 1955. – С. 289–325.
5. Бржезовский А. М. Экспериментальная оценка взаимодействия экипажа и пути при скоростном и высокоскоростном движении : колл. монография / А. М. Бржезовский, Д. Н. Аршинцев, О. Г. Бржезовская и др. ; под ред. А. М. Бржезовского. – М. : РАС, 2019. – 152 с.
6. ГОСТ Р 55050–2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний (с Изменением № 1 от 01.10.2014 г.). – М. : Стандартинформ, 2013. – 15 с.
7. Проект межгосударственного стандарта. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. – М. : ОПЖТ, 2019.
8. Патент 2623665. Российская Федерация: МПК G01L 5/16 (2006.01). Способ измерения трех компонентов нагрузки в сечении рельса при контактом взаимодействии с колесом железнодорожного подвижного состава / В. С. Коссов, Н. Ф. Красюков, А. А. Лунин, В. А. Гапанович. – Заявитель и патентообладатель ОАО «РЖД». – № 2016119588. – Заявл. 20.05.2016 г. ; опубл. 28.06.2017 г. – Бюл. № 19. – 15 с.
9. Шевченко Д. В. Разработка новых методов определения силовых факторов воздействия подвижного состава на путь / Д. В. Шевченко, Р. А. Савушкин, Я. О. Кузьминский, Т. С. Куклин, Е. А. Рудакова, А. М. Орлова // Техника железных дорог. – 2018. – № 1 (41). – С. 38–51.
10. Бороненко Ю. П. Выбор схемы установки датчиков на железнодорожном пути для выявления дефектов колес / Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов, Ю. Б. Житков, Г. А. Поволоцкая // Транспорт Российской Федерации. – 2019. – № 3 (82). – С. 55–59.
11. Бороненко Ю. П. Выбор схемы измерительного железнодорожного пути для измерения вертикального воздействия от подвижного состава / Ю. П. Бороненко, Ю. Б. Житков, Р. В. Рахимов, Г. А. Поволоцкая // Материалы XIII Междунар. науч.-технич. конференции «Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты». – СПб. : ПГУПС, 2018. – С. 150–152.
12. Bracciali A. New sensor for lateral and vertical wheel-rail forces measurements / A. Bracciali, P. Folga-

rait // Railway Engineering Conference. Railway Engineering. – 2004. – P. 1–7.

13. Delprete C. An easy instrument and a methodology for the monitoring and the diagnosis of a rail / C. Delprete, C. Rosso // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2009. – Vol. 23. – Iss. 3. – P. 940–956.

14. LeDosquet G. Automatic monitoring of the running quality of railway vehicles / G. LeDosquet, F. Pawellek, F. Müller-Boruttau // Railway Technical Review. – 2007. – Vol. 47. – N 2. – P. 1–6.

15. Бороненко Ю. П. Кусочно-непрерывное измерение сил между колесом и рельсом по касательным напряжениям в двух сечениях рельса / Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов, А. А. Петров // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 3 (76). – С. 58–64.

16. Bocciolini L. Wayside measurement of lateral and vertical wheel/rail forces for rolling stock homologation / L. Bocciolini, A. Bracciali, L. Di Benedetto, R. Mastandrea, F. Piccioli // Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology : Research, Development and Maintenance / Ed. by J. Pombo. – Stirlingshire, Scotland : Civil-Comp Press, 2014. – P. 1–23.

17. Ahlbeck D. R. Techniques for measurement of wheel-rail forces / D. R. Ahlbeck, H. D. Harrison // The Shock and Vibration Digest. – 1980. – Vol. 12. – N 10. – P. 31–41.

18. Рахимов Р. В. Проверка точности восстановления вертикальных нагрузок от колеса на рельс по напряжениям в двух сечениях рельса на стенде / Р. В. Рахимов, А. А. Петров // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 4 (77). – С. 55–58.

19. Патент 2709704. Российская Федерация : МПК G01G 19/04, G01B 7/14. Способ измерений вертикальной нагрузки от колеса на рельс и устройство для его осуществления / Ю. П. Бороненко, А. С. Дакша, Р. В. Рахимов. – Заявитель и патентообладатель АО «НВЦ “Вагоны”». – № 2018140938. – Заявл. 21.11.2018 г. ; опубл. 19.12.2019 г. – Бюл. № 35. – 14 с.

20. Clegg E. Wheel impact load detector experience on CN / E. Clegg, W. G. Blevins // American Railway Engineering Association Bulletin. – October 1996. – P. 499–523.

21. Патент 151076. Российская Федерация: МПК G01G 19/04(2006.01). Устройство измерения вертикальных сил от воздействия подвижного состава на шпалу для скрепления APC / С. В. Толмачев, Г. Л. Ки-

селев, С. А. Иванов. – Заявитель и патентообладатель ОАО «ВНИИЖТ». – № 2014126485/28. – Заявл. 30.06.2014 г. ; опубл. 20.03.2015 г. – Бюл. № 8. – 8 с.

22. Патент 139163. Российская Федерация: МПК G01L 1/00(2006.01). Устройство измерения горизонтальных сил от воздействия подвижного состава на шпалу для скрепления APC / С. В. Толмачев, Г. Л. Киселев. – Заявитель и патентообладатель ОАО «ВНИИЖТ». – № 2013158455/28. – Заявл. 27.12.2013 г. ; опубл. 10.04.2014 г. – Бюл. № 10. – 12 с.

23. Force Sensors Line Guide // Sensing and Control Honeywell. – 2013. – N 2. – P. 1–4.

24. Buurman G. Measurement system Quo Vadis / G. Buurman // European Railway Review. – 2005. – N 3. – P. 80–86.

25. Smausz T. LASCA system calibration for single exposure time measurements / T. Smausz, B. Hopp, Z. Bor // CLEO/Europe – EQEC 2009 – European Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference. – Munich, 2009. – P. 1–1.

26. Ададунов А. С. Экспериментальные исследования цифровых акселерометров и систем обнаружения дефектов поверхности катания колес подвижного состава на их основе / А. С. Ададунов, О. А. Сухов // Вестн. Ин-та проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2019. – № 3 (47). – С. 40–45.

27. Бехер С. А. Расчетно-экспериментальное исследование источников непрерывной акустической эмиссии для относительной калибровки преобразователей акустической эмиссии / С. А. Бехер, Т. В. Сыч // Материалы второй Всерос. науч.-технич. конференции с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте». – Омск : ОмГУПС, 2016. – С. 146–153.

28. Квартальнов С. В. Акустические методы контроля строительных конструкций. Метод акустической эмиссии / С. В. Квартальнов // Аллея науки. – 2018. – № 11 (27) – С. 810–813.

29. Зайцев А. Инновационные технологии для транспортной системы Российской Федерации / А. Зайцев, А. Крылов, В. Юдкин // Русский инженер. – 2017. – № 4 (57). – С. 75–79.

30. Ададунов А. С. Критерии достоверности результатов диагностики буксовых узлов грузовых ва-

гонов акустическими методами / А. С. Адагуров, А. А. Романова // Транспорт Российской Федерации. – 2019. – № 5 (84). – С. 57–61.

31. Бехер С. А. Разработка средств мониторинга динамических процессов взаимодействия колес и рельсов в эксплуатации / С. А. Бехер, Т. В. Сыч, А. О. Колмеец, А. С. Кочетков // Вестн. Сиб. гос. ун-та путей сообщения. – 2018. – № 3 (46). – С. 33–42.

32. Wheel Condition Monitor. Track IQ a Wabtec company. – Kent Town, South Australia. – URL : <https://wabtec.com/uploads/outlinedrawings/Wheel-Condition-Monitor-Flyer.pdf> (дата обращения: 07.06.2020 г.).

33. Обнаружение некруглости колес // Железные дороги мира. – 2003. – № 8. – С. 64–68.

34. Прогрессивные системы взвешивания вагонов // Железные дороги мира. – 2015. – № 5. – С. 55–59.

35. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. – Утв. Министерством транспорта РФ 21.12.2010 г. – Введ. в действие с 21.06.2011 г. – М. : Минтранс, 2011. – 255 с.

Дата поступления: 09.06.2020

Решение о публикации: 19.06.2020

Контактная информация:

БОРОНЕНКО Юрий Павлович – д-р техн. наук, профессор; boron49@yandex.ru

РАХИМОВ Рустам Вячеславович – канд. техн. наук, доцент; rakhimovrv@yandex.ru

ГРИГОРЬЕВ Роман Юрьевич – аспирант; grigoriev174000@yandex.ru

ПОПОВ Виталий Владимирович – orw_sng@orw.ru

Analysis of methods for measuring the force effect of rolling stock on the track and the wheel control systems when the train is moving

Yu. P. Boronenko¹, R. V. Rakhimov¹, R. Yu. Grigoryev¹, V. V. Popov²

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

² Oktyabrskaya Railway, 2, Ostrovskogo pl., Saint Petersburg, 191023, Russian Federation

For citation: Boronenko Yu. P., Rakhimov R. V., Grigoryev R. Yu., Popov V. V. Analysis of methods for measuring the force effect of rolling stock on the track and the wheel control systems when the train is moving. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 324–344. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-324-344

Summary

Objective: Selection of promising techniques for detecting defects in rolling stock wheels while the train is moving, determining the requirements for promising diagnostic systems and the necessary regulatory framework for 1520 mm gauge railways. **Methods:** Statistical, analytical and graphical methods have been used. **Results:** The advantages and disadvantages of the current wheel technical control systems have been determined, and the requirements for the further development of moving rolling stock diagnostic systems have been outlined. **Practical importance:** Analysis of existing systems for moving rolling stock technical diagnostics indicates the need to switch from monitoring the geometric dimensions of the wheel tread surface defects to automated detection of defects by assessing the effects accompanying rolling of a faulty wheel on a rail, and developing new regulatory documents in the form of GOSTs for each measurement technique, including amendments to the Russian Rules for the Technical Operation of Railways.

Keywords: Rolling stock, effect on the track, dynamic load, wheel inspection, technical control system, scheme of the track measuring section, measuring zone, rolling stock diagnostics when the train is moving.

References

1. Romen Yu. S., Suslov O. A. & Balyayeva A. A. Opredeleniye sil vzaimodeystviya v sisteme koleso–rel's na osnovanii izmereniya napryazheniy v sheyke rel'sa [Determination of interaction forces in the wheel–rail system based on the measurement of stresses in the rail web]. *Vestnik VNIIZhT [Bulletin of the Railway Research Institute]*, 2017, vol. 76, no. 6, pp. 354–361. (In Russian)
2. Bromberg E. M., Verigo M. F., Danilov V. N. & Frishman M. A. *Vzaimodeystviye puti i podvizhnogo sostava [Interaction of the track and rolling stock]*. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1956, 280 p. (In Russian)
3. Ershkov O. P. Issledovaniye zhestkosti zheleznodorozhnogo puti i yeye vliyaniye na rabotu rel'sov v krivykh uchastkakh [Investigation of the railway track stiffness and its impact on the functioning of rails in curved sections]. *Proceedings of the TsNII of the Ministry of Transport*. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1963, iss. 264, pp. 39–98. (In Russian)
4. Ershkov O. P. Ustanovleniye koeffitsiyentov, uchityvayushchikh bokovoy izgib i krucheniye rel'sov [Establishing coefficients taking into account lateral bending and torsion of rails]. *Proceedings of the TsNII of the Ministry of Transport*. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1955, iss. 97, pp. 289–325. (In Russian)
5. Brzhezovskiy A. M., Arshintsev D. N., Brzhezovskaya O. G. et al. *Ekspertimantal'naya otsenka vzaimodeystviya ekipazha i puti pri skorostnom i vysokoskorostnom dvizhenii*. Koll. monografiya [Experimental assessment of the interaction between the crew and the track during rapid and high-speed movement. Collective monograph]. Edited by A. M. Brzhezovskiy. Moscow, RAS Publ., 2019, 152 p. (In Russian)
6. GOST R 55050–2012. *Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav. Normy dopustimogo vozdeystviya na zheleznodorozhnyy put' i metody ispytaniy [Railway rolling stock. Permissible exposure norms to the railway track and test methods]* (with Amendment no. 1 dated October 01, 2014). Moscow, Standartinform Publ., 2013, 15 p. (In Russian)
7. Draft interstate standard. *Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav. Normy dopustimogo vozdeystviya na zheleznodorozhnyy put' i metody ispytaniy [Railway rolling stock. Permissible exposure norms to the railway track and test methods]*. Moscow, OPZT Publ., 2019. (In Russian)
8. Kossov V. S., Krasnyukov N. F., Lunin A. A. & Gapanovich V. A. Patent 2623665. Russian Federation: IPC G01L 5/16 (2006.01). *Method for measuring three load components in a rail cross-section in contact with a railway rolling stock wheel*. Applicant and patent holder JSC Russian Railways, no. 2016119588. Appl. May 20, 2016, publ. June 28, 2017. Bul. no. 19, 15 p. (In Russian)
9. Shevchenko D. V., Savushkin R. A., Kuz'minskiy Ya. O., Kuklin T. S., Rudakova E. A. & Orlova A. M. Razrabotka novykh metodov opredeleniya silovykh faktorov vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' [Development of new methods for determining the force factors of the rolling stock impact on the track]. *Tekhnika zheleznnykh dorog [Railway Equipment]*, 2018, no. 1(41), pp. 38–51. (In Russian)
10. Boronenko Yu. P., Rakhimov R. V., Zhitkov Yu. B. & Povolotskaya G. A. Vybor skhemy ustanovki datchikov na zheleznodorozhnom puti dlya vyyavleniya defektov koles [Choosing a scheme for installing sensors on a railway track to detect wheel defects]. *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 2019, no. 3(82), pp. 55–59. (In Russian)
11. Boronenko Yu. P., Zhitkov Yu. B., Rakhimov R. V. & Povolotskaya G. A. Vybor skhemy izmeritel'nogo zheleznodorozhnogo puti dlya izmereniya vertikal'nogo vozdeystviya ot podvizhnogo sostava [Choosing a measuring railway track to measure the vertical impact from the rolling stock]. *Materialy XIII Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konferentsii "Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proyekty" [Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference "Rolling stock of the 21st century: ideas, requirements, projects"]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, pp. 150–152. (In Russian)
12. Bracciali A. & Folgarait P. New sensor for lateral and vertical wheel-rail forces measurements. *Railway Engineering Conference. Railway Engineering*, 2004, pp. 1–7.
13. Delprete C. & Rosso C. An easy instrument and a methodology for the monitoring and the diagnosis of a rail. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, vol. 23, iss. 3, pp. 940–956.
14. LeDosquet G., Pawellek F. & Müller-Boruttau F. Automatic monitoring of the running quality of rail-

way vehicles. *Railway Technical Review*, 2007, vol. 47, no. 2, pp. 1–6.

15. Boronenko Yu. P., Rakhimov R. V. & Petrov A. A. Kusochno-nepreryvnoye izmereniye sil mezhdu kole-som i rel'som po kasatel'nyim napryazheniyam v dvukh secheniyakh rel'sa [Piecewise continuous measurement of forces between the wheel and the rail by shear stresses in two cross-sections of the rail]. *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 2018, no. 3(76), pp. 58–64. (In Russian)

16. Bociolini L., Bracciali A., Di Benedetto L., Ma-standrea R. & Piccioli F. Wayside measurement of lateral and vertical wheel/rail forces for rolling stock homologation. *Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*. Ed. by J. Pombo. Stirlingshire, Scot-land, Civil-Comp Press, 2014, pp. 1–23.

17. Ahlbeck D. R. & Harrison H. D. Techniques for measurement of wheel-rail forces. *The Shock and Vibration Digest*, 1980, vol. 12, no. 10, pp. 31–41.

18. Rakhimov R. V. & Petrov A. A. Proverka tochnosti vosstanovleniya vertikal'nykh nagruzok ot kole-sa na rel's po napryazheniyam v dvukh secheniyakh rel'sa na stende [Bench testing of the accuracy of the recovery of vertical load from a wheel on a rail by stresses in two cross-sections of a rail]. *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 2018, no. 4(77), pp. 55–58. (In Russian)

19. Boronenko Yu. P., Dauksha A. S. & Rakhi-mov R. V. Patent 2709704. Russian Federation: IPC G01G 19/04, G01B 7/14. *Method for measuring vertical load from a wheel on a rail and an apparatus for its implementation*. Applicant and patent holder JSC Research and Innovation Company Vagony, no. 2018140938. Appl. No- vember 21, 2018, publ. December 19, 2019. Bul. no. 35, 14 p. (In Russian)

20. Clegg E. & Blevins W. G. Wheel impact load de- tector experience on CN. *American Railway Engineering Association Bulletin*, 1996, pp. 499–523.

21. Tolmachev S. V., Kiselev G. L. & Ivanov S. A. Patent 151076. Russian Federation: IPC G01G 19/04 (2006.01). *Apparatus for measuring vertical forces from the action of the rolling stock on the sleeper for rail fas- tening ties*. Applicant and patent holder OJSC VNIIZhT, no. 2014126485/28. Appl. June 30, 2014, publ. March 20, 2015. Bul. no. 8, 8 p. (In Russian)

22. Tolmachev S. V. & Kiselev G. L. Patent 139163. Russian Federation: IPC G01L 1/00 (2006.01). *Apparatus for measuring horizontal forces from the action of the rol- ling stock on the sleeper for rail fastening ties*. Applicant and patent holder OJSC VNIIZhT, no. 2013158455/28. Appl. December 27, 2013, publ. April 10, 2014. Bul. no. 10, 12 p. (In Russian)

23. Force Sensors Line Guide. *Sensing and Control Honeywell*, 2013, no. 2, pp. 1–4.

24. Buurman G. Measurement system Quo Vadis. *European Railway Review*, 2005, no. 3, pp. 80–86.

25. Smausz T., Hopp B. & Bor Z. LASCA system cali- bration for single exposure time measurements. *CLEO/ Europe – EQEC 2009 – European Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electro- nics Conference*. Munich, 2009, pp. 1–1.

26. Adadurov A. S. & Sukhov O. A. Eksperimental'nyye issledovaniya tsifrovyykh akselerometrov i sistem obna- ruzheniya defektov poverkhnosti kataniya koles podvi- zhnogo sostava na ikh osnove [Experimental studies of digital accelerometers and systems for detecting defects in the rolling stock wheel tread surface based on them]. *Proceedings of the Institute of Natural Monopolies Re- search. Tekhnika zheleznykh dorog [Railway Equipment]*, 2019, no. 3(47), pp. 40–45. (In Russian)

27. Bekher S. A. & Sych T. V. Raschetno-eksperi- mental'noye issledovaniye istochnikov nepreryvnoy akus- ticheskoy emissii dlya odnositel'noy kalibrovki preobra- zovatelye akusticheskoy emissii [Computational and ex- perimental study of continuous acoustic emission sources for relative calibration of acoustic emission transducers]. *Materialy vtoroy Vseros. nauch.- tekhnich. konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem "Pribory i metody izme- reniy, kontrolya kachestva i diagnostiki v promyshlen- nosti i na transporte" [Proceedings of All-Russia Scientific and Technical Conference with International Participa- tion "Devices and methods for measurement, quality con- trol, and diagnostics in industry and transport"]*. Omsk, OmGUPS [Omsk State Transport University] Publ., 2016, pp. 146–153. (In Russian)

28. Kvartal'nov S. V. Akusticheskiye metody kon- trolya stroitel'nykh konstruksiy. Metod akusticheskoy emissii [Acoustic methods of control in building struc- tures. Acoustic Emission Method]. *Alleya nauki [Alley of Science]*, 2018, no. 11 (27), pp. 810–813. (In Rus- sian)

29. Zaytsev A., Krylov A. & Yudkin V. Innovatsionnyye tekhnologii dlya transportnoy sistemy Rossiyskoy Federatsii [Innovative technologies for the transport system of the Russian Federation]. *Russkiy inzhener [Russian Engineer]*, 2017, no. 4(57), pp. 75–79. (In Russian)
30. Adadurov A. S. & Romanova A. A. Kriterii dostovernosti rezul'tatov diagnostiki buksovykh uzlov gruzovykh vagonov akusticheskimi metodami [Reliability criteria for the results of diagnostics of freight car axle boxes by acoustic methods]. *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 2019, no. 5(84), pp. 57–61. (In Russian)
31. Bekher S. A., Sych T. V., Kolomeyets A. O. & Kochetkov A. S. Razrabotka sredstv monitoringa dinamicheskikh protsessov vzaimodeystviya koles i rel'sov v ekspluatatsii [Development of instruments for monitoring the wheels-rail interaction dynamic processes during operation]. *Proceedings of the Siberian Transport University*, 2018, no. 3(46), pp. 33–42. (In Russian)
32. *Wheel Condition Monitor*. Track IQ a Wabtec company. Kent Town South Australia. Available at: <https://wabtec.com/uploads/outlinedrawings/Wheel-Condition-Monitor-Flyer.pdf> (accessed: June 07, 2020).
33. Obnaruzheniye nekruglosti koles [Detection of wheel out-of-roundness]. *Zheleznyye dorogi mira [Railways of the World]*, 2003, no. 8, pp. 64–68. (In Russian)
34. Progressivnyye sistemy vzveshivaniya vagonov [Progressive car weighing systems]. *Zheleznyye dorogi mira [Railways of the World]*, 2015, no. 5, pp. 55–59. (In Russian)
35. *Rules for the Technical Operation of Railways in the Russian Federation*. Approved by The Russian Ministry of Transport as of December 21, 2010. Put into effect as of June 21, 2011. Moscow, Ministry of Transport Publ., 2011, 255 p. (In Russian)

Received: June 09, 2020

Accepted: June 19, 2020

Author's information:

Yuriy P. BORONENKO – D. Sci. in Engineering, Professor; boron49@yandex.ru

Rustam V. RAKHIMOV – PhD in Engineering, Associate Professor; rakhimovrv@yandex.ru

Roman Yu. GRIGORYEV – Postgraduate Student; grigoriev174000@yandex.ru

Vitaliy V. POPOV – orw_sng@orw.ru

УДК 629.423

Анализ снижения рисков на железнодорожной инфраструктуре при внедрении моторвагонных грузовых электропоездов

А. А. Зайцев, П. С. Троицкий

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

Для цитирования: Зайцев А. А., Троицкий П. С. Анализ снижения рисков на железнодорожной инфраструктуре при внедрении моторвагонных грузовых электропоездов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 345–352. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-345-352

Аннотация

Цель: Сформировать перечень преимуществ модульных грузовых электропоездов (МГЭП) в сравнении с поездами локомотивной (сосредоточенной) тяги. Перечислить риски, характерные организации длинносоставного тяжеловесного движения. Сделать оценку эффектов от снижения поезддо-простоев по причинам отказов технических средств в грузовых поездах локомотивной тяги при замене их моторвагонными грузовыми. **Методы:** Используются методы сравнительного анализа, контент-анализа технической информации, экономического анализа, а также инженерно-технический подход к анализу технических решений железнодорожной техники в сравнении с аналогами, который позволил оценить уровень развития технической базы железнодорожного транспорта, предназначенной для грузового движения. Применялся комплексный междисциплинарный подход к проблемам увеличения массы и скорости движения поездов, как одной из задач модернизации железнодорожного транспорта. **Результаты:** Описаны преимущества МГЭП в сравнении с грузовыми поездами локомотивной тяги, указаны основные риски при применении грузовых длинносоставных тяжеловесных поездов, произведен расчет убытков от поезддо-простоев по причинам отказов технических средств. **Практическая значимость:** Реализация предложений по применению МГЭП на различных видах перевозок – контейнерных, контрейлерных, рефрижераторных, транзитных, а также экономической оценке затрат, связанных с поезддо-простоями из-за отказов технических средств при грузовом тяжеловесном движении.

Ключевые слова: Распределенная тяга, ускоренные грузовые перевозки, моторвагонные грузовые электропоезда, инновационный транспорт, отказы технических средств.

В условиях насыщения рынка транспортных услуг важную роль играет внедрение новых видов тяги с целью роста скоростей движения, снижения транспортных издержек, оптимизации времени перемещения грузов и пассажиров. Применение модульных грузовых электропоездов (МГЭП) для перевозок грузов способно резко улучшить условия реализации тяги, сократить сбой движения, повысить скорость и ритмичность доставок, оптимизировать использование пропускной способности железнодорожных

линий. Максимальную эффективность МГЭП имеют в первую очередь при доставках скоропортящихся, контейнеризируемых грузов, грузов с высокой добавленной стоимостью. К таковым можно отнести продукты питания, высокотехнологичную технику, одежду, а также грузы промышленного назначения с относительно небольшими объемами погрузки. Преимущества МГЭП проявятся на полигонах с нестабильным грузопотоком, на участках со сложным профилем пути, где возможны вынужденные оста-

новки и разгон поездов на крутых подъемах и спусках, там, где применяются подталкивание, двойная тяга. Международный опыт внедрения МГЭП свидетельствует, что к подобным видам тяги, помимо прочего, обращаются в периоды возникновения экологических проблем, а именно, когда требуется снизить воздействие загрязняющих выбросов грузового автотранспорта на окружающую среду, улучшить дорожную ситуацию при сохранении неизменной скорости доставки грузов [1].

Природа транспорта определяет источник технических, экономических и в ряде случаев социальных рисков [2, с. 88]. Проявление таких рисков наиболее присуще организации высокоскоростных, тяжеловесных, длинносоставных, негабаритных транспортных потоков, а именно:

- значительная мощность электровозов, требуемая для тяги тяжеловесных длинносоставных поездов обуславливает генерирование больших обратных токов, которые оказывают негативное влияние на работу устройств сигнализации и связи, а также приводят к перегоранию контактного провода при сосредоточенном токосъеме;

- повышенные нагрузки на тяговые электродвигатели (ТЭД) локомотивов при тяжеловесном движении вызывают отказы моторвентилляторов и другого вспомогательного оборудования;

- большие масса и длина составов приводят к снижению скорости, увеличению продолжительности рейса, сбоям в ритмичности работы железнодорожных линий;

- в длинносоставном поезде, сформированном из вагонов разновеликой массы, в том числе порожних, возможен риск схода вагонов с рельс из-за высоких сил сжатия в составе, который значителен в зонах стрелочных переводов, где имеет место большое взаимосмещение в горизонтальной плоскости буферов и продольных осей смежных вагонов [3, с. 29];

- снижение коэффициента полезного действия (КПД) энергетических установок сверхмощных локомотивов при уменьшении макси-

мально допустимой массы поезда и его почти нулевое значение при холостом перегоне. Энергетические установки локомотивов реализуют высокий КПД лишь при тяге поезда по руководящим подъемам при полной допустимой нагрузке состава;

- ухудшение пропускной способности железнодорожных линий из-за наличия обратного следования и расхода энергии на холостой пробег локомотивами-толкачами, необходимыми для работы с тяжеловесными поездами на участках с тяжелым профилем пути;

- ухудшение управляемости тормозами длинносоставного тяжеловесного поезда;

- частые и глубокие боксования локомотива при тяжеловесном движении – одна из основных причин возникновения продольных динамических сил в поезде [4, с. 15];

- при трогании тяжеловесных поездов, а также прохождении участков сложного профиля пути велик риск разрывов автосцепок в составе длинносоставного тяжеловесного поезда. Наиболее часто он проявляется в зимний период, поскольку повышению количества обрывов способствует увеличение сопротивления движению поезда в результате загустевания смазок в экипажной части подвижного состава, снижение прочности металла при низких температурах, образование ледяных пробок в тормозной сети и как следствие существенное замедление отпуска тормозов после служебных торможений. Исследованиями ВНИИЖТа установлено, что при температуре ниже $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ прочность автосцепки на разрыв снижается практически в 2 раза [5, с. 49]. Общее число разрывов автосцепок в зависимости от количества вагонов в поезде составляет: при количестве вагонов от 60 до 70 – 20%, при количестве вагонов от 71 до 80 – 80% [6, с. 97–100]. В табл. 1 и 2 приведена статистика обрывов, согласно [6].

Внедрение МГЭП приведет к увеличению массы поезда и скорости движения, к устранению указанных негативных явлений. Помимо этого, МГЭП позволят обеспечить стабильное и надежное энергообеспечение рефрижераторных контейнеров, специализированных

ТАБЛИЦА 1. Распределение обрывов автосцепок в зависимости от массы поезда

Масса поезда, тыс.т	Распределение обрывов, %
2–3	0
3–4	20
4–5	20
5–6	0
Более 6	60
Итого	100

ТАБЛИЦА 2. Распределение обрывов автосцепок в зависимости от типа вагона

Тип вагона	Распределение обрывов, %
Полувагон	60
Цистерна	20
Хоппер	20
Итого	100

съемных кузовов вагонов-цистерн, требующих энергии для работы паровых рубашек, тепловых электрических нагревателей и охладителей, поддерживающих перевозку наливных грузов в надлежащем состоянии на дальние расстояния. Как известно, производство вагонов-рефрижераторов прекращено в России в середине 1990-х годов. В настоящее время для перевозки скоропортящихся продуктов все больше внедряются контейнеры-ледники и контейнеры-рефрижераторы с питанием от вагонных дизель-генераторов или подвагонных генераторов. Применение генераторов, установленных на оси грузового вагона, резко усложняет и удорожает стоимость технического обслуживания таких вагонов, снижает маневренность вагонного парка. Использование электропоездов для перевозки рефрижераторных контейнеров с питанием от контактной сети через понижающие преобразователи решает вопрос штучных отправок контейнеров – не требуется рефрижераторный сцеп или целый поезд, устраняет риск разморозки груза, повышает ритмичность отправок.

Вопросы транспортного обслуживания и связанные с ним экологические проблемы приобрели в последнее время особую остроту – на один тонно-километр выбросы парниковых газов в атмосферу у большегрузного автотранспорта почти в 4 раза выше, чем на железнодорожном транспорте [7, с. 34–35]. Поэтому применение грузовых электропоездов для ускоренной перевозки контейнеров окажет положительный эффект на улучшение экологической ситуации, снизит аварийность и загруженность автодорог. Наибольший потенциал для организации контейнерных перевозок в России, по нашему мнению, представляют собой международные, приграничные направления, где возможность более быстрого прохождения пограничных переходов по железной дороге позволит существенно уменьшить логистические издержки. К таким направлениям можно отнести: Москва–Санкт-Петербург–Хельсинки, Москва–Минск–Брест–Варшава, Москва–Минск–Вильнюс.

В МГЭП наиболее эффективно реализуется процесс рекуперации электроэнергии при торможении, тогда как в грузовом тяжеловес-

ном поезде локомотивной тяги возникает риск потери продольной устойчивости поезда при электрическом торможении ведущим локомотивом. Снижение энергозатрат электрического транспорта вследствие применения рекуперации энергии уменьшает выбросы электростанций, что также является важным экологическим фактором [8, с. V–20].

В табл. 3–5 приведены данные экономической оценки затрат, связанных с поездом-простоями из-за отказов технических средств при грузовом тяжеловесном движении.

Показатели условной экономической оценки дополнительных расходов рассчитываются в соответствии с требованиями [9], на основе данных системы КАСАНТ о продолжительности

ТАБЛИЦА 3. Статистика отказов по вине дирекции тяги по данным комплексной автоматизированной системы учета неисправностей «КАСАНТ» с 2014 по 2018 г.

Вид отказов	Общее количество, шт.	Среднее количество отказов в год, шт.	Время от возникновения отказа до устранения его последствий, мин	Среднее время задержки грузовых поездов, мин
Отказы автосцепного оборудования	68	13,6	15–1140	74,4
Отказы мотор-вентиляторов	125	25,0	2–225	125,0
Отказы устройств сигнализации, централизации, блокировки (СЦБ), железнодорожной автоматики и телемеханики	38	7,6	2–315	42,2
Пережог контактного провода	210	42,0	3–692	84,0

ТАБЛИЦА 4. Распределение количества и видов отказов по региональным дирекциям тяги по данным комплексной автоматизированной системы учета неисправностей «КАСАНТ» с 2014 по 2018 г.

Название железной дороги	Обрывы автосцепок	Отказ мотор-вентиляторов	Отказы устройств СЦБ, железнодорожной автоматики и телемеханики	Пережог контактного провода
Восточно-Сибирская	7	20	3	18
Горьковская	4	7	1	9
Дальневосточная	6	6	3	3
Забайкальская	2	1	2	25

Окончание табл. 4

Название железной дороги	Обрывы авто-сцепок	Отказ мотор-вентиляторов	Отказы устройств СЦБ, железнодорожной автоматики и телемеханики	Пережог контактного провода
Западно-Сибирская	15	19	2	21
Красноярская	1	2	2	21
Куйбышевская	5	5	5	10
Московская	2	18	7	28
Октябрьская	6	23	3	12
Приволжская	3	2	1	3
Свердловская	3	10	5	31
Северная	3	3	1	8
Южно-Уральская	2	3	1	10
Северо-Кавказская	5	1	1	8
Юго-Восточная	4	5	1	3
И т о г о	68	125	38	210

ТАБЛИЦА 5. Расчет убытков от поезда-простоев в год по причинам отказов технических средств в грузовых поездах

Причина	Расходная ставка стоимости одного поезда-часа простоя поезда, руб.	Продолжительность задержки поезда, ч	Средняя стоимость одного простоя по причине отказа, руб.	Среднее количество отказов в год, шт.	Убытки от простоя в год, руб.
Обрывы авто-сцепок	2526,59	1,24	3132,97	13,6	42 608
Отказы мотор-вентиляторов	2526,59	2,08	5263,73	25,0	131 593
Отказы устройств СЦБ, железнодорожной автоматики и телемеханики	2526,59	0,70	1777,03	7,6	13 505
Пережог контактного провода	2526,59	1,40	3537,23	42,0	148 563
И т о г о					336 271

задержек поездов по причине отказов в работе технических средств и величины расходной ставки стоимости одного поезд-часа простоя поезда по следующей формуле:

$$E_{\text{доп}}^{\text{поезд}} = \sum a_{ij}^k t_{ij}^k,$$

где $E_{\text{доп}}^{\text{поезд}}$ – дополнительные расходы, связанные с задержками поездов по причине отказов в работе технических средств, тыс. руб.; a_{ij}^k – расходная ставка стоимости одного поезд-часа простоя поезда i -го вида движения в j -м виде тяги, рассчитанная для полигона k -й железной дороги, тыс. руб./ч, принято в соответствии с [10]; t_{ij}^k – продолжительность задержки поезда i -го вида движения в j -м виде тяги, рассчитанная для полигона k -й железной дороги, ч.

В последние годы на инфраструктуре ОАО «РЖД» количество отказов стабильно снижается. Тем не менее моторвагонная схема организации грузовых перевозок, помимо прочих преимуществ, окажет дополнительное воздействие на рост надежности работы железных дорог и снижения убытков от отказов технических средств. Таким образом, создание МГЭП позволит повысить пропускную способность транспортной инфраструктуры путем наиболее эффективного сочетания допустимой суммарной массы вагонов со сцепными свойствами энергетического и тормозного оборудования поезда, а также улучшить экологическую ситуацию.

Библиографический список

1. Материалы компании RAİpin. – RAİpin : развитие технологии катящегося шоссе // Железные дороги мира. – 2019. – № 10. – С. 47–49.
2. Гапанович В. А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте : учебник для вузов / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов, Б. А. Аржанников и др. ; под ред. В. А. Гапановича. – М. : Издат. Дом МИСиС, 2012. – 620 с.

3. Александров И. К. Модульный состав – экономия энергии / И. К. Александров // Мир транспорта. – 2013. – № 5. – С. 28–37.

4. Гребенюк П. Т. Продольная динамика поезда / П. Т. Гребенюк // Труды ВНИИЖТ. – М. : Интекст, 2003. – 95 с.

5. Пономарева Е. В. Причины обрыва грузовых поездов / Е. В. Пономарева // Локомотив Информ. – 2011. – № 12. – С. 25–27.

6. Ляушкин А. А. Анализ обрывов и саморасцепов автосцепок / А. А. Ляушкин, В. А. Паршиков, И. А. Астафьев // Актуальные вопросы науки и техники : материалы Междунар. науч.-практич. конференции. Воронеж, 16 июня 2015 г. – Воронеж : Руна, 2015. – № 2. – 222 с.

7. Барбарич С. С. О создании специализированного вагона-платформы для контрейлерных и контейнерных перевозок на «Пространстве – 1520» / С. С. Барбарич // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2013. – № 1 (33). – С. 15–20.

8. Логинова Е. Ю. Повышение экономичности моторных вагонов с асинхронными тяговыми двигателями // Е. Ю. Логинова, А. В. Коваленко, С. И. Карасев // Безопасность движения поездов : Труды Двенадцатой науч.-практич. конференции. – М. : МИИТ, 2011. – С. 23–37.

9. Методические указания по формированию выходящих справок условной экономической оценки дополнительных расходов, связанных с задержками грузовых поездов по причине отказов в работе технических средств 1 и 2 категории. – Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 11 апреля 2017 г. № 696р. – М. : ОАО «РЖД», 2017.

10. Распоряжение ОАО «РЖД» от 18 апреля 2018 г. № 778р «Об утверждении расходных ставок и оценочных уровней затрат для экономических задач». – М. : ОАО «РЖД», 2018.

Дата поступления: 25.05.2020

Решение о публикации: 02.07.2020

Контактная информация:

ЗАЙЦЕВ Анатолий Александрович – д-р экон. наук, профессор; nozpgups@gmail.com
ТРОИЦКИЙ Павел Сергеевич – аспирант; paveltroickiy@mail.ru

Analysis of the railway infrastructure risk reduction upon introducing freight electric multiple units

A. A. Zaitsev, P. S. Troitskiy

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

For citation: Zaitsev A. A., Troitskiy P. S. Analysis of the railway infrastructure risk reduction upon introducing freight electric multiple units. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 345–352. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-345-352

Summary

Objective: To form a list of the advantages of freight EMUs in comparison with locomotive (concentrated) traction trains. To outline the typical risks of the organization of long-haul heavy traffic. To assess the effects of reducing train downtime due to equipment failures in freight locomotive trains when they are replaced with freight multiple units. **Methods:** The comparative analysis, content analysis of technical information, economic analysis methods have been used, as well as engineering and technical approach to the analysis of technical solutions for railway equipment compared to analogs, which made it possible to assess the current level of the railway freight traffic technical development. A complex interdisciplinary approach was applied to the problems of increasing the weight and speed of trains, as one of the tasks of railway transport upgrading. **Results:** The advantages of modular freight electric trains in comparison with freight locomotive trains are described, the main risks when using long-haul heavy freight trains are specified, and losses from train downtime due to equipment failures are calculated. **Practical importance:** Implementation of proposals for the use of freight EMUs for various types of transportation – container, piggyback, refrigerated, transit; as well as the economic assessment of costs associated with train downtime due to equipment failures in heavy freight traffic.

Keywords: Distributed traction, accelerated freight transportation, freight electric multiple units, innovative transport, equipment failures.

References

1. Materials provided by RAIpin. RAIpin: Development of the Rolling Highway technology. *Zheleznyye dorogi mira [Railways of the World]*, 2019, no. 10, pp. 47–49. (In Russian)
2. Gapanovich V. A., Avilov V. D., Arzhannikov B. A. et al. *Energoberezhdeniye na zheleznodorozhnom transporte*. Uchebnyk dlya vuzov [Energy saving in railway transport. Textbook for universities]. Edited by V. A. Gapanovich. Moscow, MISIS Publishing House, 2012, 620 p. (In Russian)
3. Aleksandrov I. K. Modul'nyy sostav – ekonomiya energii [Modular structure – energy saving]. *Mir transporta [World of Transport and Transportation]*, 2013, no. 5, pp. 28–37. (In Russian)
4. Grebenyuk P. T. Prodol'naya dinamika poyezda [Longitudinal dynamics of the train]. *Proceedings of VNI-IZhT*. Moscow, Intekst Publ., 2003, 95 p. (In Russian)
5. Ponomareva E. V. Prichiny obryva gruzovykh poyezdov [Causes of the breaking away of freight trains]. *Lokomotiv Inform*, 2011, no. 12, pp. 25–27. (In Russian)
6. Lyaushkin A. A., Parshikov V. A. & Astaf'yev I. A. Analiz obryvov i samorastsepov avtostsepok [Analysis of breaking away and self-disengagement of automatic couplers]. *Aktual'nyye voprosy nauki i tekhniki [Current Issues of Science and Technology]*. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]*. Voronezh, June 16, 2015. Voronezh, Runa Publ., 2015, no. 2, 222 p. (In Russian)

7. Barbarich S. S. O sozdanii spetsializirovannogo vagona-platformy dlya konteylernykh i konteynernykh perevozok na “Prostranstve – 1520” [Discussing the creation of a specialized flatcar for piggyback and container transportation within the 1520 space]. *Vagony i vagonnoye khozyaystvo [Wagons and Carriage Facilities]*, 2013, no. 1(33), pp. 15–20. (In Russian)

8. Loginova E. Yu., Kovalenko A. V. & Karasev S. I. Povysheniye ekonomichnosti motornykh vagonov s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami [Improving the efficiency of motor cars with asynchronous traction motors]. *Bezopasnost' dvizheniya poyezdov [Train traffic safety]. Trudy Dvenadtsatoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Proceedings of the Twelfth Scientific and Practical Conference]*. Moscow, MIIT Publ., 2011, pp. 23–37. (In Russian)

9. *Methodological guidelines for the formation of outbound certificates of a conditional economic assess-*

ment of additional costs associated with delays of freight trains due to failures of category 1 and 2 technical means. Approved by order of JSC Russian Railways no. 696r dated April 11, 2017. Moscow, JSC RZD Publ., 2017. (In Russian)

10. Order of JSC Russian Railways no. 778/r dated April 18, 2018. *On approval of expenditure rates and estimated cost levels for economic tasks.* (In Russian)

Received: May 25, 2020

Accepted: July 02, 2020

Author's information:

Anatoly A. ZAITSEV – D. Sci. in Economics, Professor; nozpgups@gmail.com

Pavel S. TROITSKIY – Postgraduate Student; paveltroickiy@mail.ru

УДК 550.370: 550.379

Опыт изучения структуры и петрофизики мерзлых грунтов участка автодороги «Вилюй» в г. Якутске методом георадиолокации

Л. Г. Нерадовский¹, Л. Л. Фёдорова², К. О. Соколов²

¹ Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, Российская Федерация, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36

² Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, Российская Федерация, 677000, Якутск, пр. Ленина, 43

Для цитирования: *Нерадовский Л. Г., Фёдорова Л. Л., Соколов К. О.* Опыт изучения структуры и петрофизики мерзлых грунтов участка автодороги «Вилюй» в г. Якутске методом георадиолокации // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 353–365. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-353-365

Аннотация

Цель: Обратить внимание на необходимость изучения методом георадиолокации не только структуры, но и петрофизических особенностей мерзлых грунтовых оснований объектов транспортного строительства и показать пример этому на участке реконструируемой федеральной автодороги «Вилюй». **Методы:** Проводится динамическое преобразование радарограммы с помощью программы «Коефф» с вычислением коэффициента ослабления амплитуд импульсов в сигналах георадиолокации (k). **Результаты:** Построен разрез значений k , отображающий петрофизическую модель неоднородностей мерзлых грунтов со сложной конфигурацией границ. **Практическая значимость:** Невидимые на радарограмме петрофизические неоднородности, характеризующие состав, свойства и состояния мерзлых грунтов, имеют особую ценность для решения проектно-изыскательских и строительно-эксплуатационных задач на объектах транспортного строительства. Подтверждена репрезентативность средней скорости распространения электромагнитной волны в мерзлых грунтах песчано-глинистого состава, которая равна 0,134 м/нс. Эта априорная оценка позволяет без данных буровых работ с приемлемой ошибкой строить по данным георадиолокации в масштабе глубины петрофизические модели в пределах г. Якутска и обширной Центрально-Якутской равнины на всех стадиях проектно-изыскательских работ на трассах инженерных линейных сооружений.

Ключевые слова: Автодорога, скважины, мерзлые грунты, глубина залегания границ, сигналы георадиолокации, время задержки и амплитуда импульсов, коэффициент затухания, модели.

Введение

При проведении инженерно-геологических изысканий объектов транспортного строительства – трасс линейных сооружений (автодорог, железных дорог и др.) в настоящее время широко и успешно применяется метод георадиолокации. Большой вклад в развитие георадиолокации грунтовых оснований линейных сооружений внесли А. М. Кулижников, В. А. Явна, М. Л. Владов, Г. Г. Коншин, А. Г. Круглый, Е. С. Ашпиз, А. А. Белозеров. Анализ литерату-

ры, например в постоянно обновляемом А. П. Зарубиним списке библиографии [1], показывает одностороннее развитие георадиолокации не только при изучении грунтовых оснований линейных сооружений, но и в целом всей геологической среды. При одностороннем развитии георадиолокации отчетливо проявляется тенденция исследования структуры грунтовых и геологических сред, т. е. наиболее легкого в достижении цели визуального анализа радарограмм с констатацией числа, формы, местоположения и взаимоотношения радиотражающих границ.

Такой информацией в большинстве случаев удовлетворяются инженерное и научное сообщества, не обращая внимания на необходимость изучения невидимой стороны радарограмм, за которой скрываются особенности амплитудного ослабления сигналов георадиолокации. Данные особенности представляют собой результат энергетического взаимодействия электромагнитной волны мегагерцового диапазона частот не с поверхностью пород и грунтов, а с их составом, свойствами и состоянием, т. е. со всеми минеральными, петрографическими, криогенными, гидрогеохимическими особенностями, которые образуют внутренний облик пород и грунтов в точном соответствии с их возрастом и генезисом. Такое понимание природного единства энергетического взаимодействия физических полей с геологическими системами Земли возникает из идеи причинно-следственной связи всего известного и еще неизвестного комплекса геолого-геофизических характеристик, заложенной в грунтоведении Е. М. Сергеевым [2, с. 7]. Эта идея до сих пор не потеряла методологической ценности в решении задач петрофизики пород и грунтов.

Цель настоящей статьи – показать на фактическом материале, полученном в г. Якутске, плодотворность совместного применения кинематического и динамического атрибутов сигналов георадиолокации для изучения структуры и петрофизики мерзлых грунтов, слагающих основания трасс линейных сооружений.

Участок работ

Работы методом георадиолокации были проведены в марте 2011 г. на участке реконструируемой автодороги «Виллюй». Участок работ, длиной 360 м, расположен на западной окраине г. Якутска между зданием поста ГАИ и Хатын-Юряхским шоссе [3].

В геоморфологическом отношении [4] участок работ находится на поверхности 2-й высокой террасы (Сергелляхской) вблизи тылового шва высокого левого берега долины

р. Лены, представляющего собой эрозионно-денудационную равнину, называемую геологами Мыранновой грядой. На границе Сергелляхской террасы с этой грядой расположены многочисленные озера, старицы и протоки разных форм и размеров.

В центральной части участка до глубины 10 м пробурены две опорные инженерно-геологические скважины (далее – скважины) с измерением по стволу скважин температуры грунтов и отбором из керна скважин проб на лабораторное определение физико-механических свойств грунтов.

По данным бурения скважин разрез основания автодороги сложен до глубины 0,7–1,0 м насыпными грунтами песчано-гравийного состава. Ниже насыпи автодороги до изученной глубины 10 м залегают мерзлые дисперсные грунты озерно-болотного и аллювиального генезиса.

Озерно-болотные фации сложены линзами супесей коричневого цвета и в разной степени засоленными пылеватыми песками с включением органических остатков (торфов, илов). Включения растительных веществ (детритов) наблюдается в рассеянном или сконцентрированном виде по всему разрезу отложений. Аллювиальные отложения сложены незасоленными светло-серыми песками мелкой и средней крупности. Местами и в песках встречаются включения органики и детритов. В таких случаях цвет песков изменяется на темно-серый. Общая мощность мерзлой толщи отложений озерно-болотного и аллювиального генезиса на Сергелляхской террасе в большинстве случаев равна 25 м и редко достигает 40 м.

Сравнительно простое литологическое строение разреза автодороги существенно усложняется в условиях неравномерного и непредсказуемого распределения по глубине и латерали суммарной влажности (льдистости) и температуры мерзлых грунтов. На участке бурения опорных скважин С-2 и С-3 пространственная изменчивость влажности и температуры по коэффициенту вариации соответственно равна 51,6 и 32,7%. При средних медианных показателях 33% и

–4,0 °С единичные значения влажности (льди-ности) и температуры изменяются от 8 до 84% и от –2,2 до –6,9 °С. В нижней части разреза на глубине 10 м значения влажности (льдиности) и температуры в точках скважин С-2 и С-3 равны 51, 18% и –4,1, –2,5 °С. В относительной мере разница составляет 48,5 и 95,6%. Видно, что по трассе автодороги между недалеко расположенными скважинами (на расстоянии 43 м) основные показатели свойств мерзлых грунтов изменяются весьма существенно, в особенности показатель влажности.

Методика георадиолокации

Измерение сигналов георадиолокации на участке реконструируемой автодороги «Виллюй» выполнялось в непрерывном режиме георадаром «ОКО-2 М» по методике обследования двухполосных автодорог [5] с антенным блоком АБ-400 для детального изучения на частоте 400 МГц верхней части грунтового основания автодороги до глубины 5 м.

Блок антенн перемещался на специальных лыжах автомобилем ГАЗ «Соболь» со скоростью движения 20 км/ч в прямом контакте с поверхностью автодороги. Привязка точек измерений сигналов сделана приемником GPS/ГЛОНАСС с использованием колесного датчика перемещения «ДП-32». Дополнительно на записываемой радарограмме ставились маркеры возле каждого столба линии электрического освещения трассы автодороги «Виллюй». Запись радарограммы делалась блоком обработки и управления в связке с антенным блоком по линии профиля, проходящего между опорными точками скважин С-2 и С-3, пробуренных на обочине автодороги.

Построение радарограммы и ее математическая обработка выполнялись программой «GeoScan32» [6]. Из имеющихся модулей обработки применялись модули вычитание среднего, медианной фильтрации и деконволюции, усиливающие четкость визуализации радиоотражающих границ. Кинематическим и динамическим атрибутами при обработке радарограммы

были двойное время задержки (далее – время задержки) и амплитуда импульсов, прошедших расстояние от дневной поверхности до отражающих грунтовых границ и обратно.

Программа «Koeff»

Эта программа была написана К. О. Соколовым на языке Delphi по алгоритму, предложенному Л. Г. Нерадовским [7] с целью вычисления значений коэффициента затухания (k), выражающего собой меру видимого ослабления в сигналах георадиолокации амплитуд импульсов при росте времени задержки. В свою очередь, этот процесс характеризует степень затухания электромагнитной волны в мерзлых грунтах, которая зависит от их строения, состава, свойств и состояния.

В программе «Koeff» реализована известная идея применения методов регуляризации для приближенного решения некорректных математических задач, т. е. тех задач, решение которых неустойчиво к малым изменениям исходных данных. В рассматриваемом случае такими данными выступают сигналы георадиолокации.

Теория статистической радиофизики и практика георадиолокации, например при изучении горных ледников [8, с. 62–67] или мерзлых грунтов [9, 10], свидетельствуют, что сигналы георадиолокации есть случайные амплитудно-фазовые реализации потока отраженных, рассеянных и дифрагированных импульсов, образовавшихся в процессе скоростного взаимодействия электромагнитной волны с геологическими границами. Потому для регуляризации случайных реализаций импульсов был применен вероятностный подход, который в СССР впервые в 1964 г. предложили Л. А. Халфин и В. Н. Судаков [11]. В программе «Koeff» он задействован с использованием экспоненциальной и степенной функций, которые в той или иной степени корректно и адекватно аппроксимируют на фоне случайных амплитудно-фазовых вариаций закономерный процесс нели-

нейного уменьшения амплитуды импульсов с ростом времени задержки.

Алгоритм программы «Koeff» предусматривает выбор степенной или экспоненциальной функции для нелинейной аппроксимации графиков амплитуд импульсов. За значение k принимается показатель степенной или экспоненциальной функции. Для его определения допускаются три варианта выборки импульсов с относительными максимумами амплитуд. В первом варианте выбираются импульсы с максимальными значениями, измеренными в период роста амплитуды, во втором – импульсы в период убывания амплитуды. Третий вариант объединяет первый и второй варианты.

Важная черта программы «Koeff» – нормирование амплитуд импульсов, отраженных от границ пород и грунтов, на максимальную амплитуду начального зондирующего импульса, который в георадиолокации обычно называют сигналом прямого прохождения. Такая простая операция приводит к важному результату – оценка значений k становится независимой от влияния поверхностной помехи, а именно, варьирования амплитуды зондирующего импульса в зависимости от изменчивостей условий контакта антенн георадара с поверхностью автодороги и состояния слоя насыпных грунтов. Влияние поверхностной помехи бывает настолько сильным, что без ее устранения полностью экранируется природная изменчивость значений k в нижней части основания автодороги.

Программа «Koeff» оценивает выборочные значения k в двумерном окне анализа. Длина окна может быть любой, но не должна превышать размер первой зоны Френеля. Длину окна желательно задавать равной нечетному числу, чтобы результат оценки k можно было отнести к середине окна с конкретным номером трассы. Так, при длине окна, охватывающей 171 трассу, его можно отнести к трассе № 86.

Ширина окна в направлении координаты времени задержки (глубины) не остается постоянной и по желанию исследователя может избирательно изменяться. Результат оценки k относится к середине ширины окна, например

при ширине, равной 185–300 нс, он присваивается времени задержки 185,5 нс.

Окно анализа с заданными длиной и шириной автоматически сдвигается по радарограмме с шагом, равным одной трассе. Результаты работы программы «Koeff» помещаются в папках. Содержимое папок дает возможность для дальнейших углубленных аналитических исследований пространственных (по глубине и вдоль трассы автодороги) изменений значений k . В одной из папок хранится информация, по которой с помощью программы «Surfer» можно построить тоновые изображения с тонкими цветовыми переходами пространственных изменений в грунтовом основании автодороги амплитуды импульсов и значений k .

Анализ радарограммы – структурной модели

Радарограмма (рис. 1) представляет одну из сторон радиофизического образа строения мерзлого грунтового основания автодороги. Этот образ выражается двумерным распределением мгновенных или, иначе говоря, текущих во время измерения георадаром значений амплитуд импульсов вдоль трассы автодороги и по времени задержки. Такая картина в черно-белом или тональном изображении дает возможность увидеть результат кинематического (скоростного) взаимодействия электромагнитной волны мегагерцового диапазона частот с геометрическим строением мерзлых грунтов. Видимая сторона радарограммы тем и важна, что и без данных буровых работ в общих чертах дает правильное представление о строении инженерно-геологического разреза и справедливо может рассматриваться как структурная модель мерзлого грунтового основания автодороги.

Опишем радарограмму, построенную в масштабе глубины по средней скорости распространения электромагнитной волны 0,134 м/нс, как структурную модель мерзлого грунтового осно-

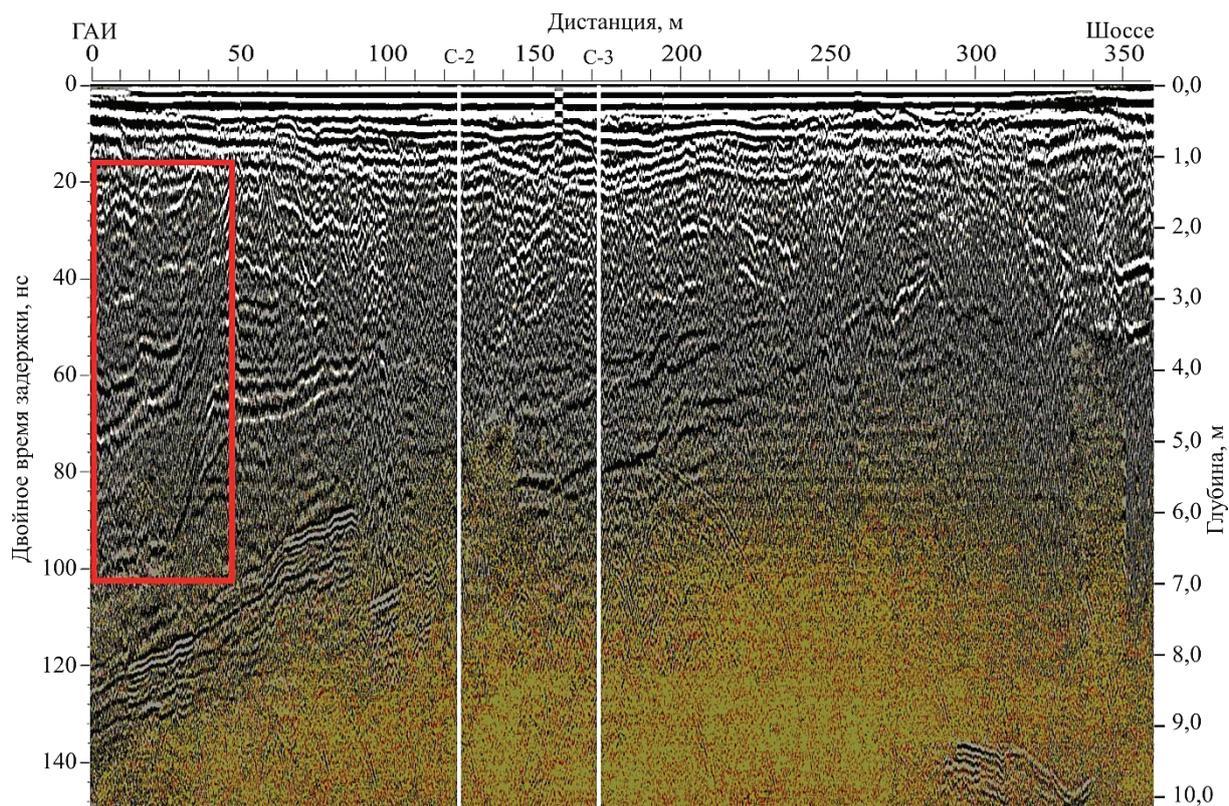


Рис. 1. Запись радарограммы, сделанной георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБ-400 на участке реконструируемой автодороги «Виллой» в г. Якутске (объяснение в тексте)

вания автодороги, обращая внимание лишь на некоторые особенности модели.

Первая особенность – горизонтальные радиоотражающие границы, наблюдаемые в приповерхностной части радарограммы. В целом они отчетливо прослеживаются от здания поста ГАИ до Хатын-Юряхского шоссе на среднем времени задержки 5 нс (0,27 м). По скважинам С-2 и С-3 эта часть модели соответствует асфальтобетонному полотну автодороги с пропиткой битумным раствором.

Ниже наблюдаются субгоризонтальные радиоотражающие границы, которые составляют вторую особенность модели. По скважинам С-2 и С-3 природа границ связана с технологически необходимым неравномерным распределением по глубине гранулометрического состава гравийно-песчаной смеси во время строительства автодороги. Границы в насыпном слое грунтов отчетливо прослеживаются от здания

поста ГАИ на расстояние 243 м и времени задержки 12–22 нс (0,80–1,47 м). Далее прослеживаемость границ ухудшается в интервале расстояний 291–317 м. Такой визуальный признак указывает на деформацию полотна и насыпи автодороги. Обычно это происходит из-за действия в сезонноталом слое (СТС) процесса фильтрации надмерзлотных вод с вымыванием частиц грунта в теплый период года и криогенного метаморфизма с пересортировкой частиц грунта в холодный период года с полным промерзанием СТС.

Третья особенность модели – насыщенность радиоотражающих границ ниже насыпного слоя автодороги до времени задержки, равного 70–108 нс (4,69–7,24 м). В пространственном взаимоотношении границ трудно увидеть какой-либо порядок, хотя он и существует при детальном рассмотрении радарограммы. Очень сложное строение радиоотражающих границ на-

следует генетическую природу процесса осадконакопления озерно-болотных отложений, с последующим наложением на границы этих отложений с тонкими ритмическими фациальными переходами процесса промерзания с появлением дополнительных границ криогенных текстур грунтов с неравномерным распределением льдистости и засоленности. Как следует из данных бурения скважин С-2 и С-3, разрез озерно-болотных отложений представлен до глубины 5,5 и 6,5 м преимущественно пылеватыми песками с единичными линзами супесей и включениями органики в виде торфа, ила и детритов. Ниже залегает толща аллювиальных отложений преимущественно в виде песков мелкой и средней крупности с прослоями пылеватых песков. В этой толще также встречаются включения органики и растительных веществ. По данным георадиолокации граница между озерно-болотными и аллювиальными отложениями находится на времени задержки 84 нс (7,24 м). Таким образом, в относительной метрике разность между данными бурения скважин и георадиолокации в положении рассматриваемой границы невелика и составляет 14,0%.

Четвертая особенность модели выражается на радарограмме наклоном границы озерно-болотных и аллювиальных отложений в сторону здания поста ГАИ. В этом направлении интересующая нас граница начинается на дистанции 282 м и на времени задержки 38 нс (глубина 2,55 м) и отчетливо прослеживается до дистанции 172 м на времени задержки 80 нс (глубина 5,36 м) с углом падения 2–3°. С таким же очень пологим углом падения граница прослеживается с перерывами до здания поста ГАИ, погружаясь до глубины 8,04–8,71 м (время задержки 120–130 нс). Таким образом, мощность озерно-болотных отложений достигает максимального значения в том месте, где автодорога переходит в понижение рельефа местности, т. е. в одну из засыпанных стариц р. Лены.

В нижней части радарограммы в соответствии с положением и наклоном опорной литологической границы озерно-болотных и ал-

лювиальных отложений радиоотражающих границ нет.

Пятая особенность структурной модели расположена в верхнем левом углу радарограммы (контур красного цвета) в интервале времени задержки 16–106 нс. Визуально рассматриваемая особенность выражается в резком смещении всего комплекса радиоотражающих границ озерно-болотных отложений, начиная с дистанции 48 м. Плоскость смещения границ наклонена по отношению к поверхности автодороги под углом 15°.

Возникает вопрос, каковы причины образования пятой особенности структурной модели и природа находящихся в ней радиоотражающих границ? К сожалению, точно ответить на поставленный вопрос невозможно из-за отсутствия данных бурения контрольной скважины в этом месте автодороги.

Тем не менее, если обратиться к рассмотрению рельефа местности, то исследуемый участок автодороги расположен в примыкании к тыловому шву левобережья долины р. Лены, где развита сеть стариц, проток и озер. Исходя из этого, причина образования пятой особенности – часть одной из засыпанных стариц во время строительства автодороги «Виллой».

Правый берег старицы по данным георадиолокации начинается в 48 м от здания поста ГАИ. По этим же данным сравнительно ровное дно старицы в 24 м от здания поста ГАИ залегает на глубине 2,68 м (время задержки 56 нс), а у самого здания поста ГАИ – на глубине 3,14 м (время задержки 64 нс). Дно старицы, как и положено, по общим законам осадконакопления, покрыто илистыми отложениями до глубины 5,09–6,05 м (время задержки 92–104 нс), ниже которых залегают песчаные отложения.

Структура радиоотражающих границ в пределах засыпанной старицы р. Лены позволяет предположительно разделить общий слой илистых отложений на две части. Первая часть представляет рыхлые илы, которые залегают на глубине от 2,68–3,14 до 3,49–4,02 м (время задержки от 56–64 до 68–76 нс); вторая – более древние, а значит, и более литифицированные

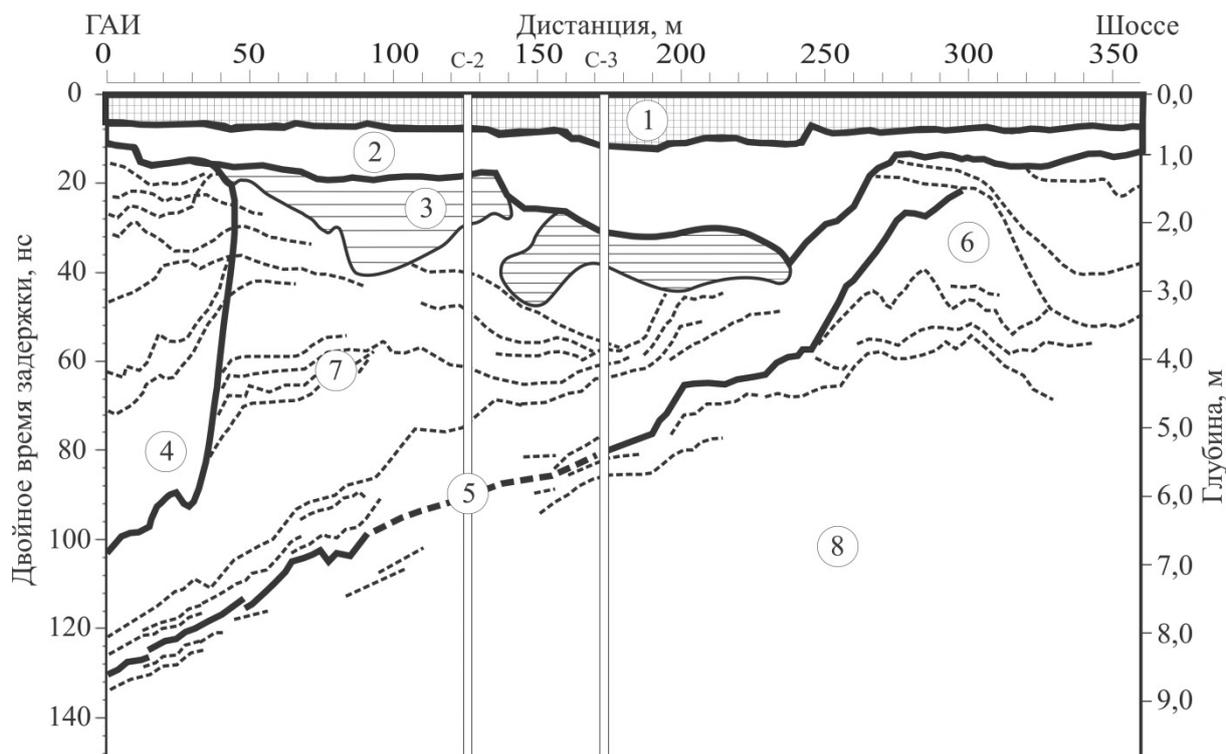


Рис. 2. Схема структурной модели мерзлого грунтового основания участка реконструируемой автодороги «Вилуй» в г. Якутске:

- 1 – асфальтобетонное полотно автодороги; 2 – слой насыпных грунтов гравийно-песчаного состава; 3 – линзы супесей; 4 – засыпанная старица р. Лены; 5 и 6 – предполагаемая и коррелируемая границы глинистых озерно-болотных и песчаных аллювиальных отложений; 7 – вспомогательные литолого-фациальные границы; 8 – мерзлая толща аллювиальных отложений

илы, залегающие на глубине 5,09–6,05 м (время задержки 92–104 нс).

Таким образом, по данным георадиолокации мощность разновозрастных илов (молодых и древних) предположительно равна 0,81–0,88 и 1,6–2,03 м.

Схема структурной модели изученного участка автодороги «Вилуй» со всеми рассмотренными особенностями показана на рис. 2.

Динамическое преобразование радарограммы – петрофизическая модель

Распределение значений k на радарограмме по времени задержки (глубине) и по дистанции

(вдоль автодороги) есть динамический образ радиофизической модели грунтового основания автодороги. В отличие от структурной модели такая модель представляет невидимый на радарограмме результат слабо изученного сложнейшего процесса энергетического взаимодействия электромагнитной волны высокой частоты с составом, свойствами и состоянием мерзлых грунтов. Результат взаимодействия проявляется в потере энергии волны в виде ее различного затухания в зависимости от пространственной изменчивости всего внутреннего облика мерзлых грунтов. Потому модель грунтовой среды, отображающей итог энергетического взаимодействия волны с грунтами, с полным правом относится к разряду петрофизических моделей. Такие модели несут более полные, а значит, и

более ценные сведения о петрофизике мерзлых грунтов, необходимые для решения научных и прикладных задач проектирования инженерных сооружений. Для решения этих задач перво-степенное значение имеет знание статистических связей лабораторных показателей состава, свойств и состояния мерзлых грунтов с характеристиками геофизических полей (естественных и искусственных), в частности, с коэффициентом амплитудного ослабления импульсов сигналов георадиолокации k , характеризующего видимое затухание и рассеяние энергии электромагнитной волны.

Преобразование радарограммы из масштаба времени задержки в масштаб глубины выполнялось по априорной оценке средней скорости распространения электромагнитной волны в мерзлых грунтах. Для обширной и интенсивно промышленно осваиваемой территории Центрально-Якутской равнины и г. Якутска, частью которой он является, средняя скорость в мерзлых грунтах песчано-глинистого состава равна 0,134 м/нс [9].

Динамическое преобразование радарограммы было выполнено с использованием программы «Koeff» [7]. Результат преобразования представлен на рис. 3 в виде тоновых разрезов пространственной изменчивости на разных срезах глубин значений k в интервале от 0,6 до 7,2 м, что соответствует середине ширины начального (4,5–13,5 нс) и конечного (55,5–153,6 нс) окон анализа амплитуд импульсов. Разрезы построены с использованием программы «Surfer» с интерполяцией значений k способом Kriging.

Главными особенностями петрофизической модели автодороги являются две горизонтально ориентированные полосы с аномально высокими значениями затухания (выше $4,0 \text{ м}^{-1}$). Первая полоса разобрана на участки с разными размерами и конфигурацией границ и расположена в насыпном слое автодороги на глубине от 0,6–1,0 до 2,0–2,6 м. Вторая почти сплошная и более мощная полоса, чем первая, залегает в среднем на глубине от 3,6 до 6,4 м.

По данным бурения скважин С-2 и С-3 природа аномалий затухания неоднозначна. При-

рода первой аномальной полосы обусловлена присутствием в верхней части автодороги линз супеси коричневого цвета. Такой цвет свидетельствует, что супеси содержат большое количество заторфованных частиц, которые, как известно, являются материнской средой для легкорастворимых солей и связанной незамерзшей воды. Они и служат активными поглотителями энергии электромагнитной волны.

Природа второй аномальной полосы объясняется ее приуроченностью к озерно-болотным отложениям, сложенным пылеватыми песками с включениями торфа и ила, которые не меньше, чем супеси, насыщены незамерзшей водой и солями. В поровом пространстве минерального скелета грунтов они часто образуют прослои в разной степени минерализованных растворов легкорастворимых солей, незамерзающих при температуре ниже нуля градусов по Цельсию.

Такие образования в мерзлотоведении принято называть криопэгами. В рассматриваемом случае центральные части аномалий с максимальным удельным затуханием (более $6,0 \text{ м}^{-1}$) с большой вероятностью можно считать местом присутствия в озерно-болотных отложениях прослоев и линз криопэгов. При средней скорости распространения в криопэгах электромагнитной волны, равной 0,03–0,05 м/нс [9], мощность криопэгов равна 0,17–0,45 м, среднее ее значение не более 0,3 м.

Гистограммный анализ показал, что доля криопэгов, идентифицируемых по аномальным значениям k , составляет в мерзлых грунтах 13,8%. В численном выражении это не много, но для безаварийной эксплуатации автодороги такая доля криопэгов представляет потенциальную угрозу в части появления на проезжей части автодороги непредсказуемых просадок и деформаций, во-первых, из-за неблагоприятных для строительства и эксплуатации инженерных сооружений инженерно-геологических характеристик криопэгов, во-вторых, из-за непредсказуемого характера их изменчивости местоположения, мощности и минерализации.

Руководствуясь общим строением петрофизической модели озерно-болотные отложения

с повышенным затуханием электромагнитной волны (более $3,7 \text{ м}^{-1}$) в целом слагают основание автодороги до 6,9 м.

По данным бурения скважин С-2 и С-3 эта граница залегает в пылеватых песках на глубине 5,5 и 6,5 м, т. е. определяется по данным георадиолокации с ошибкой 0,2 и 0,8 м (3,3 и 13,1%).

На общем фоне петрофизической модели особое внимание привлекает локальная неоднородность небольших размеров в левой средней части радарограммы на глубине 4,1–4,9 м. Неоднородность характеризует мерзлые грунты с полным отсутствием затухания электромаг-

нитной волны. Такие волновые эффекты нередки как в георадиолокации, так и в сейсморазведке. Они образуются вследствие прямого или бокового сильного отражения радиоимпульсов от одной или нескольких границ.

Приуроченность к засыпанной старице р. Лены и наличие в этом месте радиоконтрастных отражающих границ (см. рис. 1) позволяет сделать вывод о предполагаемой причине образования неоднородности со сложной конфигурацией границ. Такой причиной являются границы высокольдистых образований в виде как слоев льда замерзшей воды старицы, так и слоисто-

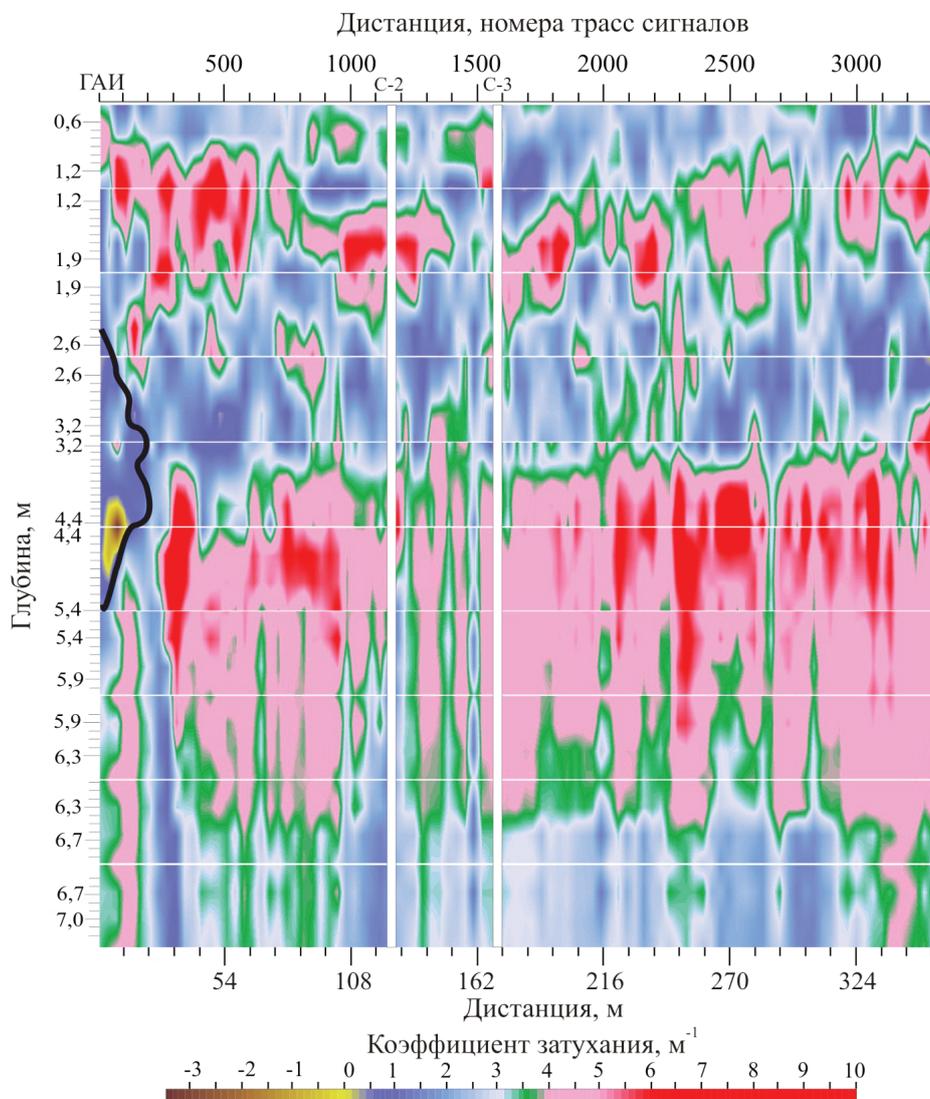


Рис. 3. Послойный разрез значений k – петрофизическая модель мерзлого грунтового основания участка реконструируемой автодороги «Вилуей» в г. Якутске (объяснения в тексте)

сетчатой текстуры сегрегационного льда в промерзших илистых отложениях старицы.

Обратим внимание на интересную деталь. Она представляет обрамление неоднородности (черная линия на рис. 3) от вертикально ориентированной ее части в сторону Хатын-Юряхского шоссе и истолковывается, как боковое ответвление (апофиз) талика засыпанной старицы р. Лены. Такая промерзшая и скорее всего льдистая часть талика мощностью около 1 м и с низким затуханием электромагнитной волны от 0,5 до 2,0 м⁻¹ предположительно внедряется в озерно-болотные отложения на расстоянии примерно до 20 м.

Рассмотренная деталь петрофизической модели есть типичная черта конфигурации подруловых таликов стариц, проток и озер, во множестве расположенных в г. Якутске и на прилегающей к нему территории Центрально-Якутской равнины.

Точность построения моделей

Статистический анализ глубины залегания грунтовых границ между данными бурения скважин С-2 и С-3 и георадиолокации позволил узнать, с какой ошибкой построены модели мерзлого грунтового основания автодороги «Виллюй» при использовании априорной оценки средней скорости 0,134 м/нс [9]. Тестовая проверка, сделанная в программе «Stadia» [12], удостоверяет, что вероятностное распределение ошибок удовлетворяет нормальному закону. Это означает, что георадиолокация с равной вероятностью завышает–занижает относительно данных буровых работ глубину залегания как литолого-фациальных, так и криогенных границ. Ошибки по автодороге варьируют от –0,9 до +0,7 м, среднее значение ±0,15 м. Где-то в этом интервале с вероятностью 95% находится неизвестное нам истинное значение средней ошибки георадиолокации, которую мысленно можно было бы оценить по бесконечному числу ошибок в генеральной совокупности всего г. Якутска. В 70% случаев ошибки по автодоро-

ге распределены в диапазоне ±0,42 м (16,6%). Такая доверительная вероятность, издавна принятая в геологии для оценки достоверности результатов работ всех методов геофизики, и погрешность изучения мерзлых грунтов методом георадиолокации приемлема для построения моделей грунтового основания автодорог.

Заключение

Динамическая обработка вообще любой радарограммы с помощью программы «Кoeff» позволяет получить новые знания в слабо изученной области энергетического взаимодействия с мерзлыми грунтами электромагнитных волн высокой частоты. В прикладном, но опять же научном значении результаты динамического преобразования конкретной радарограммы автодороги «Виллюй» показывают реальную возможность более полного, а значит и более достоверного изучения мерзлых грунтов с выходом на количественные оценки их инженерно-геологических характеристик (состава, свойств, состояния), используя вероятностно-статистические связи с геофизическими характеристиками, в частности с волновой – коэффициентом затухания амплитуды импульсов сигналов георадиолокации в мерзлых грунтах.

В практическом плане построение с приемлемой для практики ошибкой традиционной структурной модели и предлагаемой петрофизической модели дают при проведении проектно-изыскательских работ разноплановую и более полную информацию о инженерно-геологической модели мерзлого грунтового основания любого объекта транспортного строительства.

Библиографический список

1. Зарубин А. П. Подповерхностное зондирование: Отечественная библиография за 1990–2017 гг. / А. П. Зарубин. – URL : <http://www.prometeus.nsc.ru/partner/zarubin/sonde2.ssi>. – Загл. с экрана (дата обращения : 14.04.2020 г.).

2. Сергеев Е. М. Методологические основы грунтоведения / Е. М. Сергеев // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. – М. : Изд-во Моск. гос. ун-та, 1968. – Вып. 2. – С. 5–16.
3. Федорова Л. Л. Методика георадиолокационной оценки влажности дисперсных горных пород / Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин // Наука и образование. – 2017. – № 4. – С. 72–76.
4. Гриненко В. С. Геологическое строение Большого Якутска / В. С. Гриненко, В. А. Камалетдинов, Ю. Л. Сластенов, О. И. Щербаков // Региональная геология Якутии. – Якутск : Изд-во Якутск. гос. ун-та, 1995. – С. 3–20.
5. Методические рекомендации по применению георадаров при обследовании дорожных конструкций / Служба дорожного хозяйства РФ (РОСАВТО-ДОР). – М. : Министерство транспорта РФ, 2003. – 37 с.
6. Программа управления георадаром ОКО-2 и визуализации получаемых данных : иллюстр. руководство пользователя. – Версия 2.5. – М. : ООО «ЛОГИС», 2009. – 132 с.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661470, Российская Федерация. Анализ георадиолокационных данных на основе аппроксимации амплитудных значений степенной функцией / К. О. Соколов, Л. Г. Нерадовский. – Заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского» Сибирского отделения Российской академии наук. – № 2015618054. – Заявл. 02.09.2015 г. ; опубл. 20.11.2015 г. – Бюл. № 11. – 1 с.
8. Мачерет Ю. Я. Опыт применения импульсного высотомера РВ-10 для измерения толщины «теплых» горных ледников с их поверхности / Ю. Я. Мачерет, Л. А. Суханов // Материалы гляциологических исследований : Хроника. Обсуждение. – М. : Ин-т географии АН СССР, 1970. – Вып. 17. – С. 60–71.
9. Нерадовский Л. Г. Изучение состояния и свойств мерзлых грунтов и криопэгов методом георадиолокации : дис. ... канд. техн. наук, специальность: 25.00.08 / Л. Г. Нерадовский. – Якутск : Рос. акад. наук, Сиб. отд., Ин-т мерзлотоведения, 2005. – 204 с.
10. Нерадовский Л. Г. К вопросу о стохастической природе сигналов георадиолокации / Л. Г. Нерадовский // Геофизика. – 2013. – № 2. – С. 58–62.
11. Халфин Л. А. Статистический подход к корректности задач математической физики / Л. А. Халфин, В. Н. Судаков // Докл. АН СССР. – М. : Наука, 1964. – Т. 157. – № 5. – С. 1058–1060.
12. Кулаичев А. П. Методы и средства комплексного анализа данных / А. П. Кулаичев. – М. : ФОРУМ ИНФРА, 2006. – 512 с.

Дата поступления: 14.04.2020

Решение о публикации: 10.06.2020

Контактная информация:

НЕРАДОВСКИЙ Леонид Георгиевич – д-р техн. наук; leoner@mpi.ysn.ru

ФЕДОРОВА Лариса Лукинична – канд. техн. наук, доцент; Lar-fed-90@mail.ru

СОКОЛОВ Кирилл Олегович – канд. техн. наук; k.o.sokolov@ro.ru

Experimental study of the structure and petrophysics of frozen soils of the Vilyui Highway section in Yakutsk using the ground penetrating radar method

L. G. Neradovskiy¹, L. L. Fedorova², K. O. Sokolov²

¹ Melnikov Permafrost Institute, Russian Academy of Sciences Siberian Branch, 36, Merzlotnaya ul., Yakutsk, 677010, Russian Federation

² N. V. Cherskiy Institute of Mining Affairs of the North Region, Russian Academy of Sciences Siberian Branch, 43, Lenina pr., Yakutsk, 677000, Russian Federation

For citation: Neradovskiy L. G., Fedorova L. L., Sokolov K. O. Experimental study of the structure and petrophysics of frozen soils of the Vilyui Highway section in Yakutsk using the ground penetrating radar method. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 353–365. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-353-365

Summary

Objective: To draw attention to the need to study not only the structure but also the petrophysical features of frozen soil foundations of transport construction facilities using the ground penetrating radar method and provide a specific example on the Vilyui Federal Highway section being reconstructed. **Methods:** The dynamic converting of the radargram is carried out using the Koeff program with the calculation of the attenuation coefficient of the pulse amplitudes in the GPR signals (k). **Results:** A section of k values has been plotted, which displays a petrophysical model of frozen soils heterogeneities with a complex configuration of boundaries. **Practical importance:** Petrophysical heterogeneities, which are invisible on the radargram, characterizing the composition, properties and conditions of frozen soils, are of particular value for solving design and survey tasks and construction and operational problems at transport construction facilities. The representativeness of the average velocity of electromagnetic wave propagation in sandy-clay frozen soils amounting at 0,134 m/ns, has been confirmed. This a priori estimate makes it possible, without the drilling data, with an acceptable error, to build GPR-based petrophysical models on a depth scale within the city of Yakutsk and the vast Central Yakutian Lowlands at all stages of design and survey on the routes of engineering line structures.

Keywords: Motorway, boreholes, frozen soils, depth of boundaries, GPR signals, delay time and pulse amplitude, attenuation coefficient, models.

References

1. Zarubin A. P. *Podpoverkhnostnoye zondirovaniye [Subsurface sounding]. National bibliography for 1990–2017*. Available at: <http://www.prometeus.nsc.ru/partner/zarubin/sonde2.ssi>. (accessed: April 14, 2020). (In Russian)
2. Sergeev E. M. *Metodologicheskiye osnovy gruntovedeniya [Fundamental methodology of soil science]. Voprosy inzhenernoy geologii i gruntovedeniya [Problems of engineering geology and soil science]*. Moscow, Publishing House of Moscow State University, 1968, iss. 2, pp. 5–16. (In Russian)
3. Fyodorova L. L. & Kulyandin G. A. Metodika georadiolokatsionnoy otsenki vlazhnosti dispersnykh gornykh porod [Methodology for ground penetrating radar assessment of the moisture content in dispersed rocks]. *Nauka i obrazovaniye [Science and Education]*, 2017, no. 4, pp. 72–76. (In Russian)
4. Grinenko V. S., Kamaletdinov V. A., Slastenov Yu. L. & Shcherbakov O. I. *Geologicheskoye stroyeniye Bol'shogo Yakutskaya [Geological structure of Bolshoi Yakutsk]. Regional'naya geologiya Yakutii [Regional Geology of Yakutia]*. Yakutsk, Publishing House of Yakutsk State University, 1995, pp. 3–20. (In Russian)

5. *Metodicheskiye rekomendatsii po primeneniyu georadarov pri obsledovanii dorozhnykh konstruktсий* [Methodological recommendations for the use of georadars in the road structure surveys]. Federal Road Agency of Russia (ROSAVTODOR). Moscow, Ministry of Transport of the Russian Federation Publ., 2003, 37 p. (In Russian)
6. *Programma upravleniya georadarom OKO-2 i vizualizatsii poluchayemykh dannykh*. Illyustr. rukovodstvo pol'zovatelya. Versia 2.5 [OKO-2 Program for georadar controlling and received data visualizing. User manual with illustrations. Version 2.5]. Moscow, OOO LOGIS Publ., 2009, 132 p. (In Russian)
7. Certificate of State Registration of Computer Program N 2015661470, Russian Federation. *Analiz georadiolokatsionnykh dannykh na osnove approksimatsii amplitudnykh znacheniyey stepennoy funktsiyey* [Analysis of GPR data based on the approximation of amplitude values by a power function]. K. O. Sokolov, L. G. Neradovskiy – applicant and assignee: N. V. Cherskiy Institute of Mining Affairs of the North Region, Russian Academy of Sciences Siberian Branch, no. 2015618054, appl. September 02, 2015, publ. November 20, 2015. Bul. no. 11, 1 p. (In Russian)
8. Macheret Yu. Ya. & Sukhanov L. A. Opyt primeneniya impul'snogo vysotomera RV-10 dlya izmereniya tolshchiny "tyoplykh" gornykh lednikov s ikh poverkhnosti [Experiment of using impulse altimeter RV-10 for measuring the thickness of "warm-based" mountain glaciers from their surface]. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy. Khronika. Obsuzhdeniye* [Materials of glaciological research. Chronicle. Discussion]. Moscow, Institute of Geography, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1970, iss. 17, pp. 60–71. (In Russian)
9. Neradovskiy L. G. *Izucheniye sostoyaniya i svoystv myorzlykh gruntov i kriopegov metodom georadiolokatsii*. Dis. ... kand. tekhn. nauk, specialnost' 25. 00 08 [Studying the state and properties of frozen soils and cryopegs by GPR method]. Thesis of PhD in Engineering, speciality 25.00.08]. Yakutsk, Russian Academy of Sciences Siberian Branch, Permafrost Institute Publ., 2005, 204 p. (In Russian)
10. Neradovskiy L. G. K voprosu o stokhasticheskoy prirode signalov georadiolokatsii [Discussing the stochastic nature of GPR signals]. *Geofizika* [Geophysics], 2013, no. 2, pp. 58–62. (In Russian)
11. Khalfin L. A. & Sudakov V. N. Statisticheskyy podkhod k korrektnosti zadach matematicheskoy fiziki [A statistical approach to estimating the correctness of problems in mathematical physics]. *Dokl. AN SSSR* [Paper of the Academy of Sciences of the USSR]. Moscow, Nauka Publ., 1964, vol. 157, no. 5, pp. 1058–1060. (In Russian)
12. Kulaichev A. P. *Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannykh* [Methods and means for complex data analysis]. Moscow, FORUM, INFRA Publ., 2006, 512 p. (In Russian)

Received: April 14, 2020

Accepted: June 10, 2020

Author's information:

Leonid G. NERADOVSKIY – D. Sci. in Engineering; leoner@mpi.ysn.ru

Larisa L. FEDOROVA – PhD in Engineering, Associate Professor; Lar-fed-90@mail.ru

Kirill O. SOKOLOV – PhD in Engineering; k.o.sokolov@ro.ru

УДК 629.423.1

Оптимизация алгоритмов системы управления электровозов ЗЭС5К с поосным регулированием силы тяги

М. А. Слепцов¹, И. П. Васильев², С. А. Старовойтов^{1,2}, И. Ю. Мартынюк^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Российская Федерация, 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14

² Проектно-конструкторское бюро локомотивного хозяйства – филиал ОАО «РЖД», Российская Федерация, 105066, Москва, Ольховский пер., 205

Для цитирования: Слепцов М. А., Васильев И. П., Старовойтов С. А., Мартынюк И. Ю. Оптимизация алгоритмов системы управления электровозов ЗЭС5К с поосным регулированием силы тяги // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 366–377. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-366-377

Аннотация

Цель: Оптимизация тяговых свойств электровозов приписного парка ОАО «РЖД» на Восточном полигоне с учетом перспективы развития до 2030 г. **Методы:** Для достижения поставленных целей и проверки полученных заключений были использованы методы: экспериментальный, сравнения, экспертных оценок, моделирования, количественной (статистический анализ) и качественной обработки материала. Факторы, влияющие на реализацию максимальной силы тяги локомотива в процессе эксплуатации, оценивались на основе накопленного локомотивным хозяйством опыта за последние десятилетия. **Результаты:** Сформированы рекомендации по корректировке алгоритмов управления и выработке оптимальной технологии вождения поездов массой до 7100 т электровозами серии ЗЭС5К с поосным регулированием силы тяги и независимым возбуждением тяговых электродвигателей. Освещены перспективы развития электровозной тяги на железных дорогах России, в особенности на Восточном полигоне, до 2025 г. **Практическая значимость:** На основании проведенной работы с использованием рекомендаций по корректировке алгоритмов управления и оптимизации технологии вождения поездом возможно повысить эффективность железнодорожных грузоперевозок на Восточном полигоне эксплуатации.

Ключевые слова: Электровоз, локомотив, тяговый привод, поосное регулирование, сила тяги, активизаторы сцепления, боксование колесных пар.

Важным направлением развития ОАО «РЖД» является увеличение объема грузовых перевозок по сети железных дорог России. В соответствии со «Стратегией развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года» прогнозируется рост объемов грузоперевозок на перспективу до 2030 г. по сравнению с базовым 2015 г. на 29,1–36,5% (рис. 1) [1, 2]. В этой связи для достижения прогнозируемых стратегических показателей в настоящее время в локомотивном комплексе осуществляется ряд работ.

К наиболее длительной и масштабной сегодня можно отнести работу по повышению тяговых свойств локомотивов на одном из самых грузонапряженных полигонов – Восточном, который является важнейшим транспортным связующим звеном между Юго-Восточной Азией и Европой.

В рамках этой деятельности проведена научно-исследовательская работа, цель которой – оптимизация тяговых свойств электровозов приписного парка ОАО «РЖД» на Восточном

полигоне с учетом перспективы развития до 2030 г. (рис. 1).

Для достижения данной цели был поставлен комплекс задач, основными из которых являются:

1) определение факторов, влияющих на реализацию локомотивами указанной серии максимальной силы тяги;

2) анализ результатов тягово-энергетических и эксплуатационных испытаний электровозов серии ЗЭС5К с поездами массой 7100 т на Восточном полигоне с 2017 по 2019 г.;

3) формирование рекомендаций по корректировке алгоритмов управления электровозами серии ЗЭС5К с поосным регулированием силы тяги и независимым возбуждением тяговых электродвигателей (ТЭД);

4) формирование рекомендаций по выработке оптимальной технологии вождения поездов массой до 7100 т электровозами серии ЗЭС5К с поосным регулированием силы тяги и независимым возбуждением ТЭД.

По итогам проведенного исследования по изучению существующего парка локомотивов ОАО «РЖД» и вопросов реализации максимальной силы тяги для увеличения объемов грузоперевозок было выявлено, что повышение веса грузовых поездов напрямую зависит от реализуемой длительной силы тяги современных электровозов, которая, как правило, имеет ряд ограничений (рис. 2):

– мощность и тепловые характеристики тягового привода;

– разрешенная нагрузка от одной тяговой оси локомотива и сцепление колес с рельсами пути на участке эксплуатации;

– максимально допустимые растягивающие и сжимающие силы в грузовых поездах повышенного веса;

– основное и дополнительное сопротивление движению на полигоне эксплуатации.

Наиболее критичным фактором на железных дорогах России, ограничивающим силу тяги, в настоящее время является сцепление колеса с рельсом, которое в соответствии с Правилами тяговых расчетов для поездной работы (ПТР)

рассчитывается индивидуально для локомотивов разных серий в зависимости от скорости их движения [3].

Также на реализацию потенциального фактического коэффициента сцепления колес с рельсами и на расчетную тяговую характеристику электровоза оказывают влияние (рис. 2) разброс характеристик ТЭД, разница в диаметрах бандажей колесных пар (КП), схема соединения ТЭД, жесткость тяговых характеристик, развеска локомотива, конструкция экипажной части и схемные настройки противобоксовочной защиты КП тягового подвижного состава (ТПС) [4–10].

В этой связи приоритетное значение для перевозочного процесса имеет максимальное использование тяговых свойств локомотивов, позволяющее повысить уровень ограничения по сцеплению и реализовать максимальную силу тяги, особенно при самых неблагоприятных климатических условиях.

Среди всего разнообразия грузовых электровозов переменного тока локомотивного парка ОАО «РЖД» особого внимания заслуживает модернизированный электровоз серии ЗЭС5К № 434, введенный в эксплуатацию в 2015 г. (совместная разработка специалистов ООО «ПК “НЭВЗ”», ОАО «ВЭЛНИИ» и ОАО «РЖД») и эксплуатирующийся на Восточно-Сибирском полигоне. Его главной особенностью являются технические решения, направленные на повышение тяговых свойств локомотива, а именно поосное регулирование силы тяги, независимое возбуждение ТЭД с классом изоляции Н, увеличение нагрузки на ось до 24,5 т, применение микропроцессорной системы управления локомотивом МСУД-015 с расширенными функциями [4].

В соответствии с ПТР проведено исследование тяговых возможностей электровозов ЗЭС5К с поосным регулированием силы тяги при следовании с поездами массой 7100 т на участке Мариинск КРАС–Тайшет В-СИБ–Карымская ЗАБ–Смоляниново ДВОСТ [3].

Данные расчеты произведены не только точно для определенных условий. Для более

Работы в 2018-2020 гг.

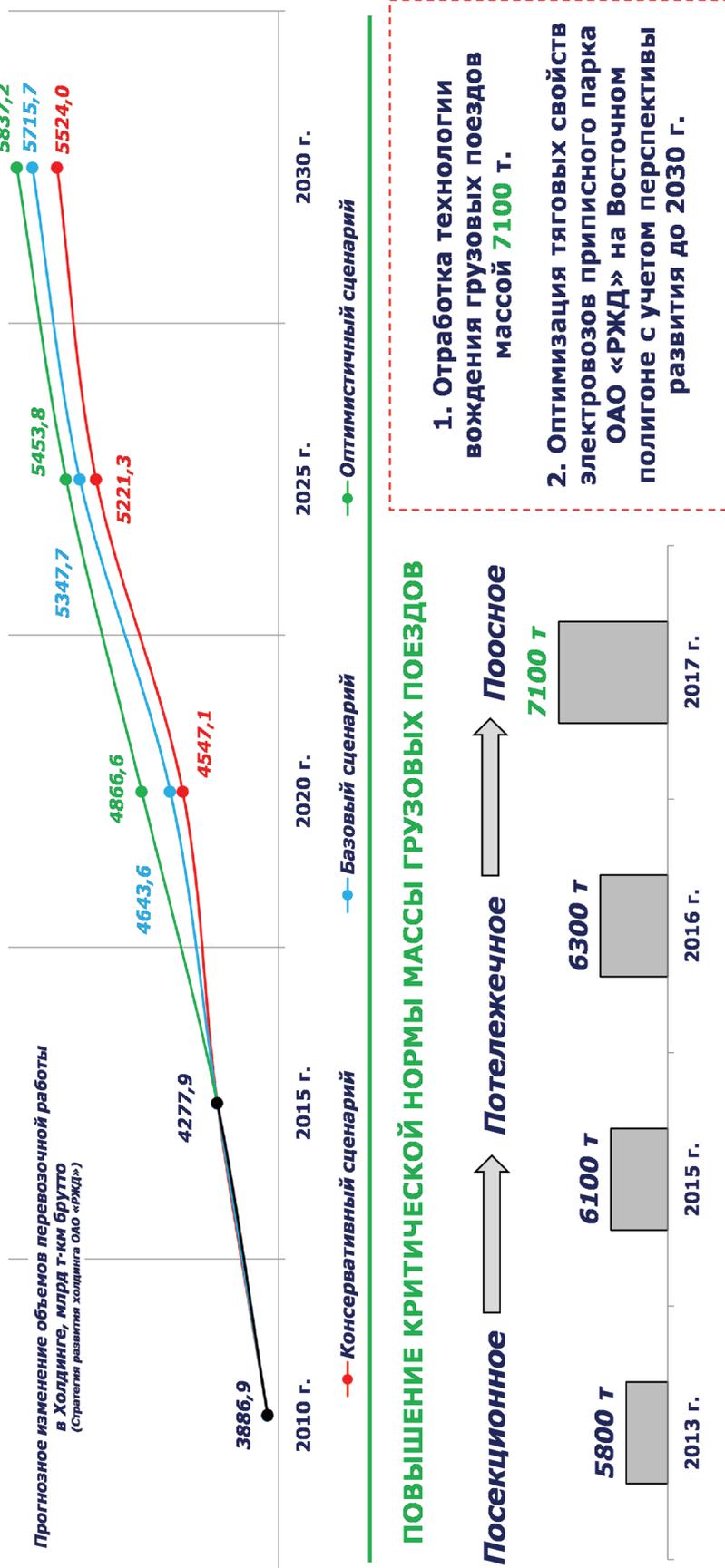


Рис. 1. Оптимизация и повышение тяговых свойств локомотивов на полигонах железных дорог ОАО «РЖД»

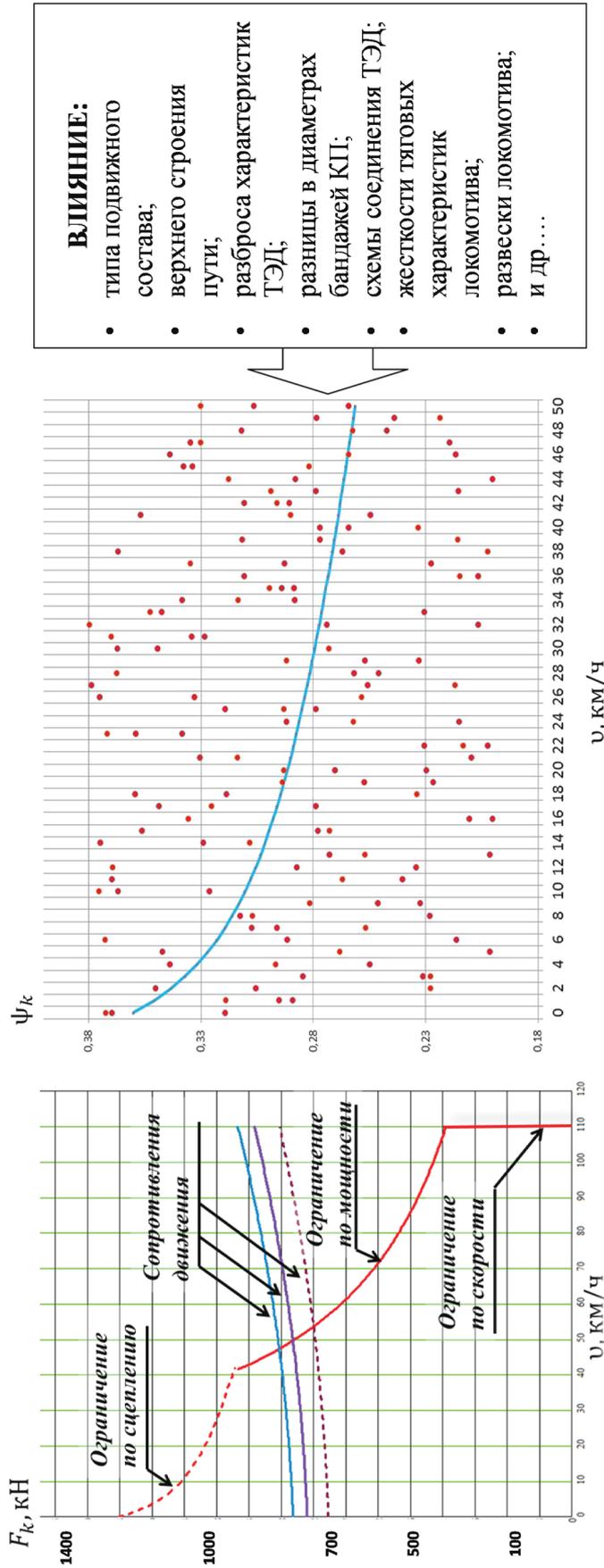


Рис. 2. Факторы, влияющие на реализацию максимальной силы тяги

объективного исследования сформирована тяговая модель локомотива на Восточном полигоне, учитывающая комплекс факторов: расчетный подъем, сопротивления от кривых, радиус этих кривых, длина подъемов, а главное встречный и боковой ветер, а также низкая температура наружного воздуха. Все расчеты проводились в инженерном математическом программном обеспечении (ПО) Mathcad и Excel. Модель позволила не только рассчитать и проанализировать использование силы тяги электровоза при различной массе поезда при измененных зонах регулирования тягового привода, но и определить критическую норму массы для каждого перегона между станциями всего электровозного хода Восточного полигона.

Как показали результаты расчетов (рис. 3), вождение поездов массой 7100 т с учетом рекомендаций АО «ВНИИЖТ» по критичным климатическим условиям (температура, ветер, гололёд) возможно осуществить электровозами ЗЭС5К с поосным регулированием силы тяги и независимым возбуждением ТЭД с использованием для преодоления расчетных подъемов свыше 8‰ отдельных участков Восточного полигона перегрузочных режимов (кратковременные, до 1 ч):

– при силе сцепления $F_{\text{сц}}$ и $1,1 \cdot F_{\text{сц}}$ (III зона регулирования);

– при $1,1 \cdot F_{\text{сц}}$ (0,5-IV зоны регулирования).

Кроме того, при данных режимах работы сохраняется существующая технология подталкивания на перегоне Мариинск–Находка.

Результаты проведенного тягового расчета впоследствии были подтверждены тягово-энергетическими испытаниями электровозов ЗЭС5К с поосным регулированием силы тяги на участках Восточного полигона (рис. 4) [5, 6].

В 2016 г. на участке Тайшет–Таксимо проведены испытания модернизированного электровоза серии ЗЭС5К № 434 с поосным регулированием силы тяги, независимым возбуждением ТЭД и их улучшенными теплотехническими характеристиками (изоляция класса Н). По результатам испытаний была подтверждена эффективность поосного регулирования силы

тяги по сравнению с электровозами, имеющими потележечное и посекционное регулирование. Изменение алгоритма системы управления тяговыми свойствами локомотива позволило стабильно реализовывать коэффициент использования сцепного веса электровозов и дало возможность увеличить вес перевозимых электровозом ЗЭС5К № 434 составов с 5800 до 6300 т [5, 6].

Последующие проведенные испытания данного локомотива на полигоне Мариинск–Смоляниново в ноябре 2017 г., с учетом описанных ранее расчетов, показали возможность ведения поездов массой 7100 т.

Однако главным ограничивающим фактором при реализации перевозки грузов массой 7100 т стала нагревостойкость сглаживающих реакторов в цепи ТЭД, имеющих класс изоляции F (перегревы, оплавления и длительные ремонты) [7, 8]. Совместно с заводом-изготовителем ООО «ПК «НЭВЗ» и ООО «ТМХ-Инжиниринг» на очередном заседании по совершенствованию конструкции электровозов «Ермак» в феврале 2018 г. было принято решение внедрить в конструкцию сглаживающий реактор более высокого класса нагревостойкости изоляции Н.

Впоследствии парк электровозов ЗЭС5К с поосным регулированием силы тяги был увеличен на 10 локомотивов, в конструкцию которых был внедрен уже новый сглаживающий реактор. Но данное техническое решение не решило проблемы перегрева привода, системой управления стали также фиксироваться перегревы ТЭД.

С 15 по 21 января 2019 г. на этих электровозах на участке Тайшет–Иркутск Восточно-Сибирской железной дороги были проведены повторные испытания с грузовыми поездами массой 7100 т на Восточном полигоне (рис. 5).

Анализируя расшифровку файла регистрации данных МСУД-015 по итогам испытаний было зафиксировано несоответствие температуры сглаживающего реактора, рассчитываемого ПО МСУД-015 и фактически полученными прямыми замерами термодатчиков. Это стало не про-

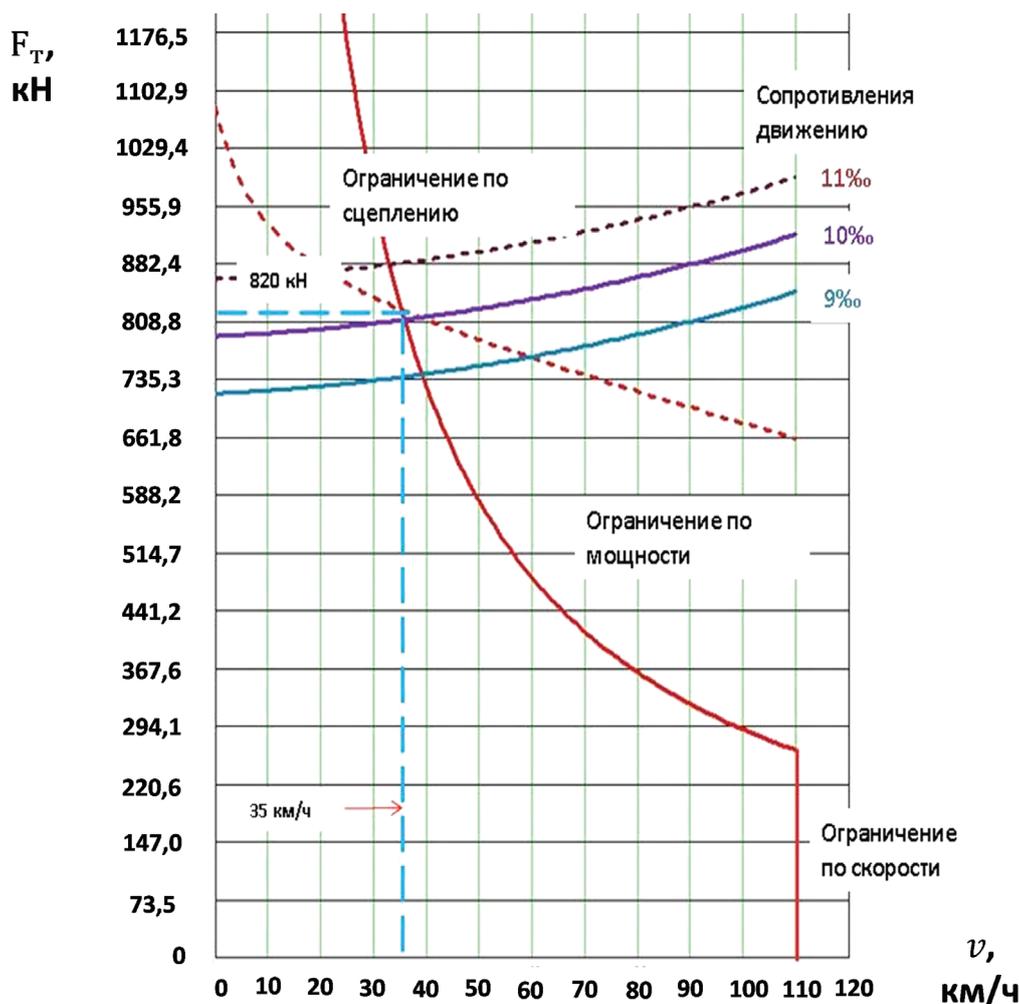


Рис. 3. Расчетная тяговая характеристика 3ЭС5К № 434 (III зона регулирования, перегрузочный режим при $F_{сц}$)

сто еще одним критерием, который необходимо было корректировать в алгоритмах управления локомотивом, а основанием проверки достоверности тепловой модели всего локомотива, которая заложена в систему управления локомотивом [9].

Например, при уменьшении скорости движения локомотива с 60 до 55 км/ч МСУД-015 автоматически начинает переход с последовательного на независимое возбуждение ТЭД, который сопровождается потерей силы тяги по всем секциям с 695 до 247 кН и последующим ступенчатым набором в течение 15 с по каждой переключаемой секции (рис. 6):

455 кН – в режиме тяги одна секция;

549 кН – в режиме тяги две секции;

780 кН – в режиме тяги три секции.

Для устранения недостатков и дальнейшего совершенствования конструкции локомотива было рекомендовано и почти в полном объеме за последнее время реализовано следующее:

- откорректировано ПО МСУД-015 в части увеличения порога срабатывания защиты по нагреву неподвижных частей ТЭД (до 155 °С) и сглаживающего реактора (с 135 до 165 °С), с последующей установкой откорректированного ПО на все электровозы 3,4ЭС5К с поосным регулированием силы тяги и независимым возбуждением ТЭД;

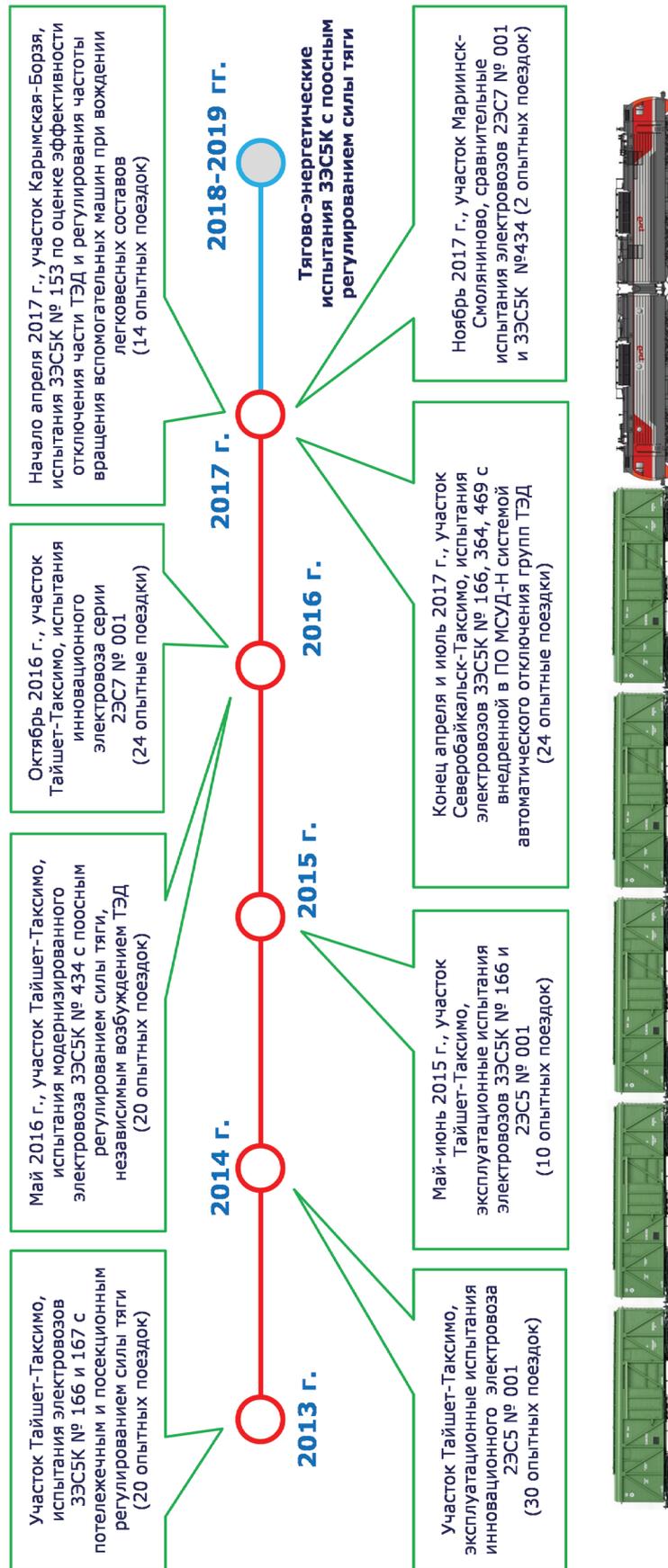
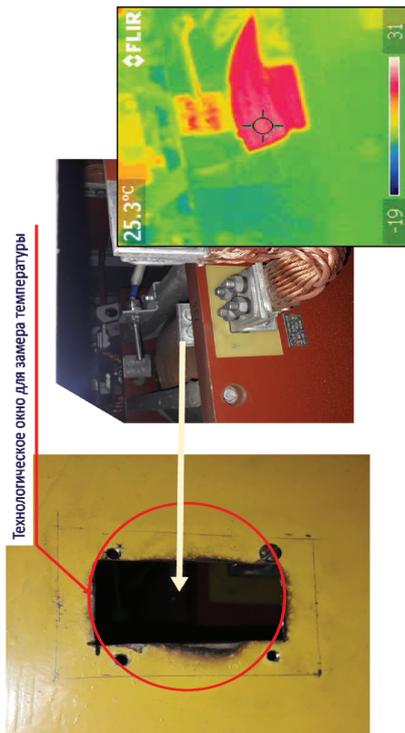
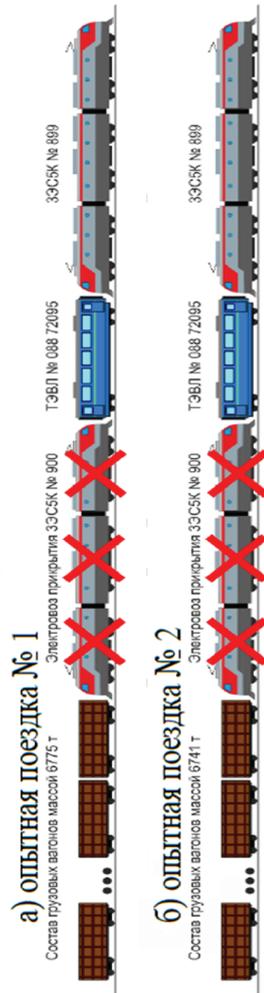


Рис. 4. Испытания тягового подвижного состава на Восточном полигоне в период 2013–2019 гг.

Следование электровоза прикрытие 3ЭС5К № 900 без работы



№ поезда	№ поезда	Дата, 2019 г.	Участок	Масса поезда, т	Число	
					осей	вагонов физических / вагонов условных
1	9506	15.01	Тайшет-Нижнеудинск	7075 (6775+300*)	288 (276+12*)	72 (69+3*) / 73 (70+3*)
2	9508	15.01	Тайшет-Нижнеудинск	7041 (6741+300*)	288 (276+12*)	72 (69+3*) / 73 (70+3*)
3	9606	16.01	Тайшет-Зима	7030	320	80 / 82
4	9606	16.01	Зима-Иркутск-Сорт.	7030	320	80 / 82

* Вспомогательный электровоз серии 3ЭС5К.

Рис. 5. Тягово-энергетические испытания и опытная эксплуатация электровозов серии 3ЭС5К с поездами массой 7100 т Одновременно с этим было зафиксировано снижение силы тяги, обусловленное особенностью электрической схемы (ЗТС.001.012-06ЭЗ) электровозов 3ЭС5К с поосным регулированием силы тяги и независимым возбуждением ТЭД в части наличия одной выпрямительной установки возбуждения (ВУВ), участвующего в поосционном независимом возбуждении ТЭД (при переходе с последовательного на независимое возбуждение ТЭД) [7, 8]

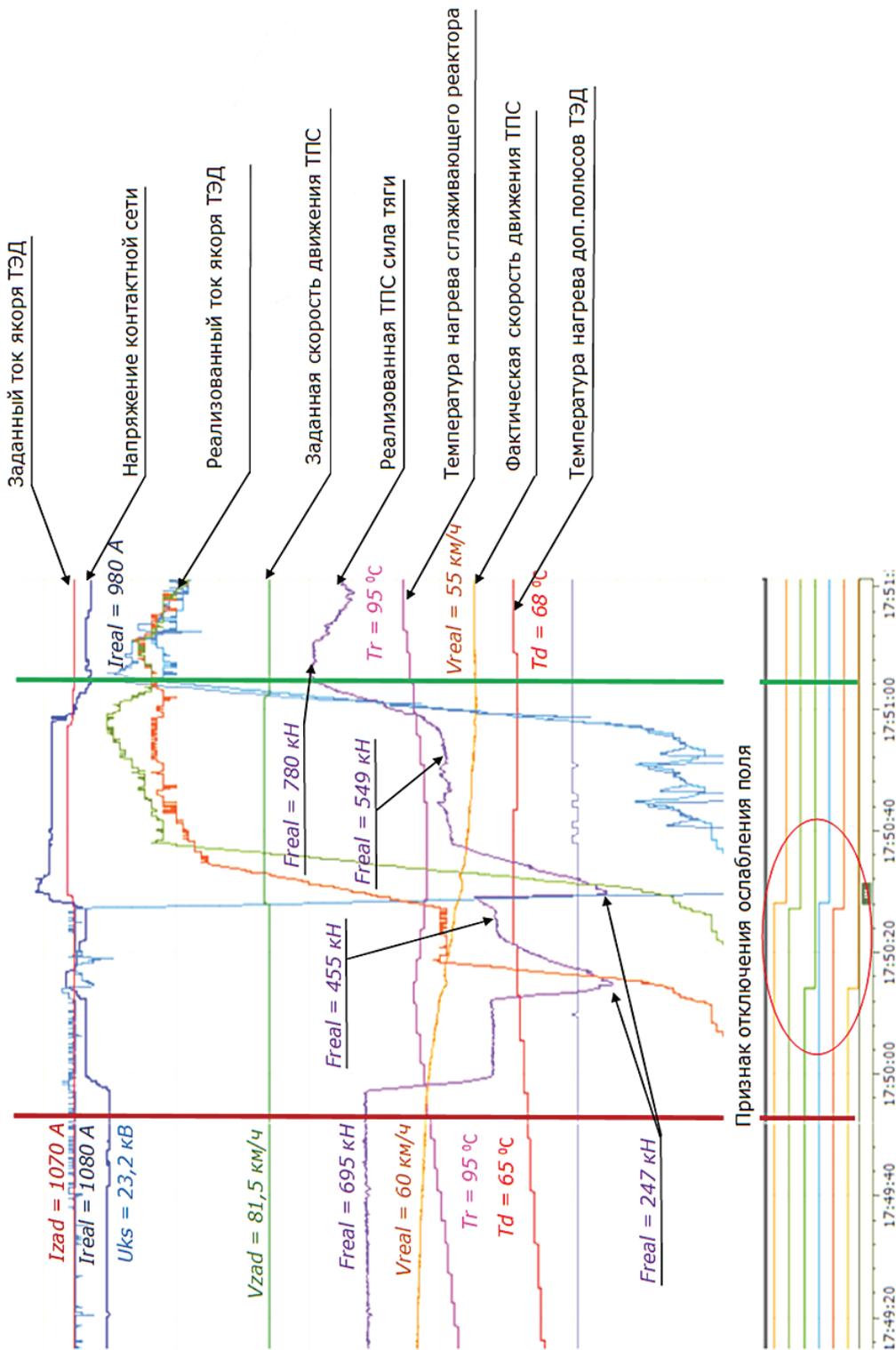


Рис. 6. Анализ опытных поездов электровозов 3ЭС5К с поосным регулированием силы тяги в 2019 г.

– проведен анализ достоверности тепловых моделей ТЭД и возможности их использования для оценки температуры нагрева критических узлов ТЭД в программном обеспечении МСУД;

– по результатам анализа разработана опытная версия ПО МСУД-015 и организованы испытания по проверке параметров тепловых моделей тяговых двигателей НБ-514Е и сглаживающих реакторов РС-19-01, заложенных в этом ПО, на Восточном полигоне и на испытательном кольце ИЦ АО «ВНИИЖТ» (г. Щербинка);

– разработана памятка локомотивным бригадам по особенностям управления (технологии вождения) электровозами 3ЭС5К с поосным регулированием силы тяги, в частности уделено особое внимание переходу с независимого возбуждения ТЭД на последовательное и обратно;

– проведено обучение в условиях депо силами ООО «ПК “НЭВЗ”» руководителей и специалистов эксплуатационных и сервисных депо, обслуживающих электровозы 3ЭС5 К с поосным регулированием силы тяги;

– разработано силами ООО «ТМХ-Инжиниринг» и ООО «ПК “НЭВЗ”» техническое решение о реализации поосного (потележечного) управления электровоза в режиме независимого возбуждения ТЭД.

В проработке в настоящее время остается вопрос поиска технических решений по снижению динамических реакций в поезде, возникающих в процессе перехода с последовательного на независимое возбуждение ТЭД и обратно.

3. Правила тяговых расчетов. – Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12 мая 2016 г. № 867 р. – 514 с. – URL : <http://docs.cntd.ru/document/1200079084> (дата обращения : 24.01.2020 г.).

4. Справочный материал. Основные технические параметры и характеристики локомотивов. – URL : <http://10.200.1.93:8090/loco/> (дата обращения : 30.02.2020 г.).

5. Результаты тягово-энергетических испытаний на полигоне Тайшет-Таксимо с электровозом серии 3ЭС5К № 434 в 2016 г. – 434 с. – URL : <ftp://09272071.com/reports/2016/%D0%A2%D0%AD%D0%9B.092.05.2016.pdf> (дата обращения : 25.01.2020 г.).

6. Результаты сравнительных испытаний на полигоне Тайшет-Таксимо электровозов серии 3ЭС5К в 2013 г. – 320 с. – URL : <ftp://ftp:ftp@09272071.com/reports/2014/%D0%A2%D0%AD%D0%9B.092.05.2014.pdf> (дата обращения : 24.01.2020 г.).

7. Слепцов М. А. Основы электрического транспорта : учебник для студ. высш. учеб. заведений / М. А. Слепцов, Г. П. Долаберидзе, А. В. Прокопович и др.; под общ. ред. М. А. Слепцова. – М. : Издат. центр «Академия», 2006. – 464 с.

8. Железнодорожный транспорт. Тяговые электрические двигатели, их особенности и конструкция. – URL : <http://railway-transport.ru/books/item/f00/s00/z0000005/st010.shtml> (дата обращения : 24.01.2020 г.).

9. АО «Локомотивные электронные системы». Микропроцессорная система управления и диагностики для электровозов переменного тока МСУД-015. – URL : <http://www.zaoles.ru/msud-015.html> (дата обращения : 22.02.2020 г.).

10. Исаев И. П. Случайные факторы и коэффициент сцепления / И. П. Исаев. – М. : Транспорт, 1970. – 184 с.

Дата поступления: 01.06.2020

Решение о публикации: 15.06.2020

Библиографический список

1. Стратегия инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 года (Белая книга ОАО «РЖД»). – 77 с. – URL : <http://doc.rzd.ru/doc/public/ru/> (дата обращения : 29.01.2020 г.).

2. Транспортная Стратегия РФ на период до 2030 года. – Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации № 1734р от 22 ноября 2008 г. – 345 с. – URL : <https://www.mintrans.gov.ru/documents/3/1009> (дата обращения : 24.01.2020 г.)

Контактная информация:

СЛЕПЦОВ Михаил Александрович – д-р техн. наук, профессор; sleptsovma@mpei.ru

ВАСИЛЬЕВ Иван Павлович – начальник отдела; otdel-nl@yandex.ru

СТАРОВОЙТОВ Степан Александрович – аспирант, инженер; slikpwn@gmail.com

МАРТЫНЮК Илья Юрьевич – аспирант; martin304@mail.ru

Optimization of control system algorithms for 3ES5K electric locomotives with axle-by-axle pulling power control

M. A. Sleptsov¹, I. P. Vasiliev², S. A. Starovoytov^{1,2}, I. Yu. Martynuk^{1,2}

¹ National Research University “MPEI”, 14, Krasnokazarmennaya ul., Moscow, 111250, Russian Federation

² Planning and Design Office for Locomotive Equipment – OAO “Russian Railways” subsidiary, 205, Olkhovskiy per., Moscow, 105066, Russian Federation

For citation: Sleptsov M. A., Vasiliev I. P., Starovoytov S. A., Martynuk I. Yu. Optimization of control system algorithms for 3ES5K electric locomotives with axle-by-axle pulling power control. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 366–377. (In Russian)
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-366-377

Summary

Objective: To optimize hauling performance of electric locomotives attached to the fleet of OAO “Russian Railways” at the Eastern polygon taking into account development prospects through to 2030. **Methods:** In order to achieve the stated objective as well as to verify the obtained conclusions the following methods were used: experimental method, the method of comparison, expert assessment, simulation, quantitative (statistical analysis) and qualitative processing of material. Factors that influence maximum locomotive power in operation were evaluated on the basis of experience accumulated by the locomotive economy in the past decades. **Results:** Recommendations on the adjustment of control algorithms and elaboration of the best available train-handling technology for trains weighing up to 7100 tons by 3ES5K series locomotives with axle-by-axle pulling power control and separate excitation of traction motors were developed. Development prospects of the locomotive power on Russian railroads, in particular at the Eastern polygon, were covered through to 2030. **Practical importance:** Cargo transportation efficiency at the Eastern polygon may be improved on the basis of the conducted research and by means of recommendations on the adjustment of control algorithms and optimization of train-handling technology.

Keywords: Electric locomotive, locomotive, power actuator, axle-by-axle control, pulling power, adhesion activators, wheelset spinning.

References

1. *Strategiya innovatsionnogo razvitiya OAO “Ros-siyskiye zheleznnye dorogi” na period do 2015 goda (Belaya kniga OAO “RZhD”)* [Innovative development strategy of OAO “Russian Railways” for the period up to 2015 (White Book of OAO “Russian Railways”)], 77 p. Available at: <http://doc.rzd.ru/doc/public/ru/> (accessed: January 29, 2020). (In Russian)

2. *Transportnaya Strategiya RF na period do 2030 goda* [The Russian Federation Transport Strategy for the period up to 2030]. Utverzhdeno rasporyazheniyem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii no. 1734r ot 22 noyabrya 2008 g. [Approved by the Russian Fe-

deration Ministry N 1734r dated November 22nd, 2008], 345 p. Available at: <https://www.mintrans.gov.ru/documents/3/1009> (accessed: January 24, 2020). (In Russian)

3. *Pravila tyagovykh raschetov* [Procedure for grade computations]. Utverzhdeno rasporyazheniyem OAO “RZhD” ot 12 maya 2016 g. no. 867r. [Approved by the order of OAO “Russian Railways” dated May 12th, 2016, N 867r.], 514 p. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200079084> (accessed: January 24, 2020). (In Russian)

4. *Spravochniy material. Osnovniye tekhnicheskiye parametry i kharakteristiki lokomotivov* [Reference material. Basic technical parameters and characteristics of lo-

comotives]. Available at: <http://10.200.1.93:8090/loco/> (accessed: February 30, 2020). (In Russian)

5. *Rezultaty tagovo-energeticheskikh ispytaniy na poligone Taishet–Taksimo s elektrovozom serii 3ES5K no. 434 v 2016 g.* [Results of pull and energy efficiency tests on the electric locomotive of 3ES5K series N 434 at Taishet–Taksimo polygon in 2016], 434 p. Available at: <ftp://09272071.com/reports/2016/%D0%A2%D0%AD%D0%9B.092.05.2016.pdf> (accessed: January 25, 2020). (In Russian)

6. *Rezultaty sravnitelnykh ispytaniy na poligone Taishet–Taksimo elektrovozov serii 3ES5K v 2013 g.* [Comparison testing results of electric locomotives of 3ES5K series at Taishet–Taksimo polygon in 2013], 320 p. Available at: <ftp://ftp@09272071.com/reports/2014/%D0%A2%D0%AD%D0%9B.092.05.2014.pdf> (accessed: January 24, 2020). (In Russian)

7. Sleptsov M. A., Dolaberidze G. P., Prokopovich A. V. et al. *Osnovy elektricheskogo transporta*. Uchebnyk dlya studentov vysshykh uchebnykh zavedeniy [Foundations of electric transport. College textbook]. Under general editorship of M. A. Sleptsov. Moscow, Publishing House “Akademiya”, 2006, 464 p. (In Russian)

8. *Zheleznodorozhniy transport. Tyagoviye elektricheskiiy dvigately, ikh osobennosti i konstruktsiya* [Railway transport. Traction motors: specificities and de-

sign]. Available at: <http://railway-transport.ru/books/item/f00/s00/z0000005/st010.shtml> (accessed: January 24, 2020) (In Russian)

9. AO “Lokomotivniye elektronniye skhemy”. *Mikroprotsessornaya sistema upravleniya i dignostiky dlya elektrovozov peremennogo toka MSUD-015* [AO “Locomotive electronic systems”. Microprocessor-based control and monitoring system for alternating-current locomotives MSUD-015]. Available at: <http://www.zaoles.ru/msud-015.html> (accessed: February 22, 2020) (In Russian)

10. Isaev I. P. *Sluchainye factory i koeffitsient stsepleniya* [Random factors and traction coefficient]. Moscow, Transport Publ., 1970, 184 p. (In Russian)

Received: June 01, 2020

Accepted: June 15, 2020

Author’s information:

Mikhail A. SLEPTSOV – D. Sci. in Engineering; Professor; sleptsovma@mpei.ru

Ivan P. VASILIEV – Head of Department; otdel-nl@yandex.ru

Stepan A. STAROVOYTOV – Postgraduate Student, engineer; slikpwn@gmail.com

Ilya Yu. MARTYNUK – Postgraduate Student; martin304@mail.ru



УДК 666.762.81:621.83.059.1

Анализ фрикционных материалов тормозных колодок в парах трения с тормозными дисками из керамического композита с SiC-матрицей для высоконагруженного железнодорожного транспорта

А. А. Воробьев¹, В. И. Кулик², А. С. Нилов², Д. А. Жуков¹

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

² Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Российская Федерация, 198005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1

Для цитирования: Воробьев А. А., Кулик В. И., Нилов А. С., Жуков Д. А. Анализ фрикционных материалов тормозных колодок в парах трения с тормозными дисками из керамического композита с SiC-матрицей для высоконагруженного железнодорожного транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 378–386.

DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-378-386

Аннотация

Цель: Оценка перспектив применения современных фрикционных материалов для изготовления тормозных колодок, работающих в высоконагруженных системах торможения высокоскоростного железнодорожного транспорта в паре с тормозными дисками из керамоматричного композиционного материала (КМК) с SiC-матрицей. **Методы:** Проведен анализ возможностей и перспектив применения различных типов фрикционных материалов (металлов, композиций с металлической, полимерной, углеродной и керамической матрицами), используемых для изготовления тормозных колодок, работающих в высоконагруженных системах торможения в паре с тормозными дисками из КМК с SiC-матрицей. **Результаты:** Приведены результаты экспериментальных исследований триботехнических характеристик для образцов из карбидокремниевого КМК в паре с контртелом из фрикционной металлокерамики типа ФЖ-11 на основе порошков железа, ФМ на основе меди и однотипного КМК с различным (высоким и низким) начальным содержанием армирующих углеродных волокон. **Практическая значимость:** Показано, что в паре с тормозными дисками из карбидокремниевого КМК в высоконагруженных системах торможения железнодорожного транспорта наиболее перспективными являются композиции с керамической матрицей и металлокерамика на основе железа.

Ключевые слова: Тормозная система поезда, композиционный материал, дисковый тормоз, фрикционный материал, металлокерамика, углерод-углеродный композит, керамоматричный композит, карбидокремниевая матрица, триботехнические характеристики.

Введение

Эффективность современных систем торможения для высоконагруженных транспортных

средств во многом зависит от используемых материалов фрикционной пары, которые характеризуются комплексом трибологических, теплофизических и физико-механических свойств.

В настоящее время актуальной является проблема выбора материалов пары трения в дисковых тормозах, широко используемых в высокоэнергетических составах железнодорожного транспорта [1]. При этом необходимо учитывать жесткие условия эксплуатации таких систем торможения – нагрев более 1000 °С и абразивный характер трибоконтакта, что предъявляет особые требования к фрикционным материалам и существенно ограничивает применение традиционных материалов – серого чугуна и различных марок сталей. Анализ показал, что среди фрикционных материалов последнего поколения к наиболее перспективным для тормозных дисков, работающих в таких условиях, относятся армированные углеродными волокнами (УВ) керамоматричные композиты (КМК) с SiC-матрицей – C/C-SiC-композиты [2]. В работе [3] было выявлено, что данные материалы могут считаться самыми эффективными в тормозных дисках систем торможения железнодорожного транспорта, для которых они уже применяются или находятся в стадии разработки (рис. 1).

В качестве тормозных колодок, способных в определенной степени эффективно работать в паре с дисками из КМК при заданных жестких условиях применения и при этом обеспечивающих комплекс высоких эксплуатационных и экономических характеристик, рассматриваются колодки из металла и композиционных материалов

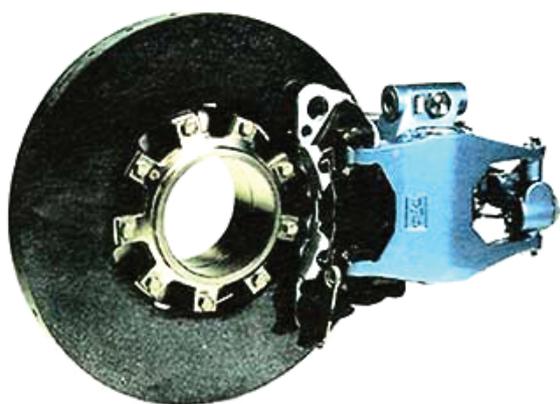


Рис. 1. Тормозные диски из КМК для железнодорожных скоростных подвижных составов фирмы «Knorr Brake Company» [4]

(КМ) с металлической, полимерной, углеродной и керамической матрицами. В настоящей работе проведен анализ современного состояния и перспектив использования этих типов фрикционных материалов для тормозных колодок, работающих в высоконагруженных системах торможения железнодорожного транспорта, в паре с дисками из КМК с SiC-матрицей.

Тормозные колодки из металлов

Применение фрикционных металлических колодок и накладок, главным образом из стали, серого и фосфористого чугуна, в системах торможения железнодорожного транспорта долгое время рассматривалось как основной вариант. Для фрикционных элементов из этих материалов характерны хороший отвод выделяющегося при торможении тепла и отсутствие влияния влаги на коэффициент трения. Однако такие колодки имеют существенно нестабильный и относительно невысокий коэффициент трения, снижающийся с ростом скорости, а также для них типичен быстрый износ. Эти же проблемы свойственны для металлических контртел и в паре трения с тормозным диском из КМК [5]. Все вышеуказанные проблемы обуславливают эксплуатационные границы применения металлических колодок любого типа скоростью до 140 км/ч при осевой нагрузке 210 кН и тормозной мощности на оси не более 450 кВт, что не позволяет их рассматривать в качестве перспективных фрикционных материалов для высокоскоростного подвижного состава [6].

Тормозные колодки из КМ с полимерной матрицей

Тормозные колодки из полимерных КМ (ПКМ) на основе полимерных связующих (прежде всего фенольных или их модификаций) и различных армирующих наполнителей (рубленые волокна, войлок, сетка и т. д.) широко используются в паре со стальными диска-

ми. Однако они существенно ограничены, что связано с малой термостойкостью и, как следствие, с низкой износостойкостью поверхности трения при высоких температурах. Несмотря на эти недостатки, имеется информация о разработке систем торможения на основе колодок из ПКМ и дисками из КМК. В результате проведенных исследований было установлено, что для коэффициента трения фрикционной пары «диск из КМК–колодка из ПКМ» в зависимости от давления и температуры свойственны более стабильные триботехнические характеристики в диапазоне температур 100–500 °С по сравнению с традиционной парой «диск из серого чугуна–колодка из ПКМ» (рис. 2) [2]. Данные исследования указывают на возможность эффективного практического применения фрикционной пары «диск из КМК–колодка из ПКМ» для создания относительно малонагруженных систем торможения.

Тормозные колодки из КМ с металлической матрицей

Для производства колодок из КМ на основе металлической матрицы и керамического наполнителя (металлокерамика) используются

процессы спекания различного рода металлических и керамических порошков. Наибольшее практическое применение для этих целей получили металлокерамики с железной и медной матрицами. При этом материалы на основе меди, как правило, характеризуются меньшим коэффициентом трения, предельными температурами эксплуатации (300–500 °С) и более высокой теплопроводностью по сравнению с композитами на основе железа.

Металлокерамические колодки с железной матрицей в принципе могут применяться для условий жесткого торможения с температурами на поверхности трения до 1200 °С. В связи с этим их можно рассматривать как наиболее коммерчески привлекательные для создания систем торможения в паре с дисками из КМК. Проведенные исследования показали их высокие и стабильные триботехнические характеристики в широких интервалах значений температур на поверхности трения, скоростей скольжения и контактного давления. Кроме того, было установлено, что износ колодок был относительно небольшим, тогда как износ диска практически отсутствовал или был минимальным. На рис. 3, а приведены триботехнические характеристики, определенные для пар трения из КМК с SiC-матрицей и контртела из фрикционной ме-

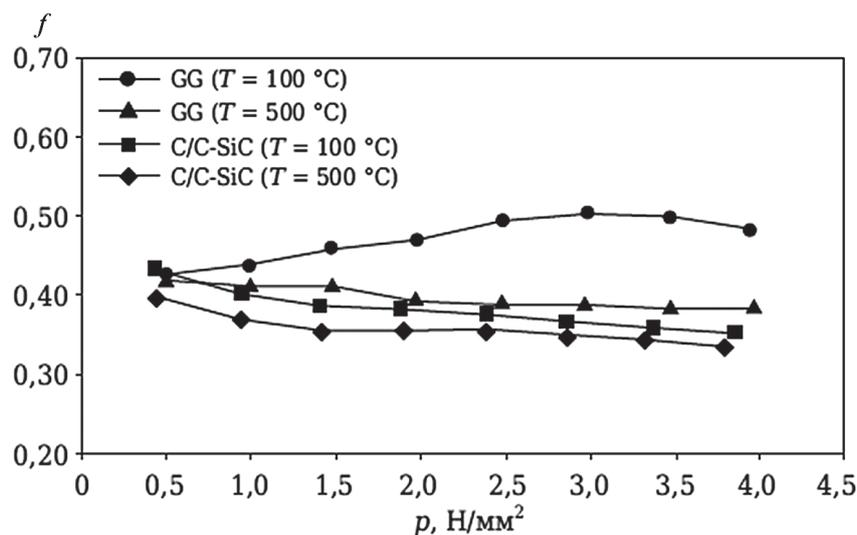


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения f от давления и температуры T для тормозных дисков на основе серого чугуна (GG) и КМК (C/C-SiC) в паре с тормозной колодкой из ПКМ

таллокерамики типа ФЖ-11 на основе порошков железа [7]. Там же представлены результаты исследования традиционной фрикционной пары «чугун–ФЖ-11» и пары из металлокерамики типа ФМ (на основе медной матрицы) и КМК (рис. 3, б). Видно, что фрикционная пара «КМК–ФЖ-11» имеет коэффициент трения, почти в 2 раза бóльший по сравнению с парой «чугун–ФЖ-11» и почти в 3 раза бóльший по сравнению с парой «КМК–ФМ», при этом указывается, что практически сохраняется тот же уровень износа контртела.

Тормозные колодки из КМ с углеродной матрицей

Фрикционные КМ с углеродной матрицей, как правило, армируются углеродными волокнами (УВ) и получили название углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ). Для изготовления изделий из УУКМ, в том числе и фрикционного назначения, применяются два базовых технологических процесса или их комбинация – жидкофазные процессы, основанные на карбонизации полимерной матрицы углепластикового полуфабриката (PIР-процессы), или газофазные, основанные на осаждении пироуглерода из углеродсодержащей газовой среды в пористом волокнистом каркасе (CVI-процессы) [8]. Колодки из УУКМ используются в парах с

тормозными дисками из различных фрикционных материалов – сталь, алюмоматричная металлокерамика, УУКМ и КМК [9, 10].

Очевидными достоинствами фрикционных УУКМ являются теплостойкость углеродной основы (более 1000 °С), высокий коэффициент трения при повышенных температурах и размерно-температурная стабильность. Вместе с тем для УУКМ характерны и существенные недостатки, среди которых выделяются такие как низкий коэффициент трения (0,15–0,2) при температурах до 250–300 °С и достаточно большие величины износа, в том числе связанные и с процессами окисления углеродных компонентов КМ при температурах выше 450 °С. Кроме того, УУКМ очень чувствителен к климатическим условиям эксплуатации. Так, в работе [11] показано, что динамический коэффициент трения снижается в 2–3 раза при применении соответственно сухих и влажных колодок в паре трения с тормозными дисками из КМК. Частично эти проблемы решаются путем введения в состав УУКМ порошковых или волокнистых абразивных материалов и модификаторов. Например, в [12] приведены результаты триботехнических испытаний фрикционной пары: диск из КМК и колодки из УУКМ с различными вариантами композиции. Было показано, что тип применяемых компонентов и их соотношение существенно влияют на трибологические характеристики пары трения. Вместе с тем даже

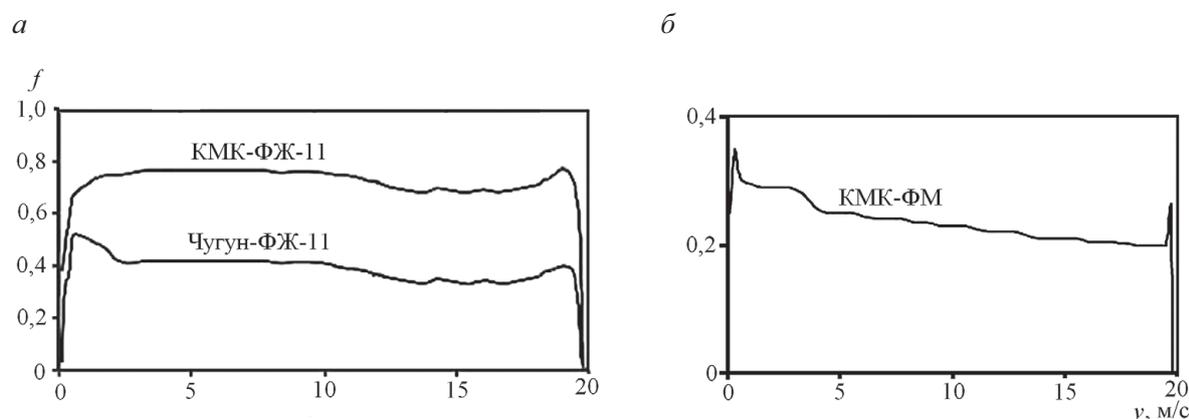


Рис. 3. Зависимости коэффициентов трения f от скорости v для различных пар трения: a – пары трения КМК и чугун с ФЖ-11; b – пара трения «КМК–ФМ»

модифицирование УУКМ не компенсирует в полной мере имеющиеся недостатки данного материала, что делает проблематичным эффективное использование колодок из УУКМ в паре с дисками из КМК в высоконагруженных системах торможения.

Тормозные колодки из КМ с керамической матрицей

Считается, что КМК системы C/C-SiC является хорошим кандидатом для тормозных колодок в паре с однотипным тормозным диском, поскольку такие опасные материалы как Cu, Cr, Zn, Sb, асбест, характерные для добавок, в первую очередь во фрикционные композиции с полимерной и углеродной матрицами, будут ограничены от использования в тормозных колодках в ближайшем будущем [5].

Благодаря исключительно высоким твердости, химической и абразивной стойкости карбида кремния, C/C-SiC-композиты относятся к самым перспективным современным материалам для изделий триботехнического, прежде всего фрикционного, назначения. Данный материал способен длительно работать при температурах 1200–1400 °С, имеет в 2 раза более высокую стойкость к тепловым ударам по отношению к чугунам, пара трения C/C-SiC–C/C-SiC малозвучна при эксплуатации, продукты абразивного износа экологически безопасны. Главным недостатком такого рода пар трения можно считать образование гидродинамического трения при попадании жидкости в зону трибологического контакта, в результате чего коэффициент трения снижается до показателей менее 0,1 [13]. Но данная проблема легко решается путем подбора геометрии колодок и диска через создание у них канавок, рельефа, отверстий для отвода жидкости и пара из зоны трения. При этом следует отметить, что коэффициент трения сухих и влажных колодок в паре с аналогичными тормозными дисками из КМК практически не изменяется [14].

Из всех фрикционных КМК с карбидокремниевой матрицей наиболее широкое распространение получили композиты, армированные УВ. Среди методов получения фрикционных изделий из карбидокремниевых КМК наибольшую привлекательность с экономической точки зрения имеют жидкофазные PIP- и LSI-процессы [2, 15, 16]. PIP-процессы основаны на пиролизе кремнийорганической матрицы ПКМ, армированного УВ, LSI-процессы – на пропитке расплавом кремния пористых заготовок, в состав которых, помимо УВ, входят углеграфитовые компоненты, преобразуемые в карбид кремния (процессы жидкофазного силицирования).

Технология PIP имеет ряд достоинств, среди которых выделим следующие: 1) широкая возможность управления составом получаемых КМК; 2) относительно невысокие температуры процесса и, как следствие, отсутствие термической и химической деградации армирующих УВ и порошковых добавок при проведении пиролиза полимерного связующего. К серьезному недостатку технологии PIP можно отнести повышенную пористость получаемой SiC-матрицы. На практике такая проблема решается путем увеличения количества циклов повторной пропитки, промежуточного пористого полуфабриката полимерным связующим и процессов его пиролиза. Однако эта процедура приводит к резкому удорожанию получаемого КМК.

Метод LSI, коммерчески предпочтительный для тормозных дисков из КМК, также может быть применен и для получения колодок [15]. Для этих целей, как правило, используется модификация метода LSI, основанная на жидкофазном силицировании карбонизированных углепластиков – полуфабрикатов из УУКМ, получаемых из ПКМ методом PIP. По сравнению с другими методами LSI-процессы обладают рядом достоинств: 1) конечный материал обладает достаточно высокими прочностью и теплопроводностью; 2) структура матрицы плотная, практически беспористая; 3) процесс относительно недорог и производителен вследствие его небольшой продолжительности.

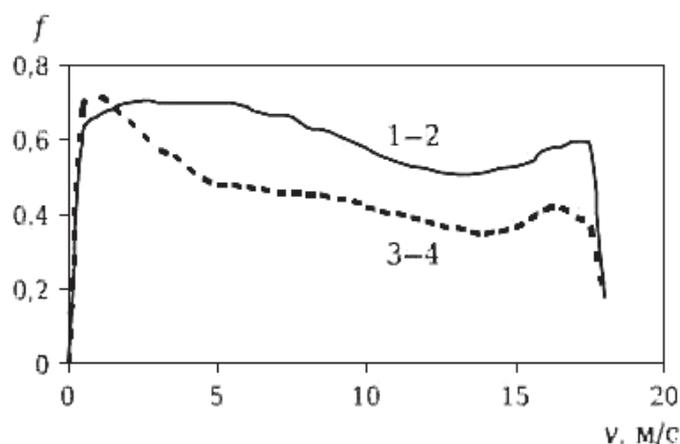


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения f от скорости v для различных пар образцов «КМК – КМК», отличающихся объемным содержанием УВ

Одна из серьезных проблем, которую необходимо решать при разработке систем торможения на основе тормозных дисков и колодок из КМК, помимо обеспечения высоких и стабильных триботехнических характеристик, является получение такого характера процесса трения, при котором износ колодок в значительно большей степени превышает износ дисков, при этом имея минимально возможные значения. Перспективный подход к решению данной проблемы – оптимальный подбор для КМК дисков и колодок соотношения базовых компонентов материалов – УВ и SiC-матрицы.

В работе [7] установлено (рис. 4), что пары образцов с различным (высоким и низким) начальным объемным содержанием УВ (пара 1–2 с долей УВ 0,53 и 0,25 соответственно) обеспечивают более высокий и стабильный коэффициент трения в зависимости от скорости по сравнению с парами образцов с одинаковым (высоким) начальным содержанием УВ (пара 3–4 с долей УВ 0,41 и 0,48 соответственно). Износ КМК для фрикционных пар 1–2 и 3–4 составил для образца № 1 17,9 мкм/км, № 2 – 5,2 мкм/км, № 3 – 15,9 мкм/км, № 4 – 10,1 мкм/км. Видно, что пары с разным содержанием УВ характеризуются и значительным различием их износа (более чем в 3 раза), причем более низкий износ наблюдается у КМК с малым содержанием УВ (большей долей SiC-матрицы).

Заключение

На основании проведенного анализа современных фрикционных материалов, применяемых для изготовления тормозных колодок, можно сделать вывод, что в паре с тормозными дисками из КМК с карбидокремниевой матрицей для высоконагруженных систем торможения железнодорожного транспорта наиболее перспективными являются КМК и металлокерамика на основе железа. При этом следует иметь в виду, что характер процесса фрикционного контакта данных типов колодок в паре с тормозным диском из КМК существенно отличается от свойственного паре с традиционными металлическими тормозными дисками [17]. Это обстоятельство предполагает необходимость специальных триботехнических исследований для разработки оптимальных рецептур фрикционных композиций колодок, работающих в паре с тормозными дисками из КМК.

Библиографический список

1. Мошков А. А. Разработка дискового тормоза для отечественного скоростного железнодорожного транспорта / А. А. Мошков, Е. С. Сипягин // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 6. – С. 62–65.

2. Handbook of ceramic composites / ed. by P. Narottam. – Boston ; Dordrecht ; London : Kluwer Academic Publishers, 2005. – 554 p.
3. Воробьев А. А. Применение композиционных материалов в тормозных системах высокоэнергетичных составов железнодорожного транспорта / А. А. Воробьев, Д. А. Жуков, К. Л. Лукьяненко, В. И. Кулик, А. С. Нилов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2019. – Т. 16. – Вып. 3. – С. 391–400.
4. Schlosser W. Moderne Bremssysteme für Schienenfahrzeuge / W. Schlosser, S. Aurich // ZEV + DET Glasers Annalen. – 2001. – N 8. – P. 273–277.
5. Goo B.-Ch. Microstructural analysis and wear performance of carbon-fiber-reinforced SiC composite for brake pads / B.-Ch. Goo, In-Sik Cho // Materials. – 2017. – Vol. 10. – N 701. – P. 1–14.
6. Эйлерс Х. Р. Потенциал и пределы возможностей колодочного тормоза / Х. Р. Эйлерс // Железные дороги мира. – 2004. – № 4. – С. 35–44.
7. Кулик В. И. Исследование триботехнических характеристик композиционных материалов с карбидокремниевой матрицей / В. И. Кулик, А. С. Нилов, А. П. Гаршин и др. // Новые огнеупоры. – 2012. – № 8. – С. 45–56.
8. Щурик А. Г. Искусственные углеродные материалы / А. Г. Щурик. – Пермь : Изд-во УНИИКМ, 2009. – 342 с.
9. Patent US 7338987. Friction material composition and friction material using the same / M. Ono, T. Nagayoshi, M. Inoue et al. – Decf. 21.05.2004 ; publ. 04.03.2008. – 7 p. – URL : www.patents.google.com/patent/US7338987/fr (дата обращения : 23.07.2020 г.).
10. Patent US 2010/0065389. Carbon fiber reinforced carbon matrix composite for brake pad back plate / L. F. Gilboy, R. A. Wolf, A. M. Morey. – Decf. 16.09.2009 ; publ. 18.03.2010. – 21 p. – URL : www.patents.google.com/patent/US20100065389A1/en (дата обращения : 23.07.2020 г.).
11. Kumar P. Tribological behaviour of C/C-SiC composites : A review / P. Kumar, V. K. Srivastava // Journal of Advanced Ceramics. – 2016. – Vol. 5. – Iss. 1. – P. 1–12.
12. Stadler Z. Carbonised-material-based brake pad for a C/C-SiC composite brake disc / Z. Stadler // Materials in tehnologie. – 2001. – Vol. 35. – N 3–4. – P. 205–208.
13. Bian G. Friction performance of carbon/silicon carbide ceramic composite brakes in ambient air and water spray environment / G. Bian, H. Wu // Tribology International. – 2015. – Vol. 92. – P. 1–11.
14. Zhang J.-X. Microstructure and frictional properties of 3D needled C/SiC brake materials modified with graphite / J.-X. Zhang, Sh.-W. Fan, L.-T. Zhang et al. // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2010. – Vol. 20. – Iss. 12. – P. 2289–2293.
15. Гаршин А. П. Анализ современного состояния и перспектив коммерческого применения волокнистоармированной карбидокремниевой керамики / А. П. Гаршин, В. И. Кулик, А. С. Нилов // Новые огнеупоры. – 2012. – № 2. – С. 43–52.
16. Garshin A. P. Contemporary technology for preparing fiber-reinforced composite materials with a ceramic refractory matrix (review) / A. P. Garshin, V. I. Kulik, S. A. Matveev, A. S. Nilov // Refractories and Industrial Ceramics. – 2017. – Vol. 58. – N 2. – P. 148–161.
17. Osterle W. Friction films on C-SiC discs after dynamometer tests with different commercial brake pad / W. Osterle, C. Deutsch, H. Rooch, I. Dorfel // Thesis of EuroBrake 2012 conference. 16–18 April 2012. – Dresden, Germany. – 2012. – URL : www.eurobrake.net/.../EB2012-FM-01.pdf (дата обращения : 20.02.2020 г.).

Дата поступления: 03.06.2020

Решение о публикации: 11.06.2020

Контактная информация:

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич – д-р техн. наук, доцент; 79219751198@yandex.ru

КУЛИК Виктор Иванович – канд. техн. наук, доцент; victor.i.kulik@gmail.com

НИЛОВ Алексей Сергеевич – канд. техн. наук, доцент; alexey.s.nilov@gmail.com

ЖУКОВ Дмитрий Александрович – канд. техн. наук, доцент; dmitr_zhukov@mail.ru

Analysis of friction materials of brake pads in friction couples with brake discs made of SiC ceramic matrix composite for heavily loaded railway transport

A. A. Vorobyev¹, V. I. Kulik², A. S. Nilov², D. A. Zhukov¹

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

² D. F. Ustinov “VOENMEKh” Baltic State Technical University, 1, 1-ya Krasnoarmeyskaya ul., Saint Petersburg, 198005, Russian Federation

For citation: Vorobyev A. A., Kulik V. I., Nilov A. S., Zhukov D. A. Analysis of friction materials of brake pads in friction couples with brake discs made of SiC ceramic matrix composite for heavily loaded railway transport. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 3, p. 378–386. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-378-386

Summary

Objective: To evaluate the prospects of applying modern friction materials for the manufacture of brake pads operating in heavily loaded braking systems of high-speed rail transport coupled with brake discs made of ceramic matrix composite (CMC) with SiC matrix. **Methods:** The possibilities and prospects for the application of various types of friction materials (metals and metal, polymer, carbon, and ceramic matrix composites) used for the manufacture of brake pads operating in heavily loaded braking systems coupled with brake discs made of CMC with SiC matrix have been analyzed. **Results:** The results of experimental studies of tribotechnical characteristics for samples made of silicon carbide CMC coupled with a counterbody made of friction cermet material FZh-11 based on iron powders, FM based on copper, and the same CMC with different (high and low) initial content of reinforcing carbon fibers, are provided. **Practical importance:** It is shown that ceramic matrix composites and iron-based cermets coupled with brake discs made of silicon carbide CMC are the most promising in heavily loaded braking systems of railway transport.

Keywords: Train braking system, composite material, disc brake, friction material, cermet, carbon-carbon composite, ceramic matrix composite, silicon carbide matrix, tribotechnical characteristics.

References

1. Moshkov A. A. & Sipyagin E. S. Razrabotka diskovogo tormoza dlya otechestvennogo skorostnogo zheleznodorozhnogo transporta [Development of a disc brake for national high-speed railway transport]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2013, no. 6, pp. 62–65. (In Russian)

2. *Hanbook of ceramic composites*. Edited by P. Narottam. Boston; Dordrecht; London, Kluwer Academic Publishers, 2005, 554 p.

3. Vorobyev A. A., Zhukov D. A., Lukyanenko K. L., Kulik V. I. & Nilov A. S. Primeneniye kompozitsionnykh

materialov v tormoznykh sistemakh vysokoenergetichnykh sostavov zheleznodorozhnogo transporta [Application of composite materials in braking systems of high-power railway trains]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 391–400. (In Russian)

4. Schlosser W. & Aurich S. Moderne Bremssysteme für Schienenfahrzeuge. *ZEV + DET Glasers Annalen*, 2001, no. 8, pp. 273–277.

5. Goo B.-Ch. & Cho In-Sik. Microstructural analysis and wear performance of carbon-fiber-reinforced SiC composite for brake pads. *Materials*, 2017, vol. 10, no. 701, pp. 1–14.

6. Eilers Kh. R. Potentsial i predely vozmozhnostey kolodochnogo tormoza [Shoe brake potential and limitations]. *Zheleznyye dorogi mira [Railways of the World]*, 2004, no. 4, pp. 35–44. (In Russian)
7. Kulik V. I., Nilov A. S., Garshin A. P. et al. Issledovaniye tribotekhnicheskikh kharakteristik kompozitsionnykh materialov s karbidokremniyevoy matritsey [Study of tribotechnical characteristics of silicon carbide matrix composites]. *Novye Ogneupory [New Refractories journal]*, 2012, no. 8, pp. 45–56. (In Russian)
8. Shchurik A. G. *Iskustvennyye ughlerodnyye materialy [Artificial carbon materials]*. Perm, UNIIKM [Ural Scientific and Research Institute of Composites] Publ., 2009, 342 p. (In Russian)
9. Ono M., Nagayoshi T., Inoue M. et al. Patent US 7338987. *Friction material composition and friction material using the same*. Decf. May 21, 2004, publ. March 04, 2008, 7 p. Available at: www.patents.google.com/patent/US7338987/fr. (accessed: July 23, 2020).
10. Gilboy L. F., Wolf R. A. & Morey A. M. Patent US 2010/0065389. *Carbon fiber reinforced carbon matrix composite for brake pad back plate*. Decf. September 16, 2009, publ. March 18, 2010, 21 p. Available at: www.patents.google.com/patent/US20100065389A1/en (accessed: July 23, 2020).
11. Kumar P. & Srivastava V. K. Tribological behaviour of C/C-SiC composites. A review. *Journal of Advanced Ceramics*, 2016, vol. 5, iss. 1, pp. 1–12.
12. Stadler Z. Carbonised-material-based brake pad for a C/C-SiC composite brake disc. *Materiali in tehnologue*, 2001, vol. 35, no. 3–4, pp. 205–208.
13. Bian G. & Wu H. Friction performance of carbon/silicon carbide ceramic composite brakes in ambient air and water spray environment. *Tribology International*, 2015, vol. 92, pp. 1–11.
14. Zhang J.-X., Fan Sh.-W., Zhang L.-T. et al. Microstructure and frictional properties of 3D needled C/SiC brake materials modified with graphite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, vol. 20, iss. 12, pp. 2289–2293.
15. Garshin A. P., Kulik V. I. & Nilov A. S. Analiz sovremennogo sostoyaniya i perspektiv kommercheskogo primeneniya voloknistoarmirovannykh karbidokremniyevoy keramiki [Analysis of the current state and prospects of commercial application of fiber-reinforced silicon carbide ceramics]. *Novye Ogneupory [New Refractories journal]*, 2012, no. 2, pp. 43–52. (In Russian)
16. Garshin A. P., Kulik V. I., Matveev S. A. & Nilov A. S. Contemporary technology for preparing fiber-reinforced composite materials with a ceramic refractory matrix (review). *Refractories and Industrial Ceramics*, 2017, vol. 58, no. 2, pp. 148–161.
17. Osterle W., Deutsch C., Rooch H. & Dorfel I. Friction films on C-SiC discs after dynamometer tests with different commercial brake pad. *Thesis of EuroBrake 2012 conference*. April 16–18, 2012. Dresden, Germany, 2012. Available at: www.eurobrake.net/.../EB2012-FM-01.pdf (accessed: February 20, 2020).

Received: June 03, 2020

Accepted: June 11, 2020

Author's information:

Aleksandr A. VOROBYEV – D. Sci. in Engineering, Associate Professor;

79219751198@yandex.ru

Viktor I. KULIK – PhD in Engineering, Associate Professor; victor.i.kulik@gmail.com

Aleksey S. NILOV – PhD in Engineering, Associate Professor; alexey.s.nilov@gmail.com

Dmitriy A. ZHUKOV – PhD in Engineering, Associate Professor; dmitr_zhukov@mail.ru

УДК 629.4.015

Оценка составляющих потерь электроэнергии электроподвижным составом и устройствами электроснабжения¹

С. Г. Истомин, А. Е. Перестенко

Омский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 644046, Омск, пр. Карла Маркса, 35

Для цитирования: Истомин С. Г., Перестенко А. Е. Оценка составляющих потерь электроэнергии электроподвижным составом и устройствами электроснабжения // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 387–396.
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-387-396

Аннотация

Цель: Выполнить систематизацию составляющих потерь электрической энергии на тягу поездов на постоянном токе. Привести результаты экспертной оценки потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения и на электроподвижном составе. Обосновать актуальность применения интеллектуальных систем обработки данных в целях обеспечения контроля и снижения потерь электроэнергии в устройствах системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава. **Методы:** Используется метод экспертных аналитических оценок распределения потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения и на электроподвижном составе. **Результаты:** Применены экспертные аналитические оценки, установлены следующие значения потерь электроэнергии: потери в понижающих трансформаторах тяговых подстанций – от 1,0 до 1,5% от объема отпуска электроэнергии на тягу, потери в преобразовательных трансформаторах тяговых подстанций – от 0,75 до 2,0% от объема отпуска электроэнергии на тягу, потери в сглаживающих фильтрах тяговых подстанций – от 0,05 до 0,25%, погрешность учета приема и отпуска электроэнергии по шинам тяговых подстанций на тягу поездов – около 1%, потери в контактной сети – от 2 до 4%, потери в рельсовой цепи – от 0,5 до 2%, погрешность учета электроэнергии на электроподвижном составе – от 2,8 до 3,4%, потери электроэнергии в пусковых резисторах – от 2 до 5%, в тяговом двигателе – от 7 до 10% и на собственные нужды электроподвижного состава – от 2,5 до 4%, оценочная величина совокупных потерь на технологические операции – от 2 до 4%. **Практическая значимость:** Результаты исследования позволяют сформулировать требования к интеллектуальным системам больших объемов разнородных данных для организации мониторинга и снижения потерь электроэнергии электроподвижным составом и устройствами электроснабжения.

Ключевые слова: Интеллектуальная система, искусственный интеллект, большие данные, снижение потерь электроэнергии, тяга поездов, электроподвижной состав, система тягового электроснабжения, энергетическая эффективность.

Компания ОАО «РЖД» относится к крупнейшим потребителям электроэнергии в Российской Федерации. В структуре потребления электроэнергии тяга поездов играет главнейшую

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-38-90140.

роль, на долю которой приходится 85% [1, 2]. В настоящее время на железнодорожном транспорте наблюдается увеличение количества информационных систем, которые предоставляют частичное решение задачи повышения энергетической эффективности тяги поездов, но требуют применения новых подходов к анализу все больших объемов производимых ими данных. В связи с этим актуальным является вопрос использования интеллектуальных систем обработки данных в целях обеспечения контроля и снижения потерь электроэнергии в устройствах системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава.

Систематизация составляющих потерь электрической энергии на тягу поездов на постоянном токе в общем виде представлена на рисунке.

Небаланс расхода электроэнергии на тягу поездов определяется по формуле

$$\Delta W = W_1 - W_2,$$

где W_1 – количество электрической энергии, переданной энергосистемой на вводе 6–110 кВ; W_2 – расход электрической энергии по счетчикам электрического подвижного состава.

Небаланс формируется исходя из технологической и «коммерческой» составляющих. К технологической составляющей относятся потери электроэнергии при ее передаче от вводов тяговых подстанций до электроподвижного состава, к «коммерческой» – потери, связанные с по-

грешностью приборов учета, некорректностью снятия показаний приборов учета, несанкционированными хищениями электроэнергии, неисправностью приборов учета и др. [3, 4].

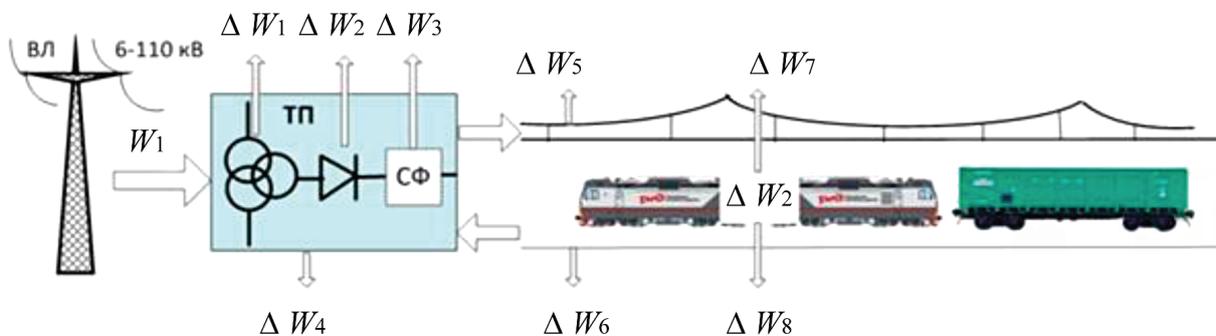
На основе экспертных аналитических оценок уровень технологических потерь электроэнергии на полигоне постоянного тока оценивается в 10,4%. Можно выделить следующие основные составляющие технологических потерь электроэнергии на тягу поездов.

1. Потери в понижающих трансформаторах тяговых подстанций (ΔW_1)

Потери в понижающих трансформаторах зависят от потребления электроэнергии на тягу поездов. Определяются они расчетным путем. Оценочная величина составляет от 1,0 до 1,5% от объема отпуска электроэнергии на тягу.

2. Потери в преобразовательных трансформаторах тяговых подстанций (ΔW_2)

Потери в преобразовательных трансформаторах зависят от потребления электроэнергии на тягу поездов, типа трансформатора и схемы выпрямления. Оценочная величина составляет от 0,75 до 2,0% от объема отпуска электроэнергии на тягу.



Систематизация составляющих потерь электрической энергии на тягу поездов на постоянном токе

3. Потери в сглаживающих фильтрах тяговых подстанций (ΔW_3)

Потери электроэнергии зависят от типа сглаживающего фильтра, сопротивления реактора и нагрузки и могут составлять от 0,05 до 0,25 %.

4. Погрешность учета приема и отпуски электроэнергии по шинам тяговых подстанций на тягу поездов (ΔW_4)

К основным составляющим погрешностей измерительных комплексов (ИК), в которые, как правило, входят трансформатор тока (ТТ), трансформатор напряжения (ТН), счетчик электроэнергии (СЭ), линия присоединения СЭ к ТН, относятся:

1) погрешности измерений электроэнергии в нормальных условиях работы ИК, определяемые классами точности ТТ, ТН, СЭ, а также потери в линиях присоединения СЭ к ТН;

2) дополнительные погрешности измерений электроэнергии в реальных условиях эксплуатации ИК, обусловленные:

– заниженным против нормативного коэффициентом мощности нагрузки (дополнительной угловой погрешностью);

– влиянием на СЭ магнитных и электромагнитных полей различной частоты;

– недогрузкой и перегрузкой ТТ, ТН, СЭ;

– несимметрией и уровнем подведенного к ИК напряжения;

– нарушением температурного режима эксплуатации.

Основная погрешность ИК определяется по формуле

$$\delta_{ИК} = \pm 1,1 \sqrt{\delta_{ТТ}^2 + \delta_{ТН}^2 + \delta_{СЭ}^2 + \delta_{л}^2}, \quad (1)$$

где $\delta_{ТТ}^2$, $\delta_{ТН}^2$, $\delta_{СЭ}^2$ – основные допустимые погрешности ТТ, ТН, СЭ при нормальных условиях (принимаются равными значениям классов точности, как правило, для тяговых подстанций 0,5), %; $\delta_{л}$ – предел допустимых потерь в ли-

ниях присоединения СЭ к ТН (принимается равным 0,25), % [5].

Таким образом, в большинстве случаев погрешность ИК ($\delta_{ИК}$) составляет ± 1 %.

5. Технические потери в тяговой сети

5.1. Потери в контактной сети (ΔW_5)

Объемы технических потерь электроэнергии в контактной сети зависят от следующих факторов [5]:

- 1) сопротивление контактной подвески;
- 2) качество токосяема;
- 3) техническая скорость движения поездов;
- 4) массы поездов и режимы ведения;
- 5) предупреждения, не предусмотренные графиком остановок поездов;
- 6) мощности ЭПС;
- 7) профиля пути и т. д.

Потери от указанных факторов изменяются от 2,0 до 4,0 %.

5.2. Потери в рельсовой сети (ΔW_6)

Объемы технических потерь электроэнергии в рельсовой сети зависят от следующих факторов:

– те же, что и для контактной сети (массы поездов и режимы ведения, мощности ЭПС, профиля пути);

– сопротивление рельсовой сети (конструктивно: бесстыковой и звеньевой);

– количество и типы применяемых дроссель-трансформаторов (ДТ) в рельсовой сети (зависят от путевого развития на межподстанционной зоне);

– виды соединений в рельсовой сети (междупутные, междроссельные, дроссельные, стыковые соединители (шпелсельные, приварные, стальные, сталемедные, медные));

– неудовлетворительное содержание элементов рельсовой сети может привести к увеличению потерь в 2 раза.

Потери от указанных факторов составляют от 0,5 до 2,0 %.

Увеличенные амплитуды тяговых токов в рельсовой сети даже при нормативных значениях асимметрии тягового тока (до 6%) приводят к нарушению нормальной работы устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) и, как следствие, к увеличению количества внеплановых остановок и невыполнению энергоэффективного графика движения поездов [5].

6. Потери энергии ЭПС

6.1. Погрешность учета электроэнергии на электрическом подвижном составе (ΔW_7)

До настоящего времени в большом количестве на электровозах серий ВЛ10 и ВЛ11 продолжают использоваться электромеханические счетчики СКВТ-Д600 М и СКВТ-Д621 классов точности 3,0 и 2,5 соответственно. Класс точности измерительного шунта 150ШС составляет 0,5.

Наряду с вышеуказанными счетчиками электрической энергии эксплуатируются и современные системы учета электрической энергии, разработанные специально для возможности их применения на железнодорожном транспорте (АЛЬФА, СЭТ-1 М.01 М, Ф61 МЕ и др.). Они позволяют осуществлять учет электрической энергии на постоянном и переменном токе с существенно меньшим порогом чувствительности (до 0,1% от номинального значения тока $I_{ном}$) и с более высоким классом точности (до 0,5 s) [5].

Погрешность комплекса учета в соответствии с формулой, аналогичной (1), колеблется от $\pm 2,8$ до 3,4%.

6.2. Потери энергии в пусковых резисторах, тяговом двигателе и на собственные нужды (ΔW_8)

Расчет потерь энергии в пусковых резисторах

Потери электроэнергии в пусковых реостатах зависят прежде всего от времени работы на реостатных позициях, которое, в свою очередь, обуславливается множеством факторов, таких

как количество остановок, количество ограничений скорости движения на участке, квалификация машиниста и т. д., поэтому потери электроэнергии в пусковых реостатах могут варьироваться в различных диапазонах.

В качестве примера рассчитаем потери электроэнергии в пусковых реостатах при условии движения на каждой из реостатных позиций в течение 5 с.

Потери электроэнергии в пусковых реостатах определяются по формуле

$$\Delta P = I^2 \cdot R \cdot t, \quad (2)$$

где I – ток якоря; R – сопротивление ступени пускового реостата; t – время работы на реостатной позиции.

В табл. 1 приведены результаты расчета потерь электроэнергии в пусковых реостатах (см. (2)) по позициям регулирования, возникающих в процессе одного пуска. Суммарные потери электроэнергии за время пуска составили 44,6 кВт·ч.

Рассчитаем долю потерь в пусковых реостатах при условии работы электровоза в режиме тяги в течение 1 ч. Исходя из того, что часовая мощность на валах тяговых двигателей электровоза 2ЭС6 равна 6440 кВт, расход электроэнергии по тяговым двигателям электровоза 2ЭС6 за время работы на реостатных позициях (5,42 мин) составит 582 кВт·ч. Отсюда доля потерь энергии в пусковых резисторах равна 7,6%. По экспертным оценкам данная величина может варьироваться в зависимости от разных факторов в диапазоне от 7 до 9%.

Расчет потерь энергии в тяговом двигателе

Значение коэффициента полезного действия (КПД) в процессе эксплуатации электровозов отличается от номинального значения (табл. 2) и может меняться в разных пределах. По экспертным оценкам диапазон изменения КПД тяговых двигателей составляет от 0,9 до 0,93. В соответствии с этим доля потерь в тяговом двигателе – от 7 до 10%.

ТАБЛИЦА 1. Расчет потерь электроэнергии в пусковых реостатах по позициям

Серийное			Серийно-параллельное			Параллельное		
№ позиции	$R_{\text{пуск}}, \text{ Ом}$	Потери электроэнергии, кВт·ч	№ позиции	$R_{\text{пуск}}, \text{ Ом}$	Потери электроэнергии, кВт·ч	№ позиции	$R_{\text{пуск}}, \text{ Ом}$	Потери электроэнергии, кВт·ч
1	20,3	4,38	24	5,90	2,55	45	2,07	0,89
2	14,3	3,09	25	5,16	2,23	46	1,52	0,66
3	10,9	2,35	26	4,59	1,98	47	1,40	0,60
4	8,39	1,81	27	3,90	1,68	48	1,26	0,54
5	6,62	1,43	28	3,59	1,55	49	1,18	0,51
6	5,99	1,29	29	3,15	1,36	50	0,97	0,42
7	5,16	1,11	30	2,73	1,18	51	0,87	0,38
8	4,59	0,99	31	2,15	0,93	52	0,79	0,34
9	3,90	0,84	32	1,82	0,79	53	0,63	0,27
10	3,49	0,75	33	1,52	0,66	54	0,54	0,23
11	2,88	0,62	34	1,32	0,57	55	0,45	0,19
12	2,32	0,50	35	1,13	0,49	56	0,38	0,16
13	2,00	0,43	36	0,97	0,42	57	0,34	0,15
14	1,58	0,34	37	0,79	0,34	58	0,27	0,12
15	1,38	0,30	38	0,65	0,28	59	0,25	0,11
16	1,08	0,23	39	0,54	0,23	60	0,19	0,08
17	0,97	0,21	40	0,39	0,17	61	0,12	0,05
18	0,71	0,15	41	0,29	0,13	62	0,06	0,03
19	0,54	0,12	42	0,19	0,08	63	0,04	0,02
20	0,34	0,07	43	0,10	0,04	64	0,03	0,01
21	0,24	0,05	44	0,00	0,00	65	0,00	0,00
22	0,10	0,02	–	–	–	–	–	–
23	0,00	0,00	–	–	–	–	–	–
Итого		21,08	Итого		17,66	Итого		5,76

ТАБЛИЦА 2. Основные параметры электродвигателя ЭДП810 (часовой режим работы)

Наименование параметра	Значение параметра
Мощность на валу, кВт	810
Напряжение на зажимах электродвигателя, В	1500
Ток якоря, А	580
КПД, о. е.	0,931

Расчет потерь энергии на собственные нужды

Для оценки потерь энергии на собственные нужды были экспертно определены коэффициенты использования мощности оборудования собственных нужд (табл. 3). В соответствии с данными коэффициентами суммарные потери электроэнергии на собственные нужды составили 130 кВт·ч.

Рассчитаем долю потерь на собственные нужды при условии работы электровоза в режиме тяги в течение 1 ч. Исходя из того, что часовая мощность на валах тяговых двигателей электровоза 2ЭС6 равна 6440 кВт, то доля потерь энергии на собственные нужды составляет 2%. По экспертным оценкам она может варьироваться в зависимости от различных факторов в диапазоне от 2 до 4% [6–8].

6.3. Непроизводительные потери электроэнергии на выполнение технологических операций

В данном случае имеются непроизводительные потери на горячий простой в ожидании работы, нагон графического времени, временные ограничения скорости движения, неграфиковые остановки, остановки у запрещающих сигналов светофоров. Совокупные потери на технологические операции оцениваются от 2 до 4% [9–11].

В настоящее время определить потери электроэнергии электроподвижным составом и устройствами электроснабжения, а также выработать мероприятия по их снижению в автоматизированном режиме не представляется возможным ввиду отсутствия единой системы сбора и обработки информации.

ТАБЛИЦА 3. Основные параметры и характеристики преобразователей собственных нужд электровоза 2ЭС6 «Синара»

Вид оборудования	Номинальная мощность, кВт	Коэффициенты использования оборудования	Общее количество на электровозе, шт.	Общая мощность, кВт
Асинхронный электродвигатель рДМ180М2 для вентилятора модуля охлаждения ТЭД	22	0,6	4	88
Электродвигатель 4ПНЖ200МАУХЛ2 для обдува блока пуско-тормозных резисторов	60	0,15	2	120
Асинхронный электродвигатель АИР71А2 для вентилятора мультициклонного фильтра воздуха	0,75	1	4	3
Асинхронный электродвигатель рДМ180ЛВ40М5 для компрессорного агрегата ДЭН-30МО	30	0,5	2	60
Кондиционер, кВт	9,24 (зима), 3,64 (лето)	1	2	18,48 (зима), 7,28 (лето)
Питание цепей управления и освещения, кВт	10	1	2	20

В связи с этим в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований для решения обозначенной проблемы будут получены следующие научные результаты:

– исследованы используемые на данный момент и разрабатываемые регистраторы параметров эксплуатации электроподвижного состава;

– изучены полнота, внутренняя и межсистемная согласованность собираемых ими данных;

– рассмотрены системы искусственного интеллекта и их применимость в имеющихся условиях;

– выявлены наиболее эффективные для определения эксплуатационных показателей методы и алгоритмы обработки больших объемов данных;

– установлены оптимальные конфигурация системы и форма представления исходных данных;

– сформулированы практические рекомендации по подготовке данных, развертыванию, настройке и эксплуатации системы, а также интерпретации полученных с ее помощью результатов.

Научная новизна проекта заключается в учете текущего состояния инфраструктуры при сборе и обработке данных об эксплуатации электроподвижного состава, дополнении требований к системам регистрации больших объемов данных, разработке оптимальных форм представления данных и унифицированного способа их обработки с целью повышения эффективности эксплуатации электроподвижного состава.

Библиографический список

1. Стратегия научно-технического развития Холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года («Белая книга»). – М. : ОАО «РЖД», 2015. – 96 с.

2. Гапанович В. А. Энергетическая стратегия и электрификация российских железных дорог /

В. А. Гапанович, С. Н. Епифанцев, В. А. Овсейчук. – М. : Эко-Пресс, 2012. – 196 с.

3. Черемисин В. Т. Этапы реализации автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, Д. В. Пашков, М. М. Никифоров // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 3. – С. 45–49.

4. Черемисин В. Т. Автоматизированный мониторинг энергетической эффективности работы электроподвижного состава ОАО «РЖД» / В. Т. Черемисин, Д. В. Пашков, С. Ю. Ушаков // Изв. Транссиба. – Омск : Омск. гос. ун-т путей сообщения, 2014. – № 3 (19). – С. 87–91.

5. Черемисин В. Т. Анализ энергетической эффективности электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения постоянного тока: отчет о НИР / В. Т. Черемисин, А. А. Бакланов, Н. В. Есин, В. О. Мельк, Е. А. Третьяков, С. В. Швецов, В. В. Шилер, А. П. Шиляков, В. В. Бублик, А. С. Вильгельм, В. А. Смирнов, А. В. Раздобаров, С. А. Пимшин, Д. В. Липунов, С. Г. Истомин, А. П. Шагохин, К. В. Панов, А. М. Корнев. – Омск : Омск. гос. ун-т путей сообщения, 2016. – 61 с.

6. Истомин С. Г. Применение регрессионных моделей для оценки энергетической эффективности вспомогательного оборудования электровозов серии 2ЭС6 / С. Г. Истомин, Д. И. Бондаревский // Изв. Транссиба. – Омск : Омск. гос. ун-т путей сообщения, 2018. – № 1 (33). – С. 22–30.

7. Сидорова Е. А. Применение корреляционно-регрессионного анализа для оценки энергетической эффективности вспомогательного оборудования пассажирских электровозов постоянного тока серии ЭП2К / Е. А. Сидорова, С. Г. Истомин, О. В. Гателюк // Вестн. РГУПС. – 2018. – № 3 (71). – С. 59–68.

8. Истомин С. Г. Анализ применения регрессионных моделей для оценки энергетической эффективности вспомогательного оборудования пригородных электропоездов постоянного тока серии ЭД4М / С. Г. Истомин, А. А. Штраухман // Транспорт Урала. – 2018. – № 4 (59). – С. 81–85.

9. Патент 2591559. Российская Федерация ; МПК В60L3/00. Способ определения потерь электроэнергии электроподвижным составом при неграфиковых остановках с использованием бортовых информационно-измерительных комплексов учета электро-

энергии / С. Г. Истомин, А. Л. Каштанов, В. Л. Незе-
вак, Д. В. Пашков, С. Ю. Ушаков, В. Т. Черемисин,
А. П. Шатохин. – Заявитель и патентообладатель
ОмГУПС. – № 2015105231/11. – Заявл. 16.02.2015 г.;
опубл. 20.07.2016 г. – Бюл. № 20. – 9 с.

10. Патент 2591558. Российская Федерация; МПК
B61L3/12. Способ определения непроизводительных
потерь электроэнергии электроподвижным составом
при нагоне графического времени с использованием
бортовых информационно-измерительных комплек-
сов учета электроэнергии / С. Г. Истомин, Д. В. Паш-
ков, С. Ю. Ушаков, В. Т. Черемисин. – Заявитель и па-
тентообладатель ОмГУПС. – № 2015114306/11. – За-
явл. 16.04.2015 г.; опубл. 20.07.2016 г. – Бюл. № 20. –
8 с.

11. Патент 2600960. Российская Федерация; МПК
B60L3/12. Способ определения непроизводитель-

ных потерь электроэнергии электроподвижным со-
ставом при проследовании участков с временным
ограничением скорости с использованием борто-
вых информационно-измерительных комплексов
учета электроэнергии / С. Г. Истомин, Д. В. Пашков,
С. Ю. Ушаков, В. Т. Черемисин. – Заявитель и патен-
тообладатель ОмГУПС. – № 2015114900/11. – Заявл.
20.04.2015 г.; опубл. 27.10.2016 г. – Бюл. № 30. – 8 с.

Дата поступления: 11.06.2020 г.

Решение о публикации: 17.06.2020 г.

Контактная информация:

ИСТОМИН Станислав Геннадьевич – канд.
техн. наук, доцент; istomin_sg@mail.ru
ПЕРЕСТЕНКО Артем Евгеньевич – аспирант;
art-perestenko@yandex.ru

Assessment of the electric power loss components by the electric stock and electric power supply facilities

S. G. Istomin, A. E. Perestenko

Omsk State Transport University, 35, Karl Marks pr., Omsk, 644046, Russian Federation

For citation: Istomin S. G., Perestenko A. E. Assessment of the electric power loss components by the electric stock and electric power supply facilities. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 387–396. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-387-396

Summary

Objective: To conduct systematization of electric power loss components for direct-current hauling operations. To present the expert assessment results of electric power losses in traction energy system of the electric stock. To justify applicability of intelligent data processing systems, in order to provide control and to reduce electric power losses in facilities of the traction energy system and the electric stock. **Methods:** The method of expert analytical estimation of electric power loss distribution in the traction energy system and the electric stock was used in the study. **Results:** After applying the expert analytical estimation method, the following values of electric power losses were determined: losses in receiving transformers of traction substations – from 1,0 to 1,5% of the volume of electric power output on traction, losses in receiving transformers of traction substations – from 0,75 to 2,0% of the volume of electric power output on traction, losses in smoothing filters of traction substations – from 0,05 to 0,25%, error in registering of electric power receipt and output via bus bars of traction substations on hauling operation – about 1%, losses in overhead catenary – from 2 to 4%, losses in the track circuit – from 0,5 to 2%, error in registering electric power in the electric stock – from 2,8 to 3,4%, losses of electric power in accelerating resistors – from 2 to 5%, in the traction engine – from 7 to 10% and on the electric stock auxiliaries – from 2,5 to 4%, estimating value of cumulative losses on processing procedures comprises

from 2 to 4%. **Practical importance:** Research results make it possible to set up the requirements for intelligent systems with large volume of dissimilar data for the arrangement of monitoring and reduction of electric power losses by the electric stock and electric power supply facilities.

Keywords: Intelligent system, artificial intelligence, large data volume, reduction of electric power loss, hauling operation, electric stock, traction energy system, energy efficiency.

References

1. *Strategiya nauchno-tehnicheskogo razvitiya kholdinga "Rossiyskiye zhelezniye dorogi" na period do 2020 goda i perspektivu do 2025 goda ("Belaya kniga")* [Strategy of scientific and technical development of the "Russian Railways" holding company for the period up to 2020 and prospects through to 2025 ("White Book")]. Moscow, OAO "Russian Railways" Publ., 2015, 96 p. (In Russian)
2. Gapanovich V.A., Epifantsev S.N. & Ovseichuk V.A. *Energeticheskaya strategiya i elektrifikatsiya rossiyskikh zheleznykh dorog* [Energy strategy and electrification of Russian railways]. Moscow, Eco-Press, 2012, 196 p. (In Russian)
3. Cheremisin V.T., Ushakov S. Yu., Pashkov D.V. & Nikiforov M.M. *Etapy realizatsii avtomatizirovannoy sistemy monitoring energoeffektivnosti perevoznochnogo protsessa* [Implementation phases of an automated system for monitoring energy efficiency of transportation process]. *Zheleznodorozhniy transport* [Railway transport], 2015, no. 3, pp. 45–49. (In Russian)
4. Cheremisin V.T., Pashkov D.V. & Ushakov S. Yu. *Avtomatizirovanniy monitoring energeticheskoy effektivnosti raboty elektropodvizhnogo sostava OAO RZhD* [Computer-automated energy efficiency monitoring of OAO "Russian Railways" electric stock operation]. *Izvestiya Transsiba* [Proceedings of Transsib]. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2014, no. 3, pp. 87–91. (In Russian)
5. Cheremisin V.T., Baklanov A.A., Esin N.V., Melk V.O., Tretyakov E.A., Shvetsov S.V., Shiller V.V., Shilyakov A.P., Bublik V.V., Vilgelm A.S., Smirnov V.A., Razdobarov A.V., Pimshin S.A., Lipunov D.V., Istomin S.G., Shatokhin A.P., Panov K.V. & Kornev A.M. *Analiz energeticheskoy effektivnosti elektropodvizhnogo sostava i sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka. Otchet o NIR* [Analysis of the electric stock energy efficiency and DC traction power supply system. Research report]. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2016, 61 p. (In Russian)
6. Istomin S.G. & Bondarevskiy D.I. *Primeneniye regressionnykh modeley dlya otsenki energeticheskoy effektivnosti vspomogatel'nogo oborudovaniya elektrovozov serii 2ES6* [Application of regression models for energy efficiency assessment of supporting equipment of the 2ES6 series electric locomotives]. *Izvestiya Transsiba* [Proceedings of Transsib]. Omsk, Omsk State Transport University Publ., 2018, no. 1(33), pp. 22–30. (In Russian)
7. Sidorova E.A., Istomin S.G. & Gatelyuk O.V. *Primeneniye korrelyatsionno-regressionnogo analiza dlya otsenki energeticheskoy effektivnosti vspomogatel'nogo oborudovaniya passazhirskikh elektrovozov postoyannogo toka serii EP2K* [Application of correlation-regression analysis for energy efficiency assessment of supporting equipment for the EP2K series DC passenger locomotives]. *Vestnik RGUPS* [Bulletin of Rostov State Transport University], 2018, no. 3(71), pp. 59–68. (In Russian)
8. Istomin S.G. & Shtraukhman A.A. *Analiz primeneniya regressionnykh modeley dlya otsenki energeticheskoy effektivnosti vspomogatel'nogo oborudovaniya prigorodnykh elektropoezdov postoyannogo toka serii ED4M* [Application analysis of regression models for energy efficiency assessment of supporting equipment for ED4M series DC commuter trains]. *Transport Urala* [Ural Transport], 2018, no. 4(59), pp. 81–85. (In Russian)
9. Patent 2591559. Rossiyskaya Federatsiya, MPK W 60 L 3/00 [Patent 2591559. Russian Federation, IPC W 60 L 3/00. *Sposob opredeleniya poter elektroenergii elektropodvizhnym sostavom prynegrafikovyykh ustanovkakh s ispolzovaniyem bortovykh informatsionno-izmeritelnykh kompleksov ucheta elektroenergii* [Determination method for electric power losses by the electric stock during non-schedule stops with on-board data measuring systems of energy accounting]. S.G. Istomin, A.L. Kachanov, V.L. Nezevak, D.V. Pashkov, S.Yu. Ushakov, V.T. Cheremisin. Applicant and patent owner OmGUPS

[Omsk State Transport University], no. 2015105231/11. Appl. February 16th, 2015; publ. July 20th, 2016. Bull. no. 20, 9 p. (In Russian)

10. Patent 2591558. Rossiyskaya Federatsiya, MPK V 61 L 3/12 [Patent 2591558. Russian Federation, IPC W 61 L 3/12]. *Sposob opredeleniya neproizvoditelnykh poter elektroenergii elektropodvizhnym sostavom pry nagnone grafikovogo vremeni s ispolzovaniyem bortovykh informatsionno-izmeritelnykh kompleksov ucheta elektroenergii* [Determination method for inefficient electric power losses by the electric stock when regaining schedule time with on-board data measuring systems of energy accounting]. S.G. Istomin, D.V. Pashkov, S. Yu. Ushakov, V.T. Cheremisin. Applicant and patent owner OmGUPS [Omsk State Transport University], no. 2015114306/11. Appl. April 16th, 2015, publ. July 20th, 2016. Bull. no. 20, 8 p. (In Russian)

11. Patent 2600960. Rossiyskaya Federatsiya, MPK V 60 L 3/12 [Patent 2600960. Russian Federation, IPC W 60 L 3/12]. *Sposob opredeleniya neproizvoditelnykh*

poter elektroenergii elektropodvizhnym sostavom pry prosledovanii uchastkov s vremennym ogranicheniem skorosty s ispolzovaniem bortovykh informatsionno-izmeritelnykh kompleksov ucheta elektroenergii [Determination method for inefficient electric power losses by the electric stock when passing districts with temporary speed limits using on-board data measuring systems of energy accounting]. S.G. Istomin, D.V. Pashkov, S. Yu. Ushakov, V.T. Cheremisin. Applicant and patent owner OmGUPS [Omsk State Transport University], no. 2015114900/11. Appl. April 20th, 2015, publ. October 27th, 2016. Bull. no. 30, 8 p. (In Russian)

Received: June 11, 2020

Accepted: June 17, 2020

Author's information:

Stanislav G. ISTOMIN – PhD in Engineering, Associate Professor; istomin_sg@mail.ru

Artem Yu. PERESTENKO – Postgraduate Student; art-perestenko@yandex.ru

УДК 656.212.5

Оценка качества переработки вагонопотока в условиях неравномерности прибытия поездов на сортировочную станцию

А. Г. Котенко, В. В. Соляник

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

Для цитирования: Котенко А. Г., Соляник В. В. Оценка качества переработки вагонопотока в условиях неравномерности прибытия поездов на сортировочную станцию // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 397–406.
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-397-406

Аннотация

Цель: Рассматривается подход к решению задачи по определению пороговых значений времени нахождения транзитного вагона с переработкой на станции для оценки качества технологии переработки на ней вагонопотока. Это необходимо для того, чтобы эффективно использовать пропускную и перерабатывающую способности сортировочной станции. Данный подход к решению задачи включает в себя анализ среднего времени нахождения транзитного вагона на станции с переработкой, а также определение суточной неравномерности количества подводимых к станции поездов и выявление изменения вагонопотока за месяц. **Методы:** Применялись теория массового обслуживания в части описания межоперационных ожиданий на сортировочной станции с транзитным вагоном с переработкой, аналитически-детерминированный и вероятностный подходы в исследовании возможностей станции по освоению вагонопотока, имитационное моделирование работы сортировочной станции. **Результаты:** Создан универсальный аппарат, позволяющий оценить качество технологии переработки вагонопотоков в условиях неравномерности подхода поездов к станции. Построены графики с нижними и верхними границами оценки качества процесса переработки вагонопотока на сортировочной станции. Также на основе анализа среднего времени нахождения вагона на станции была разработана модель работы сортировочной станции, технологические процессы которой отражены на графиках. Выявлены условия оптимального взаимодействия парков станции для задания величины вагонопотока во взаимодействии с прилегающими участками. **Практическая значимость:** С помощью модели можно осуществлять экспресс-оценку показателя качества технологии переработки вагонопотока в зависимости от нагрузки и возможностей технических средств, что позволит определить резервы станции с целью осуществления организационно-технических мероприятий.

Ключевые слова: Сортировочная станция, имитационное моделирование, техническое оснащение, переработка, показатели работы станции.

Введение

Сортировочная станция предназначена для массового расформирования и формирования составов. Она – ключевое звено в осуществлении ритма движения направлений сети, т. е. прием

поездопотока с учетом неравномерности движения поездов и отправлением поездопотока. Сортировочная станция выступает в качестве буфера, сглаживающего неравномерность для дальнейшей равномерной загрузки сети. К ключевым факторам, оказывающим негативное воздей-

ствии на функционирование станции, относится неравномерность поступления поездопотоков на станцию. Это приводит к неравномерной загрузке технических средств станции, возникновению межоперационных простоев, а также необходимости создания излишних резервов мощности станции. Неравномерность поступления поездопотоков на станцию влияет на качественные показатели станции. Уточнение этого показателя дает возможность выявить резервы станции, чтобы проводить организационно-технические мероприятия.

Цель исследования – создание аппарата для экспресс-анализа технологии переработки вагонов на станции. Научная задача заключается в построении алгоритма прогноза интенсивности использования технических средств станции в зависимости от объема вагонопотока с учетом его неравномерности.

Под неравномерностью принято считать изменения объемов перевозок на железнодорожном транспорте в течение определенного периода времени. Под неравномерностью понимают объективное свойство сложных систем, связанное с множеством случайных процессов, происходящих в процессе деятельности железнодорожного транспорта. Причины ее возникновения подразделяют на экономические, технические и организационные. Неравномерность подвода поездов сказывается на всех технических средствах станции, вызывая межоперационные простои, нестабильность загрузки объектов инфраструктуры станции, создание резервов, необходимых для погашения пиков загрузки станции.

Ранее уже отмечалось, что сгущенный поездопоток в отдельные часы вследствие неравномерности требует использования резервов [1–6] для его освоения. В этой связи возрастают потребная пропускная и перерабатывающая способности станции. Факторы неравномерности следует учитывать при определении максимальных размеров движения в процессе разработки графика, оценке количества бригад пунктов технического осмотра (ПТО) и пунктов коммерческого осмотра (ПКО), локомотивных бригад,

поездных и маневровых локомотивов. Будем использовать формулу из статьи [7]

$$K_{\text{нер}}^{\text{год}} = \frac{U_{\text{пер}}^{\text{мес}}}{U_{\text{пер}}^{\text{год}}}$$

где $U_{\text{пер}}^{\text{мес}}$, $U_{\text{пер}}^{\text{год}}$ – среднегодовые и максимальные объемы работы станции. Отсюда получается, что

$$U_{\text{пер}(\text{min})} < U_{\text{пер}} \cdot K_{\text{нер}} < U_{\text{пер}(\text{max})},$$

здесь $U_{\text{пер}(\text{min})}$ – минимальный объем переработки; $U_{\text{пер}} \cdot K_{\text{нер}}$ – фактический перерабатываемый объем; $U_{\text{пер}(\text{max})}$ – максимальный перерабатываемый объем; $U_{\text{пер}}$ – вагонопоток, следующий в переработку.

На рис. 1 показано, как изменяется коэффициент неравномерности в течение года. Максимальная величина коэффициента неравномерности наблюдается в мае, а минимальная – в январе и декабре.

Неравномерности подхода поездов к станции по четной и нечетной системам иллюстрирует рис. 2. На нем видно, что максимальный интенсивный интервал прибытия поездов составляет 20 мин. Распределение интервалов подчиняется логнормальному закону.

Время нахождения вагона на станции

Основным показателем работы станции является время нахождения [8–12] вагона на станции. Оно определяется временем переработки вагонопотока, которое, в свою очередь, описывается технической характеристикой станции:

$$t_{\text{пер}} = t_{\text{пр}} + t_{\text{оп}} + t_{\text{р}} + t_{\text{нак}} + t_{\text{оф}} + t_{\text{ф}} + t_{\text{от}} + t_{\text{о}},$$

где $t_{\text{пр}}$, $t_{\text{р}}$, $t_{\text{ф}}$ – время нахождения вагона под операциями: прибытие, расформирование, формирование; $t_{\text{оп}}$, $t_{\text{оф}}$, $t_{\text{от}}$ – время ожидания соответствующих операций из-за занятости технических средств; $t_{\text{нак}}$ – время нахождения вагона под накоплением.

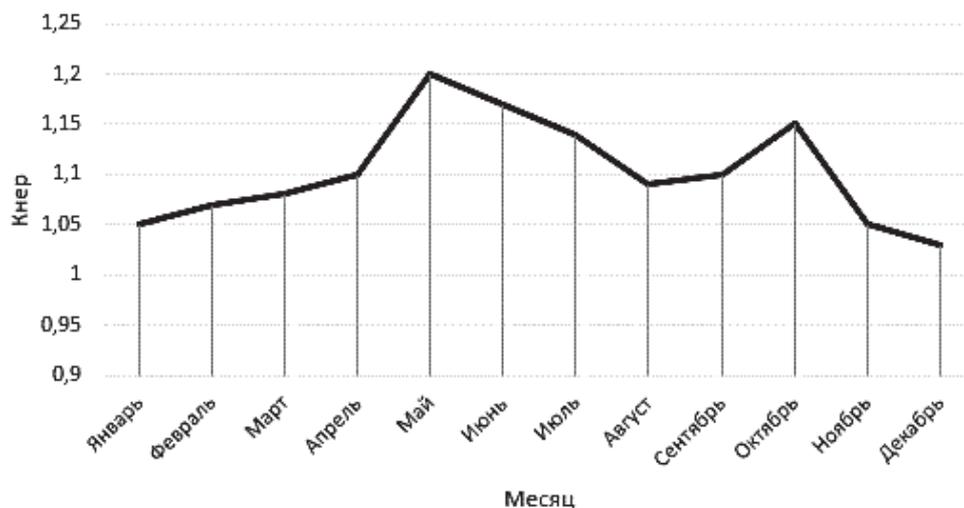


Рис. 1. Среднегодовое колебание значений коэффициента неравномерности

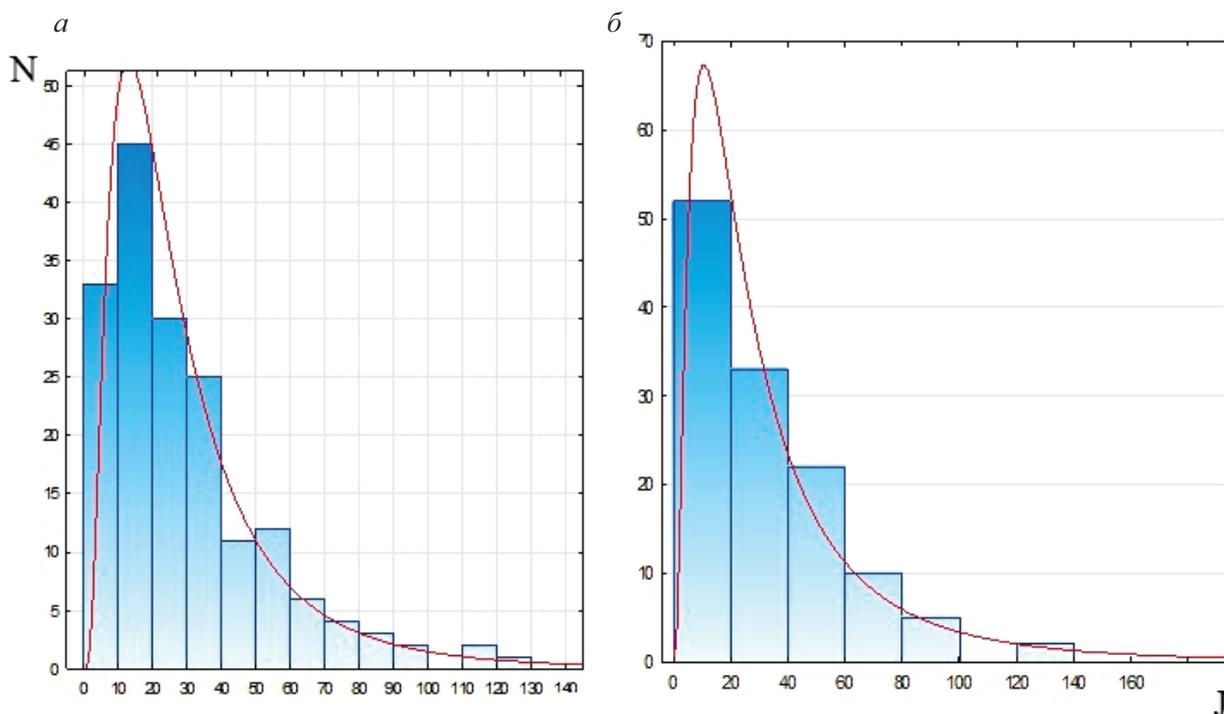


Рис. 2. Неравномерность прибытия поездов в четную (а) и нечетную (б) систему

В итоге получаем, что $t_{пер}$ является функцией, зависящей от трех аргументов:

$$t_{пер} = f(t_{техн}, t_{ож}, t_{нак}),$$

$$t_{нак} = \frac{cmk}{U_{пер}},$$

где k – число назначений поездов, формируемых на станции; c – параметр накопления; m – количество вагонов в составе.

Техническая характеристика оценивает эксплуатационные возможности освоения тех или иных объемов вагонопотока на данной станции. Она связывает воедино количество и качество работы станции, техническое оснащение и тех-

нологию. На рис. 3 представлена зависимость времени нахождения вагона на станции от объема переработки, которая также называется технической характеристикой станции. Значение $U'_{\text{пер}}$ является фактическим остатком вагонов на станции, $U''_{\text{пер}}$ – максимальной загрузкой станции при минимальном значении времени переработки вагонопотока. Область от $U'_{\text{пер}}$ до $U''_{\text{пер}}$ – это область минимальных простоев вагона на станции, которая определяет оптимальный поток для станции. В случае увеличения потока до значения $U'''_{\text{пер}}$ время простоя резко возрастает. Чтобы этого не допустить, необходимо заблаговременно совершенствовать техническое оснащение и технологию, в результате чего график сдвигается вправо и оптимальный поток для станции увеличивается.

Методы описания работы станции

Работа сортировочной станции описывается с помощью следующих методов [13–18]:

- аналитические методы, в том числе детерминированный и вероятностный. В первом случае имеется в виду расчет по алгебраическим зависимостям, а во втором – по зависимостям теории массового обслуживания;
- графический метод, который заключается в построении суточного плана-графика работы станции;

– имитационное моделирование. Оно имеет наименьшую погрешность по отношению к остальным, поэтому получило широкое распространение. Особенность данного метода в том, что реальный объект заменяется компьютерной моделью, благодаря которой проводятся экспериментальные варианты расчеты.

Для расчета ожиданий были использованы формулы Н. Н. Шабалина [19]

$$t_{\text{оп}} = \frac{Nt_{\text{г}}^2(v_{\text{вх}}^{2,5} + v_{\text{г}}^2)}{48 - 2Nt_{\text{г}}},$$

$$t_{\text{оф}} = \frac{Nt_{\text{ф}}^2(1 + v_{\text{ф}}^2)}{48M - 2Nt_{\text{ф}}},$$

$$t_{\text{от}} = \frac{NI_{\text{ф}}^2(1 + v_{\text{о}}^2)}{48 - 2NI_{\text{о}}},$$

где N – количество поездов, перерабатываемых за сутки; $v_{\text{вх}}, v_{\text{г}}, v_{\text{ф}}, v_{\text{о}}$ – коэффициенты вариации интервалов прибытия поездов в расформирование, горки, формирование, отправление; $I_{\text{о}}, I_{\text{ф}}$ – средний интервал отправления грузовых поездов, средний интервал формирования поездов.

Также для расчета ожиданий были использованы формулы И. Б. Сотникова [20]

$$t_{\text{ож}} = \frac{\Psi(v_{\text{вх}}^2 + v_{\text{обсл}}^2) \cdot t_{\text{обсл}} \cdot \alpha}{2 \cdot (1 - \Psi)},$$

$$t_{\text{ож}} = \frac{\Psi^2(v_{\text{вх}}^2 + v_{\text{обсл}}^2)}{2\mu(1 - \Psi)[1 - v_{\text{вх}}(1 - \Psi)]},$$

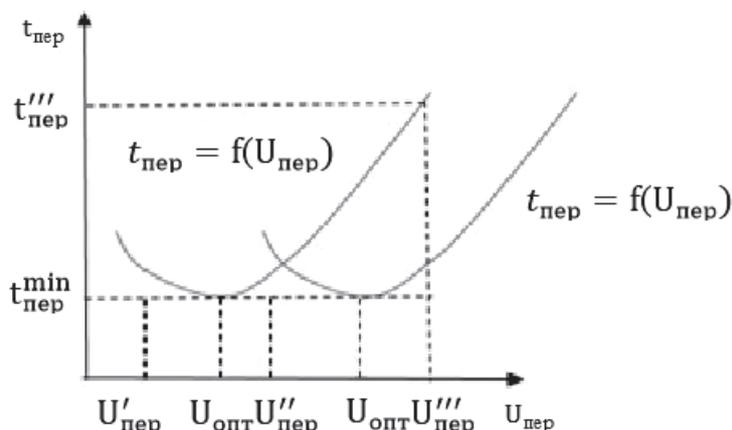


Рис. 3. Изменение технических и технологических возможностей станции

в которых $v_{вх}$, $v_{об}$ – коэффициенты вариации соответственно интервалов входящего потока и времени обслуживания; $t_{обсл}$ – время обслуживания; ψ – загрузка системы обслуживания; α – поправочный коэффициент, равный 0,5–0,75; μ – интенсивность обслуживания, поезд/ч;

На рис. 4 представлен алгоритм имитационной модели.

В исходных данных были введены интенсивности использования технических средств станции: парка приема, сортировочной горки, сортировочного парка, парка отправления и маневровых локомотивов, а также фактические времена в парках станции и нормативные.

В результате имитационного моделирования была построена модель работы сортировочной станции. На рис. 5, а показаны изменения параметров при максимуме использования технических средств станции, на рис. 5, б – при минимуме.

Заключение

С помощью представленной модели можно предвидеть затруднения в работе станции, выявить нужный темп, исходя из планируемых размеров движения, а также определить потреб-

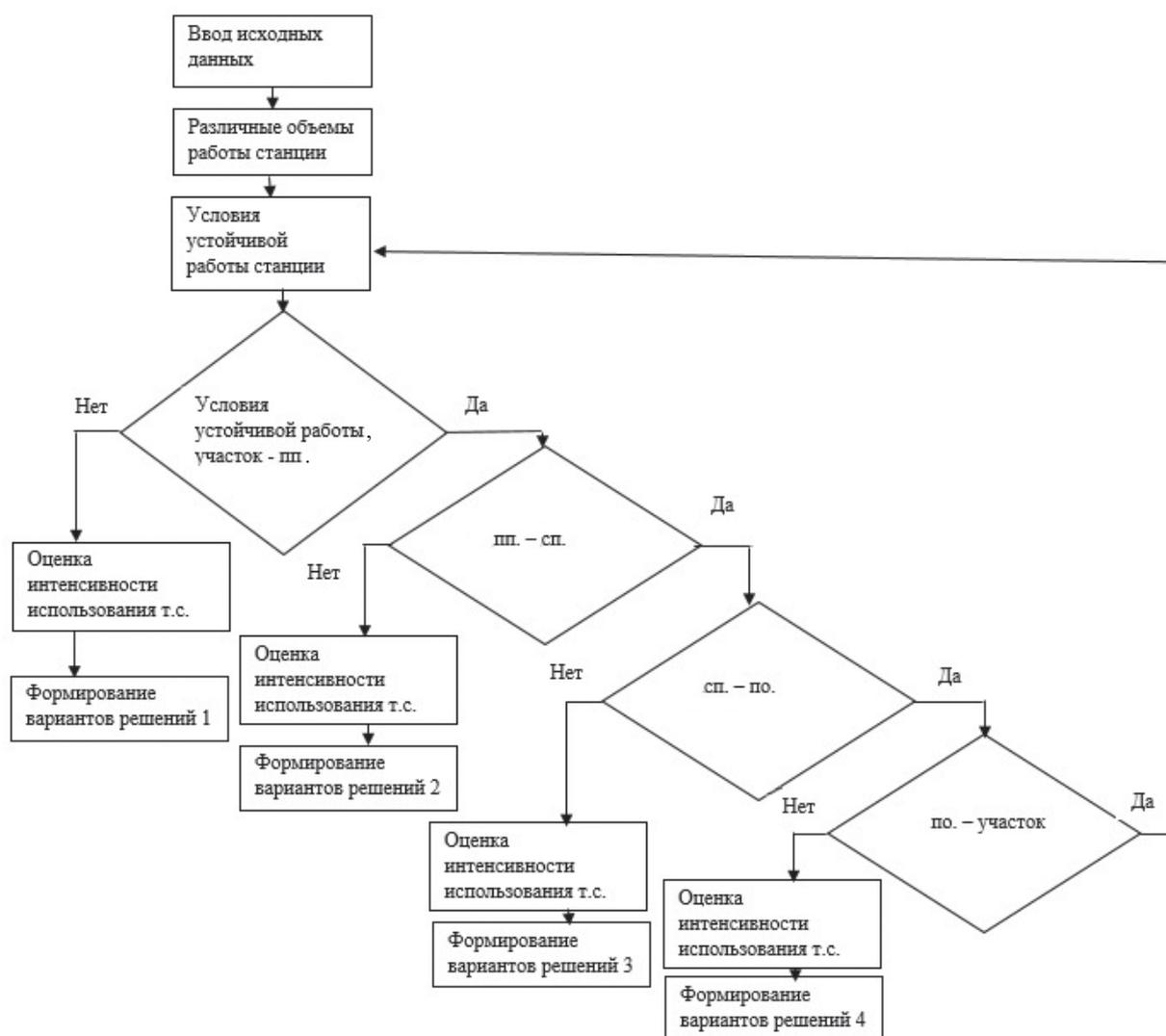


Рис. 4. Алгоритм имитационной модели

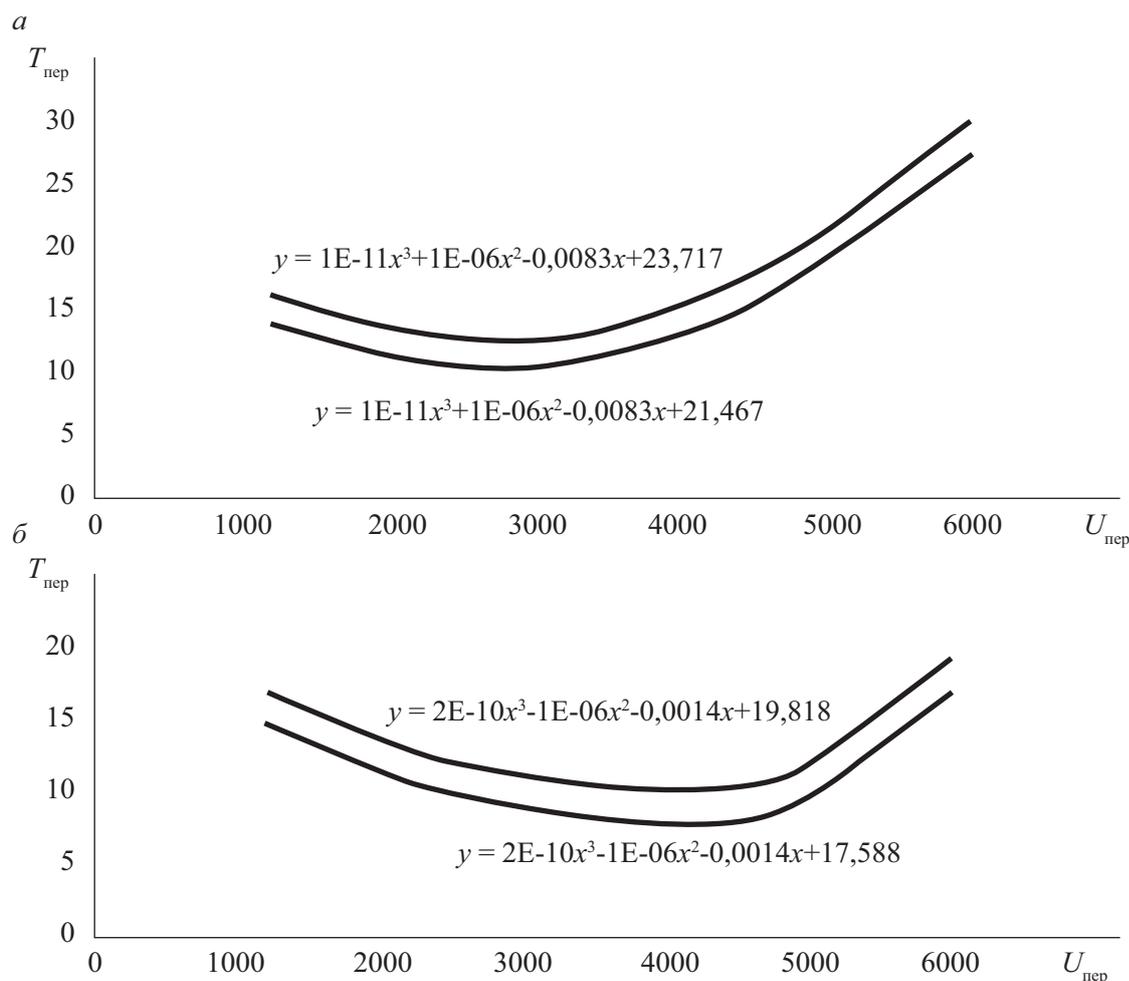


Рис. 5. Сравнение технических характеристик сортировочной станции четной (а) и нечетной (б) системы

ное количество бригад ПТО, ПКО и станционных технологических центров, локомотивных бригад, поездных и маневровых локомотивов. Более детальный учет данных параметров позволит уточнить целесообразность введения новых решений усовершенствования работы станции.

Библиографический список

1. Шенфельд К. П. О показателях качества организации перевозочного процесса / К. П. Шенфельд // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 3. – С. 64–67.
2. Лисогурский О. Н. Современные подходы к техническому нормированию работы железной дороги / О. Н. Лисогурский // Вісн. Дніпропетровськ. нац. ун-ту залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2007. – № 19. – С. 109–112.
3. Левин Д. Ю. Теория оперативного управления перевозочным процессом / Д. Ю. Левин. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2008. – 625 с.
4. Обухов А. Д. Совершенствование технологии работы сортировочных станций в современных условиях на основе факторного анализа / А. Д. Обухов // Бюл. транспортной информации. – 2015. – № 235. – С. 45–51.
5. Котельников С. С. Имитационное моделирование работы станций / С. С. Котельников // Современ-

ные проблемы транспортного комплекса России. – 2011. – Т. 1. – № 1. – С. 82–86.

6. Тимченко В. С. Пропускная способность линии в условиях реконструкции / В. С. Тимченко, А. Г. Котенко // Транспорт : Проблемы, Идеи, Перспективы. – 2017. – С. 121–125.

7. Котенко А. Г. Методика комплексной оценки пропускной способности реконструируемой железнодорожной линии на основе имитационного моделирования / А. Г. Котенко, В. С. Тимченко // Транспорт : Наука, Техника, Управление. – М. : Всерос. Ин-т технич. информации РАН, 2017. – С. 3–8.

8. Карчик В. Г. Концептуальные вопросы учета эксплуатационных издержек на грузовые перевозки железнодорожного транспорта на базе процессного подхода / В. Г. Карчик, А. Г. Котенко // Повышение эффективности транспортной системы региона: проблемы и перспективы. – Хабаровск : Дальневосточ. гос. ун-т путей сообщения, 2015. – С. 95–103.

9. Грошев Г. М. Исследование эффективности информационных технологий диспетчерского регулирования на сортировочной станции в современных условиях / Г. М. Грошев, А. Г. Котенко, А. В. Сугоровский, М. М. Магомедов // Интеллектуальные системы на транспорте. – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 177–184.

10. Котенко А. Г. Диспетчерское регулирование на сортировочной станции / А. Г. Котенко, М. М. Магомедов, Г. М. Грошев, А. В. Сугоровский // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 2. – С. 47–54.

11. Бородин А. Ф. Комплексные решения проблем развития инфраструктуры и перевозочных ресурсов / А. Ф. Бородин // Мир транспорта. – 2017. – Т. 15. – № 1 (68). – С. 6–17.

12. Козлов П. А. Теоретические основы, организационные формы, методы оптимизации гибкой технологии транспортного обслуживания заводов черной металлургии : автореф. дис. ... докт. техн. наук, специальность : 05.22.12 / П. А. Козлов. – М. : МИИТ, 1987. – 46 с.

13. Долгоруков Д. С. Моделирование продвижения вагонопотоков по сортировочным станциям / Д. С. Долгоруков, Т. Н. Каликина // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2013. – № 1 (1). – С. 81–84.

14. Грошев В. А. К вопросу моделирования технологических процессов на станциях / В. А. Грошев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2019. – Т. 16. – Вып. 1. – С. 87–94.

15. Ефименко Ю. И. Проблемы оптимизации этапности развития станций при использовании альтернативных вариантов проектных решений / Ю. И. Ефименко, М. В. Четчуев, А. Г. Филиппов, М. В. Губарь // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2018. – Т. 15. – Вып. 2. – С. 194–206.

16. Тепикин В. А. Совершенствование способов расформирования составов с вагонами, запрещенными к роспуску / В. А. Тепикин, А. Г. Котенко, И. А. Ролле // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2018. – Т. 15. – Вып. 1. – С. 90–100.

17. Рыбин П. К. Анализ структуры поездопотоков и вагонопотоков, поступающих в адрес российских портов Финского залива / П. К. Рыбин, Н. В. Ершиков, Н. С. Комовкина, Д. В. Путилина // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2018. – Т. 15. – Вып. 3. – С. 478–486.

18. Сергеева Т. Г. Совершенствование управления парком частных вагонов / Т. Г. Сергеева // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2019. – Т. 16. – Вып. 3. – С. 449–455.

19. Шабалин Н. Н. Оптимизация процесса переработки вагонов на станциях / Н. Н. Шабалин. – М. : Транспорт, 1973. – 182 с.

20. Сотников Е. А. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и ее влияние на потребную пропускную способность участков / Е. А. Сотников, К. П. Шенфельд // Вестн. Науч.-исслед. ин-та ж.-д. транспорта. – 2011. – № 5. – С. 3–9.

Дата поступления: 17.04.2020

Решение о публикации: 22.05.2020

Контактная информация:

КОТЕНКО Алексей Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор; kotenko@pgups.ru

СОЛЯНИК Владимир Владимирович – аспирант; mister.solianik@yandex.ru

Quality assessment of yard operation under the conditions of irregularity of train arrival at the marshaling yard

A. G. Kotenko, V. V. Solyanik

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

For citation: Kotenko A. G., Solyanik V. V. Quality assessment of yard operation under the conditions of irregularity of train arrival at the marshaling yard. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 397–406. (In Russian)
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-397-406

Summary

Objective: To consider the approach to determining threshold time values of a through passenger train at a handling station in order to evaluate the quality of handling technology of the car traffic volume. This is necessary in order to use effectively train handling and estimated capacity of the marshaling yard. The given approach involves the analysis of average time of a through passenger train at a handling station, as well as determination of daily irregularity in the number of trains approaching the station, as well as the detection of changes in car traffic volume within a month's time. **Methods:** Queuing theory was applied concerning the description of a through passenger train waiting time between procedures at the marshaling yard. Analytically-deterministic and probabilistic approaches were used in order to study the station potential to handle the car traffic volume, and simulation modeling was applied for the study of the marshaling yard operation. **Results:** A multi-purpose tool was created allowing for quality evaluation of yard operation in conditions of irregularity of trains approaching the station. Graphs with lower and upper limits of quality evaluation of yard operation process were designed. Moreover, a marshaling yard operation model was designed by means of the analysis of average station time, technical processes of which are presented in the graphs as well. The conditions of the effective cooperation of yards, in order to set the size of car traffic volume during interaction with dependent sections, were detected. **Practical importance:** The model makes it possible to perform express-evaluation of quality indicators of yard operation technology depending on carrying capacity and capabilities of facilities. The above-mentioned will allow for determination of station reserves to perform administrative and technical measures.

Keywords: Marshaling yard, simulation modeling, technical equipment, yard operation, station performance indicators.

References

1. Shenfeld K. P. O pokazatelyakh kachestva organizatsii perevoznogo protsessa [Quality performance indicators of transportation process management]. *Zheleznodorozhniy transport [Railway transport]*, 2011, no. 3, pp. 64–67. (In Russian)
2. Lisogurskiy O. N. Sovremenniye podkhody k tekhnicheskomu normirovaniyu raboty zheleznoy dorog [Modern approaches to technical rate setting of railway operation]. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна [Proceedings of Lazarian Dnepropetrovsk National University of Railway Transport]*, 2007, no. 19, pp. 109–112. (In Russian)
3. Levin D. Yu. *Teoriya operativnogo upravleniya perevoznym protsessom [The theory of operational control over transportation process]*. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 2008, 625 p. (In Russian)
4. Obukhov A. D. Sovershenstvovaniye tekhnologii raboty sortirovochnykh stantsiy v sovremennykh usloviyakh na osnove faktornogo analiza [Technological

advancement of marshaling yard operation in modern conditions based on factor analysis]. *Byulleten transportnoy informatsii* [The Bulletin of Transport Information], 2015, no. 235, pp. 45–51. (In Russian)

5. Kotelnikov S. S. Imitatsionnoye modelirovaniye raboty stantsiy [Simulation modeling of station activity]. *Sovremenniy problem transportnogo kompleksa Rossii* [Transport system of Russia: modern problems], 2011, vol. 1, no. 1, pp. 82–86. (In Russian)

6. Timchenko V. S. & Kotenko A. G. Propusknaya sposobnost linii v usloviyakh rekonstruktsii [Traffic capacity of a railway under reconstruction]. *Transport: Problemy, Idei, Perspektivy* [Transport: Problems, Ideas, Prospects], 2017, pp. 121–125. (In Russian)

7. Kotenko A. G. & Timchenko V. S. Metodika kompleksnoy otsenki propusknoy sposobnosti rekonstruirovomoy zheleznodorozhnoy linii na osnove imitatsionnogo modelirovaniya [Integrated assessment method of traffic capacity of a railway line under reconstruction based on simulation modeling]. *Transport: Nauka, Tekhnika, Upravleniye* [Transport: Science, Engineering, Management]. Moscow, All-Russian Institute of Technological Information RAS Publ., 2017, pp. 3–8. (In Russian)

8. Karchik V. G. & Kotenko A. G. Kontseptualniye voprosy ucheta ekspluatatsionnykh izderzhkek na gruzoviy perevozky zheleznodorozhnogo transporta na baze protsessnogo podkhoda [Concept-based issues of operating cost accounting on freight rail transport based on the process approach]. *Povysheniye effektivnosti transportnoy sistemy regiona: problemy i perspektivy* [Efficiency improvement of the region's transportation system: problems and prospects]. Khabarovsk, Far Eastern State Transport University Publ., 2015, pp. 95–103. (In Russian)

9. Groshev G. M., Kotenko A. G., Sugorovskiy A. V. & Magomedov M. M. Issledovaniye effektivnosti informatsionnykh tekhnologiy dispetcherskogo regulirovaniya na sortirovochnoy stantsii v sovremennykh usloviyakh [The study of train dispatching information technologies at the marshaling yard in the present context]. *Intellektualniye sistemy na transporte* [Intelligent systems for transport]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2015, pp. 177–184. (In Russian)

10. Kotenko A. G., Magomedov M. M., Groshev G. M. & Sugorovskiy A. V. Dispetcherskoye regulirovaniye na

sortirovochnoy stantsii [Train dispatching at the marshaling yard]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport], 2016, no. 2, pp. 47–54. (In Russian)

11. Borodin A. F. Kompleksniye resheniya problem razvitiya infrastruktury i perevozochnykh resursov [Comprehensive approach to problems of the development of infrastructure and transportation resources]. *Mir transporta* [The World of Transport], 2017, vol. 15, no. 1(68), pp. 6–17. (In Russian)

12. Kozlov P. A. *Teoreticheskiye osnovy, organizatsionniye formy, metody optimizatsii gibkoy tekhnologii transportnogo obsluzhivaniya zavodov chernoy metallurgii* [Theoretical foundations, organizational forms, optimization methods for flexible technology of transport service for iron and steel works]. Paper of Dr. Sci. in Engineering, speciality: 05.22.12. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., 1987, 46 p. (In Russian)

13. Dolgoruk D. S. & Kalikina T. N. Modelirovaniye prodvizheniya vagonopotokov po sortirovochnym stantsiyam [Modeling of car traffic volume movement along marshaling yards]. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona* [Transport of Asian-Pacific region], 2013, no. 1(1), pp. 81–84. (In Russian)

14. Groshev V. A. K voprosu modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov na stantsiyakh [Modeling of engineering processes at stations]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, vol. 16, iss. 1, pp. 87–94. (In Russian)

15. Efimenko Yu. I., Chetchuyev M. V., Filippov A. G. & Gubar M. V. Problemy optimizatsii etapnosti razvitiya stantsiy pry ispolzovanii alternativnykh variantov proektnykh resheniy [Optimization problems of stage-by-stage development of stations with alternative variants of design solutions]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, vol. 15, iss. 2, pp. 194–206. (In Russian)

16. Tepikin V. A., Kotenko A. G. & Rolle I. A. Sovershenstvovaniye sposobov rasformirovaniya sostavov s vagonamy, zapreshchennymy k rospusku [Improvements to splitting of unauthorized trains with cars]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya*

[*Proceedings of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, vol. 15, iss. 1, pp. 90–100. (In Russian)

17. Rybin P. K., Ershikov N. V., Komovkina N. S. & Putilina D. V. Analiz struktury poezdopotokov i vagonopotokov, postupayushchikh v adres rossiyskikh portov Finskogo zaliva [Structure analysis of train and car traffic volume entering the Russian ports of the Gulf of Finland]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, vol. 15, iss. 3, pp. 478–486. (In Russian)

18. Sergeyeva T. G. Sovershenstvovaniye upravleniya parkom privatnykh vagonov [Development of unofficial car fleet management]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 449–455. (In Russian)

19. Shabalin N. N. *Optimizatsiya protsessy pererabotki vagonov na stantsiyakh* [*Optimization of yard operation process at stations*]. Moscow, Transport Publ., 1973, 182 p. (In Russian)

20. Sotnikov E. A. & Shenfeld K. P. Neravnomernost gruzovykh perezovok v sovremennykh usloviyakh i eyo vliyaniye na potrebnuyu propusknuyu sposobnost uchastkov [Freight traffic irregularity in the present context and its influence on the required train-handling capacity of sections]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta transporta* [*Proceedings of Research and Development Institute of Railway Transport*], 2011, no. 5, pp. 3–9. (In Russian)

Received: April 17, 2020

Accepted: May 22, 2020

Author's information:

Alexey G. KOTENKO – D. Sci. in Engineering, Professor; kotenko@pgups.ru

Vladimir V. SOLYANIK – Graduate Student; mister.solianik@yandex.ru

УДК 625.143

Результаты исследования вибрации в зоне рельсового стыка при рельсовых скреплениях различной упругости

Н. Р. Мухаммадиев

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

Для цитирования: Мухаммадиев Н. Р. Результаты исследования вибрации в зоне рельсового стыка при рельсовых скреплениях различной упругости // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 407–415.
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-407-415

Аннотация

Цель: Повышение стабильности пути в стыковых уравнильных пролетах позволит поднять эффективность бесстыкового пути, что является актуальной задачей. **Методы:** Проведено исследование параметров колебательного процесса балласта в зоне рельсового стыка при различном количестве стандартных прокладок-амортизаторов и прокладок-амортизаторов повышенной упругости. **Результаты:** Анализ Фурье показал, что верхнее строение пути (или вертикальное отклонение) приводит к деформации при большей амплитуде смещения и резонирует на неровностях пути. **Практическая значимость:** Выявлены и проанализированы зависимости виброускорений в зоне рельсового стыка от величины жесткости прокладок-амортизаторов и их количества.

Ключевые слова: Верхнее строение пути, подрельсовые прокладки-амортизаторы, анализ Фурье, рельсовый стык, виброускорения, места временного восстановления, жесткость пути.

Введение

В соответствии с основными направлениями технического прогресса на железнодорожном транспорте на сети отечественных дорог широкое распространение получила конструкция бесстыкового пути на железобетонных шпалах, что позволило резко сократить количество болтовых рельсовых стыков и тем самым существенно улучшить работу пути. Вместе с тем в современной конструкции бесстыкового пути предусматриваются уравнильные пролеты, состоящие из 3–4 рельсов длиной 12,5 м. Как показывает опыт эксплуатации, эта зона, включающая 4–5 стыков на железобетонных шпалах, подвержена более интенсивным расстройкам, чем средняя часть плети, вследствие повышенного воздействия подвижного состава на путь в стыках [1].

В этой статье представлено полевое исследование характеристик затухания вибраций земляного полотна за счет применения подрельсовых прокладок. Полевые испытания нацелены на изучение смягчения ударов в зоне рельсовых стыков на смешанных участках движения поездов.

Балластная конструкция железнодорожного пути применяется для традиционных пригородных и городских железнодорожных сетей во всем мире [2]. Ее преимущества: низкие капитальные вложения, высокая устойчивость и ремонтпригодность, конструктивность, значительный уровень поглощения вибрации и т. д. Существуют две группы компонентов пути: верхнее строение пути (ВСП) и нижнее строение пути [3]. К верхнему строению относятся рельсы, шпалы, рельсовые скрепления, балластный слой (балластная призма); к нижнему – земляное полотно

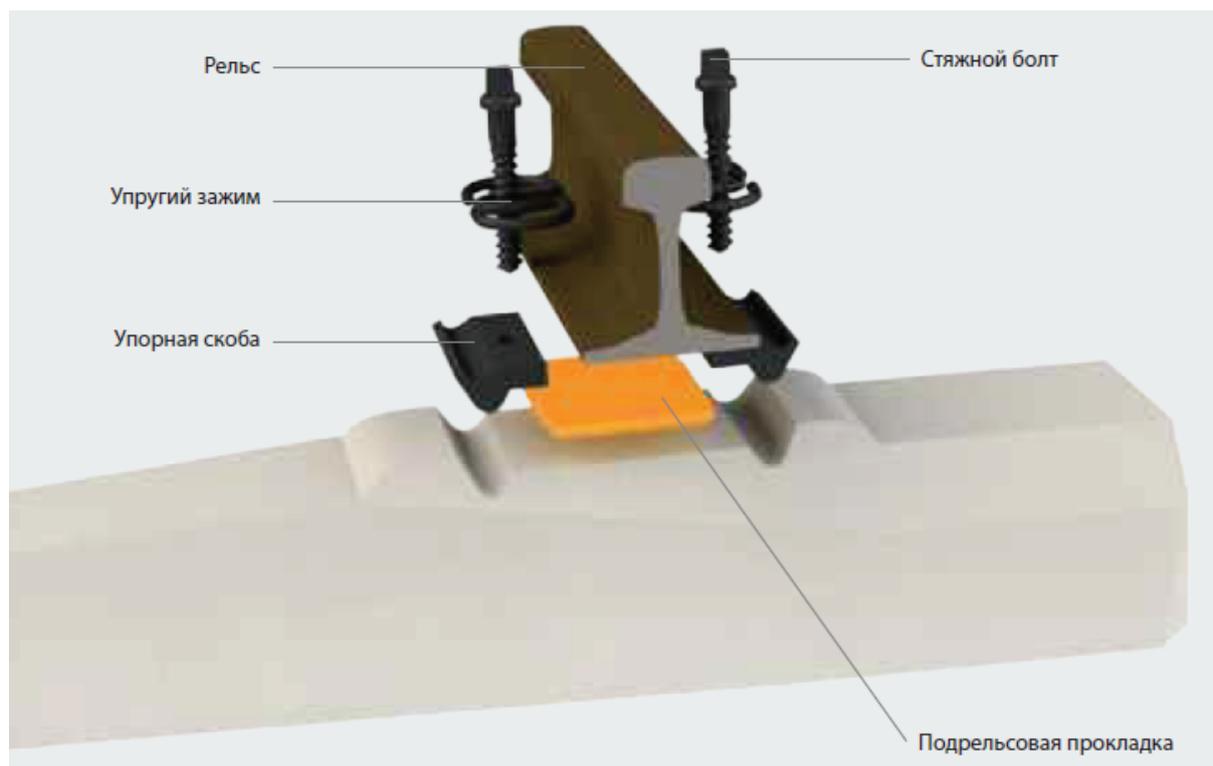


Рис. 1. Общий вид подрельсовой прокладки в рабочем состоянии

и искусственные сооружения (мосты, водопропускные трубы, путепроводы и т. д.).

В статье рассмотрена работа упругих подрельсовых прокладок производства компании Getzner. Они обладают заданной жесткостью и значительно улучшают упругие характеристики ВСП (рис. 1). Улучшенное распределение нагрузки повышает комфортабельность езды пассажиров и обеспечивает экономичность работы ВСП. Кроме того, повышенная амортизация оказывает положительное влияние на плавность движения подвижного состава [4].

К свойствам подрельсовых прокладок относятся:

- 1) высокая механическая прочность и оптимальная упругость;
- 2) значительная долговечность;
- 3) стандартные материалы с жесткостью от 30 до 200 кН/мм;
- 4) отличия по применению и геометрии;
- 5) удовлетворение всем критериям тестирования, изложенным в соответствующих стандартах [5].

Исследование направлено на рассмотрение использования подрельсовых прокладок для снижения вредных вибраций в зоне рельсового стыка. Оно включает в себя обзор стандартов и спецификаций, обзор литературы о работе подрельсовых прокладок в пути и данные измерений. Его результаты помогут следить за работой подрельсовых прокладок на железобетонных шпалах в местах возникновения вредных вибраций из-за неровности пути в стыках, уравнительных пролетов, местах временного восстановления плетей, в районе переездов, стрелочных переводов и т. д.

Динамические силы, возникающие в зоне рельсового стыка

Проблемы, связанные с динамическими ударными силами из-за отступления от норм содержания в зоне рельсового стыка (ступенька, зазор, слабая затяжка стыковых болтов), значительно

увеличивают объем работ по содержанию пути и становятся причиной снижения уровня безопасности движения и эксплуатационной надежности. Незапланированные ремонтные работы вызывают большие расходы, например, когда колесо, которое пересекает зону рельсового стыка, придаст существенные динамические переходные силы, как показано на рис. 2. Динамический объем, связанный со структурным повреждением, часто называют силой P_2 . Она должна быть сведена к минимуму или подавлена, чтобы продлить долговечность железнодорожного пути. В данном полевом исследовании подрельсовые прокладки были разработаны для погашения ударной вибрации в зоне рельсового стыка. Следует отметить, что срок службы подрельсовых прокладок – 10 лет. Эквивалентный угол наклона также может быть измерен и использован при определении P_2 .

Формула прогнозирования [4–11]

$$P_2 = P_0 + 2\alpha v \times \left[\frac{M_U}{M_U + M_T} \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 - \frac{\pi C_t}{\sqrt[4]{K_t(M_U + M_T)}} \right] \times [K_t M_U]^{\frac{1}{2}},$$

где P_0 – статическая сила на колесах автомобиля, кН; 2α – угол наклона, радиан; C_t – эквивалентное демпфирование пути, кНс/м; K_t – жесткость пути, МН/м; P_2 – динамическая вертикальная сила, кН; M_U – неподрессоренная масса кузова, кг; M_T – масса колесной пары, кг; v – скорость поезда, м/с.

Полевые испытания

Целью испытаний является оценка влияния жесткости и количества штатных и опытных прокладок-амортизаторов на уровень вибрации, передающийся на железнодорожный путь при проходе поездов в зоне рельсового стыка.

Характеристики стандартных прокладок ЦП-204-М-АРС (штатных: категория II, исполнение «Д», толщина – 14 мм, вес – 0,46 кг; рис. 3, табл. 1), по данным производителей, изложены в ТУ 2539-161-01124323–2003, которые отсутствуют в сети Интернет, и в ГОСТ Р 56291–2014, который в настоящее время признан недействующим. Действующий ГОСТ Р и результаты испытаний этих прокладок в сети Интернет найти не удалось. В недействующем ГОСТе приведены лишь диапазоны характеристик, которым должны удовлетворять прокладки ЦП-204-М-АРС. Наиболее важными среди них, на наш взгляд и с точки зрения данных исследований, являются: условная прочность при растяжении – не менее 10 МПа, относительное удлинение при разрыве – не менее 300%, статическая жесткость на сжатие в интервале нагрузок от 20 до 90 кН для подрельсовых прокладок в пределах – для прокладок номинальной толщиной более 11 мм – от 50 до 85 МН/м или кН/мм.

Характеристики прокладок повышенной упругости Sylodyn NF (опытных) вообще отсутствуют (рис. 4). Однако прокладки нарезаны из материала, характеристики которого удалось получить от производителя. Они приведены в табл. 2.

Для оценки вибрационного воздействия, возникающего в зоне рельсового стыка от проходя-

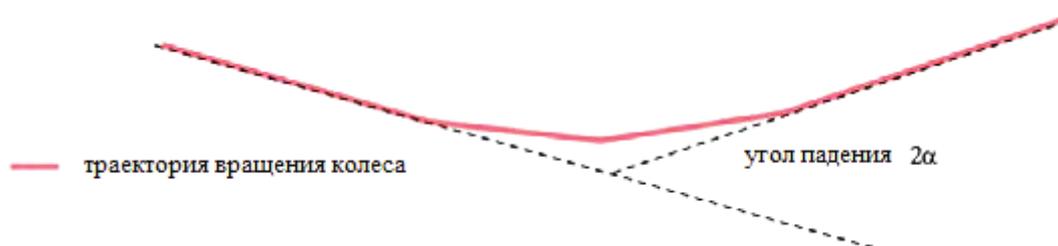


Рис. 2. Траектория колеса и рельса в зоне рельсового стыка



Рис. 3. Стандартная прокладка ЦП-204-М-АРС (штатная)

ТАБЛИЦА 1. Характеристика ВСП

Параметр	Единица измерения	Типовая конструкция пути на щебеночном балласте
Тип рельсов	–	Р65
Тип шпал	–	ШС-АРС
Толщина балласта под шпалой	м	0,4
Ширина колеи	мм	1523
Уровень	мм	0–3
Стыковой зазор	мм	12
Вертикальные и горизонтальные ступеньки в рельсовом стыке	мм	0
Усилие прижатия рельсов клеммой	кг	770–970

ших поездов, измерительные датчики устанавливались в месте передачи колебаний от шпалы на балласт, т. е. на поверхности балласта у торца шпалы и в подрельсовом сечении на глубине 40 см от подошвы шпалы (на основной площадке земляного полотна).

Схема размещения датчиков представлена на рис. 5 и 6.

В каждой точке измерений производилась фиксация колебаний, распространяющихся в трех направлениях: в вертикальной плоскости,

в горизонтальной поперек оси пути и в горизонтальной вдоль оси пути.

Сейсмоприемники устанавливались на выровненную площадку с точным соблюдением направлений измерения (вертикаль, горизонталь поперек и вдоль пути).

Для оценки влияния жесткости прокладки на уровень вибрации в зоне рельсового стыка проведены следующие циклы измерений:

1) со старыми стандартными прокладками (на основной площадке земляного полотна);

2) с тремя новыми стандартными прокладками с каждой стороны от рельсового стыка;

3) с пятью новыми стандартными прокладками с каждой стороны от рельсового стыка;

4) с семью новыми стандартными прокладками с каждой стороны от рельсового стыка;

5) с семью прокладками повышенной упругости с каждой стороны от рельсового стыка;

6) с пятью прокладками повышенной упругости с каждой стороны от рельсового стыка;

7) с тремя прокладками повышенной упругости с каждой стороны от рельсового стыка.



Рис. 4. Прокладка повышенной упругости Syldyn NF (опытная)

ТАБЛИЦА 2. Характеристики материала прокладок повышенной упругости Syldyn NF (опытных)

Цвет	Лиловый
Статическая область применения, Н/мм ²	1,500
Пиковые нагрузки, Н/мм ²	8,00
Фактор механических потерь	0,10
Эластичность по отскоку, %	70
Остаточная деформация при сжатии, %	< 5
Статический модуль упругости, Н/мм ²	11,95
Динамический модуль упругости, Н/мм ²	16,85
Статический модуль сдвига, Н/мм ²	0,80
Динамический модуль сдвига, Н/мм ²	1,18
Минимальное разрывное растягивающее напряжение, Н/мм ²	7,00
Минимальное удлинение при разрыве, %	500
Истирание, мм ³	90
Коэффициент трения (сталь)	≥ 0,7
Коэффициент трения (бетон)	≥ 0,7
Удельное объемное сопротивление, Ω · см	> 10 ¹¹
Теплопроводность, Вт/мК	0,150
Диапазон рабочих температур, °С	От –30 до 70
Пик температур, °С	120
Горючесть	Класс E/EN 13501-1

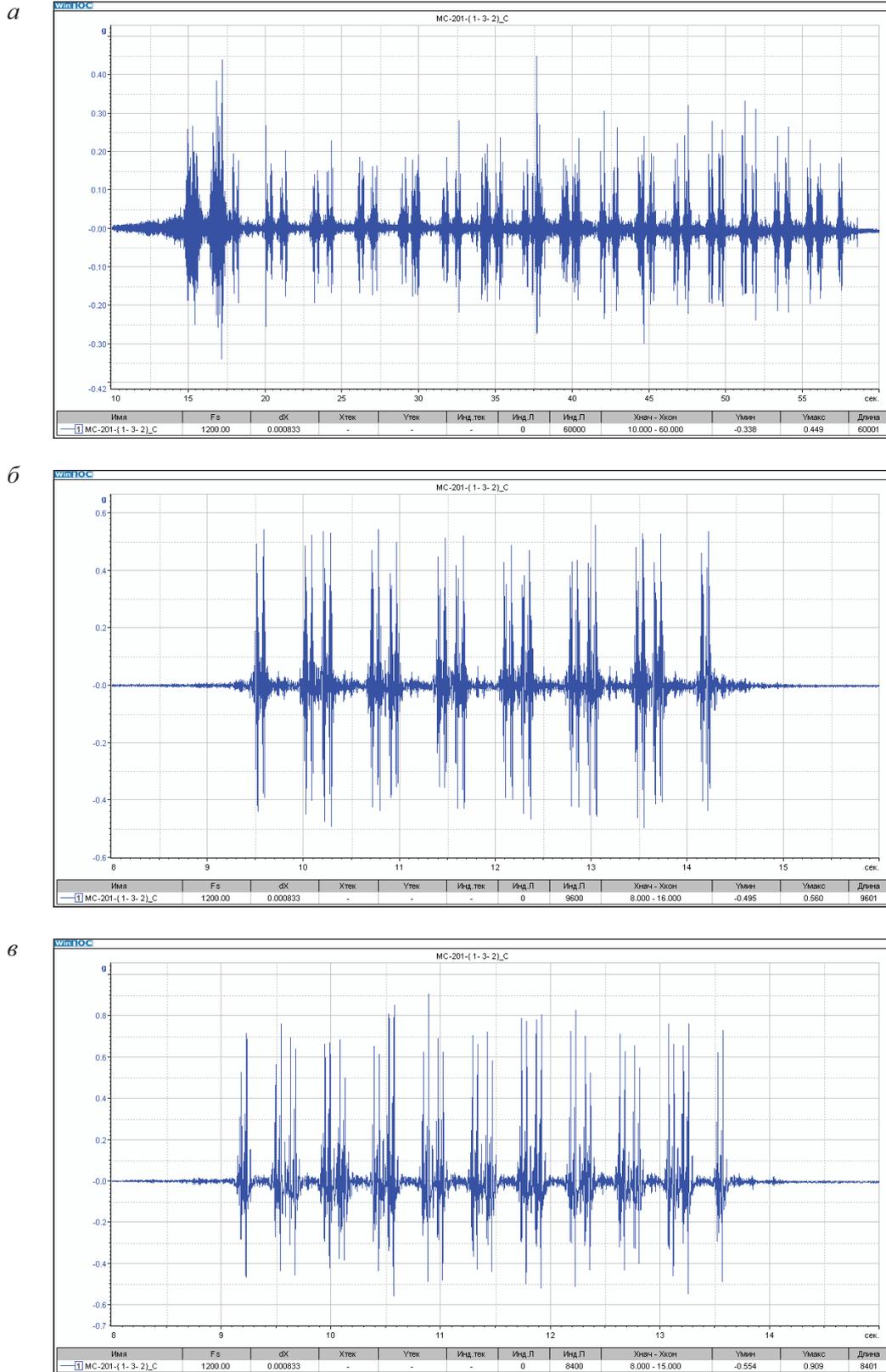


Рис. 7. График виброускорений основной площадки земляного полотна в зоне рельсового стыка при старых штатных прокладках-амортизаторах:
а – пассажирский поезд; *б* – «Ласточка»; *в* – «Сапсан»

– статистическая обработка результатов измерений производилась известными методами, основанными на теории математической статистики. В ходе статистической обработки определялись средняя величина виброускорений, измеренных в зоне рельсового стыка, среднеквадратическое отклонение от средней величины, максимально вероятное значение и коэффициент вариации. Уровень вероятности принимался равным 0,994.

По завершении испытаний построены графики изменения виброускорений в зависимости от типа подвижного состава, движущегося с различными скоростями и имеющими разную осевую нагрузку (рис. 7, а–в).

Проанализировав данные [8–10], нужно признать, что прокладка-амортизатор вносит свой вклад в распределение частот колебаний. Графики частоты виброускорений значительно отличаются друг от друга по своей плотности, форме и количеству диапазонов с максимальными амплитудами виброускорений.

Заключение

Подрельсовые прокладки, как правило, внедряются для улучшения устойчивости железнодорожного пути. Положительные результаты первых полевых испытаний в Европе мотивировали применение подрельсовых прокладок по всему миру. Важно отметить, что этот материал обычно используется для снижения жесткости пути в особых местах, таких как стрелочные переводы, места временного восстановления, железнодорожные переезды и для понижения вредных вибраций в зоне рельсового стыка. На основании исследований в результате регистрации вибрации было установлено, что подрельсовые прокладки привели к уменьшению вибрации в зоне рельсового стыка.

Дополнительное силовое и вибрационное воздействие на элементы пути в зоне рельсового стыка зависит от конструктивных параметров, в частности от величин стыкового зазора, ступеньки рельсов, затяжки стыковых болтов.

Библиографический список

1. Барабошин В. Ф. Повышение стабильности пути в зоне рельсового стыка / В. Ф. Барабошин, Н. И. Аманьев. – М. : Транспорт, 1978. – 43 с.
2. Remennikov A. M. A review on loading conditions for railway track structures due to wheel and rail vertical interactions / A. M. Remennikov, S. Kaewunruen // *Structural Control and Health Monitoring*. – 2008. – Vol. 15. – N 1. – P. 207–234.
3. Esveld C. *Modern railway track* / C. Esveld. – The Netherlands : MRT Press, 2001. – 632 p.
4. Indraratna B. *Advanced rail geotechnology-ballasted track* / B. Indraratna, W. Salim, C. Rujikiatkamjorn. – The Netherlands : CRC Press/Balkema, 2011. – Vol. 11. – N 10. – P. 201–205.
5. *Engineering a quiet future*. – URL : www.getzner.com (дата обращения : 10.03.2020 г.).
6. Kaewunruen S. Strategic framework to achieve carbon-efficient construction and maintenance of railway infrastructure systems / S. Kaewunruen, J. M. Sussman, H. H. Einstein // *Frontiers in Environmental Sciences*. – 2015. – N 3. – P. 1–4.
7. Asset Standards Authority. *Rolling Stock Access Integrity Standards, RSU 120. Track interface. Minimum Operating Standards for Rolling Stocks RSS001 General Interface Requirements, Engineering Standards and Services, Transport for NSW*. – Sydney, Australia, 2016.
8. Standards Australia, *Railway track material. Part 19 : Resilient fastening systems. Australian Standard : AS1085.19–2001*. – Sydney, Australia, 2001.
9. Standards Australia, *Railway track material. Part 14 : Prestressed concrete sleepers. Australian Standard : AS1085.14–2003*. – Sydney, Australia, 2003.
10. Asset Standards Authority, *ESC 210. Standard for track geometry and stability. Engineering Standards, Transport for NSW*. – Sydney, Australia, 2016.
11. Kaewunruen S. In situ monitoring of rail squats in three dimensions using ultrasonic technique / S. Kaewunruen, M. Ishida // *Experimental Techniques*. – 2016. – Vol. 40 (4). – P. 1179–1185. – DOI : 10.3389/fenvs.2015.00006

Дата поступления: 11.05.2020

Решение о публикации: 25.06.2020

Контактная информация:

МУХАММАДИЕВ Неъматжон Рахматович – аспирант; nemat.9108@mail.ru

Results of a study of vibration in the rail joint area with rail fasteners of different elasticity

N. R. Muhammadiyev

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

For citation: Muhammadiyev N. R. Results of a study of vibration in the rail joint area with rail fasteners of different elasticity. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 407–415. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-407-415

Summary

Objective: Increased track stability in expansion joint spans will increase the efficiency of the continuous track, which is a relevant today's objective. **Methods:** The bed oscillatory process parameters in the rail joint area with a different number of standard shock absorbers and shock absorbers of increased elasticity have been studied. **Results:** Fourier analysis showed that a track superstructure (or a vertical deflection) leads to deformation at a higher displacement amplitude and resonates at the track irregularities. **Practical importance:** Dependences of vibration accelerations in the rail joint area on the stiffness and number of shock absorbers have been revealed and analyzed.

Keywords: Track superstructure, rail shock pads, Fourier analysis, rail joint, vibration acceleration, temporary recovery sites, track stiffness.

References

1. Baraboshin V. F. & Anan'yev N. I. *Povysheniye stabil'nosti puti v zone rel'sovogo styka [Enhancing track stability in the rail joint area]*. Moscow, Transport Publ., 1978, 43 p. (In Russian)
2. Remennikov A. M. & Kaewunruen S. A review on loading conditions for railway track structures due to wheel and rail vertical interactions. *Structural Control and Health Monitoring*, 2008, vol. 15, no. 1, pp. 207–234.
3. Esveld C. *Modern railway track*. The Netherlands, MRT Press, 2001, 632 p.
4. Indraratna B., Salim W. & Rujikiatkamjorn C. Advanced rail geotechnology-ballasted track. The Netherlands, CRC Press/Balkema, 2011, vol. 11, no. 10, pp. 201–205.
5. *Engineering a quiet future*. Available at: www.getzner.com (accessed: March 10, 2020).
6. Kaewunruen S., Sussman J. M. & Einstein H. H. Strategic framework to achieve carbon-efficient construction and maintenance of railway infrastructure systems. *Frontiers in Environmental Sciences*, 2015, no. 3, pp. 1–4.
7. Asset Standards Authority. Rolling Stock Access Integrity Standards, RSU 120. *Track interface. Minimum Operating Standards for Rolling*. Stocks RSS0001 General Interface Requirements, Engineering Standards and Services, Transport for NSW. Sydney, Australia, 2016.
8. Standards Australia. *Railway track material. Part 19: Resilient fastening systems*. Australian Standard: AS1085.19-2001, Sydney, Australia, 2001.
9. Standards Australia. *Railway track material. Part 14: Prestressed concrete sleepers*. Australian Standard: AS1085.14-2003. Sydney, Australia, 2003.
10. Asset Standards Authority. ESC 210. *Standard for track geometry and stability*. Engineering Standards, Transport for NSW. Sydney, Australia, 2016.
11. Kaewunruen S. & Ishida M. In situ monitoring of rail squats in three dimensions using ultrasonic technique. *Experimental Techniques*, 2016, vol. 40 (4), pp. 1179–1185. DOI: 10.3389/fenvs.2015.00006

Received: May 11, 2020

Accepted: June 25, 2020

Author's information:

Nemat R. MUHAMMADIYEV – Postgraduate Student; nemat.9108@mail.ru

УДК 629.423.1

Компьютерная модель тягового трансформатора электровоза переменного тока серии «O'Z-ELR»

Т. М. Назирхонов, А. Я. Якушев

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

Для цитирования: Назирхонов Т. М., Якушев А. Я. Компьютерная модель тягового трансформатора электровоза переменного тока серии «O'Z-ELR» // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 416–427.

DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-416-427

Аннотация

Цель: Представить способ определения основных параметров и разработать компьютерную модель в среде MATLAB Simulink тягового трансформатора электроподвижного состава переменного тока типа JQFP-10160/25, применяемого на современных электровозах переменного тока серии «O'Z-ELR». Тяговый трансформатор является одним из важных элементов тягового привода, параметры которого существенно влияют на протекание электромагнитных процессов в тяговом преобразователе и тяговых двигателях в режимах тяги и рекуперативного торможения. **Методы:** Основные параметры обмоток тягового трансформатора для проведения моделирования находятся на основе паспортных данных, опытов холостого хода и короткого замыкания. Достоверность математической модели проверена путем сопоставления величин токов и напряжений, полученных при моделировании с расчетными величинами, определенными на основе опытов холостого хода и короткого замыкания тягового трансформатора. **Результаты:** Адекватность компьютерной имитационной модели тягового трансформатора электровоза подтверждается воспроизводимыми режимами холостого хода и короткого замыкания. Проведенное моделирование свидетельствует о том, что параметры компьютерной имитационной модели соответствуют характеристикам тягового трансформатора электровозов серии «O'Z-ELR». **Практическая значимость:** Разработанная математическая модель тягового трансформатора является составной частью комплексной имитационной модели тяговых преобразователей и асинхронной тягового привода электровоза. Компьютерная модель позволит воспроизвести электромагнитные процессы, близкие к реальным, протекающим в тяговом приводе электровоза переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения.

Ключевые слова: Тяговый трансформатор, тяговый электродвигатель, холостой ход, короткое замыкание, моделирование, электровоз, переменный ток.

Введение

В настоящее время железнодорожная компания АО «Узбекистон темир йуллари» – одна из главных энергопотребителей Республики Узбекистан. Она осуществляет около 80% грузоперевозок страны и является основным техноло-

гическим звеном ее топливно-энергетического комплекса в цепи производства, передачи и потребления энергии. При этом по удельному расходу энергоресурсов на единицу перевозочной работы железнодорожный транспорт – наиболее экономичный вид транспорта. Основной объем потребления приходится на электрическую тягу

поездов. Компанией разработана энергетическая стратегия развития железных дорог Узбекистана до 2030 г., в одном из пунктов которой намечено обновление подвижного состава и технических средств с продолжительными сроками службы новой техники, высокой производительностью и низкой ремонтностью. Начиная с 2008 г. АО «Узбекистон темир йуллари» закупает электровазы переменного тока серий «O'Z-EL» и «O'Z-ELR» с тяговыми преобразователями на базе IGBT-транзисторов и асинхронным тяговым электроприводом, микропроцессорным управлением, системой поосного регулирования силы тяги и торможения, модульной компоновкой электрооборудования [1–4].

В свете принятых решений существует актуальная проблема увеличения энергетической эффективности железнодорожного транспорта, связанная с повышением эксплуатационных энергетических показателей электрического подвижного состава (ЭПС). Важным шагом в этом направлении является проведение исследований с использованием компьютерных имитационных моделей, позволяющих воспроизводить электромагнитные процессы в тяговом электроприводе и преобразователях, адекватные реальным условиям применения на ЭПС преобразователей с различными алгоритмами управления в режимах тяги и рекуперативного торможения, а также выполнять функции обработки полученных результатов моделирования.

Энергопотребление ЭПС в эксплуатационных режимах регистрируется штатными измерительными приборами – счетчиками электроэнергии. Составляющие расхода и потерь электроэнергии при работе ЭПС можно учесть только аналитическими методами и с помощью компьютерного моделирования. Для проведения анализа энергобаланса необходимо определить параметры, а также энергетические показатели преобразователей и агрегатов тягового электропривода. Правильный выбор параметров и характеристик тягового трансформатора существенно влияет на адекватность воспроизведения с использованием компьютерной модели электромагнитных процессов в силовых цепях ЭПС.

Расчет параметров тягового трансформатора JQFP-10160/25 электровазы переменного тока серии «O'Z-ELR»

Современные электровазы переменного тока серии «O'Z-EL» и «O'Z-ELR» оборудованы однофазными тяговыми трансформаторами модели JQFP-10160/25. Конфигурация обмоток трансформатора показана на рис. 1. Определение параметров обмоток тягового трансформатора JQFP-10160/25 производится на осно-

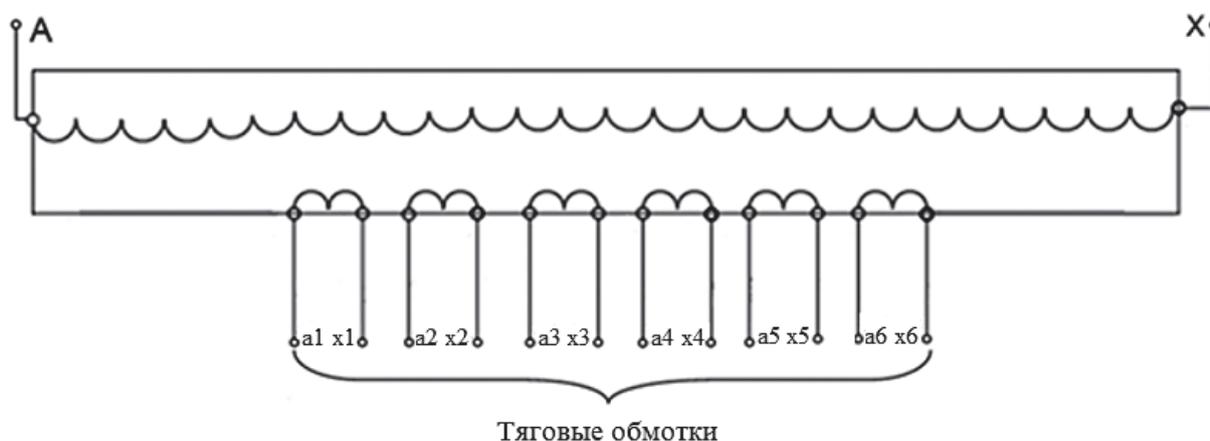


Рис. 1. Схема обмоток тягового трансформатора JQFP-10160/25

ТАБЛИЦА 1. Паспортные данные трансформатора JQFP-10160/25

Физические величины трансформатора	Величина параметра
Частота питающей сети, Гц	50
Номинальная мощность сетевой обмотки, кВ·А	9006
Номинальное напряжение сетевой обмотки, кВ	25
Номинальный ток сетевой обмотки, А	360
Ток холостого хода при напряжении 25 кВ, %	1,0
Номинальное напряжение тяговых обмоток а1–х1, ..., а6–х6, В	1450
Коэффициент трансформации	17,24
Номинальный ток тяговых обмоток а1–х1, ..., а6–х6, А	965
Номинальная мощность тяговых обмоток, кВ·А	1400×6
Напряжение короткого замыкания (к. з. обмоток а1–х1, ..., а6–х6), %	49
Мощность потерь номинального режима трансформатора, кВт	243

вании паспортных данных, опытов холостого хода и короткого замыкания, приведенных в табл. 1 [4].

Полное сопротивление короткого замыкания трансформатора (Ом) рассчитывается по формуле

$$Z_k = \frac{\bar{U}_{1k} \cdot U_{1H} \cdot K_T}{I_{2H} \cdot n},$$

в которой \bar{U}_{1k} – напряжение короткого замыкания, %, U_{1H} – номинальное напряжение первичной (сетевой) обмотки трансформатора, кВт; K_T – коэффициент трансформации, равный $K_T = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}$; n – число тяговых обмоток; I_{2H} – номинальный ток вторичной (тяговой) обмотки трансформатора, А [5].

Мощность потерь короткого замыкания ΔP_k (кВт), расходуемая на нагревание обмоток трансформатора, равна

$$\Delta P_k = r_k \frac{n^2 I_{2H}^2}{K_T^2},$$

здесь r_k – это активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к первичной обмотке.

Потери в стали магнитопровода трансформатора в номинальном режиме определяются следующим образом:

$$\Delta P_c = \Delta P_H - \Delta P_k,$$

где ΔP_H – потери мощности в номинальном режиме трансформатора.

Трансформатор функционирует с максимальным коэффициентом полезного действия при нагрузке, равной $\frac{3}{4}$ номинальной. В этом случае потери переменные (в меди) равны потерям постоянным (в стали):

$$\Delta P_k \left(\frac{3}{4} \right)^2 = \Delta P_c.$$

Отсюда потери в меди для режима короткого замыкания трансформатора (кВт) составляют

$$\Delta P_k = \frac{\Delta P_H}{1 + \left(\frac{3}{4} \right)^2}.$$

Активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к первичной обмотке (Ом), равно

$$r_k = \frac{\Delta P_k \cdot 10^3}{n^2 I_{2H}^2} K_T^2,$$

индуктивное сопротивление обмоток трансформатора, обусловленное магнитными потоками рассеяния (Ом):

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}.$$

Индуктивное сопротивление первичной обмотки трансформатора, зависимое от магнитных потоков рассеяния, определяется на основании приведения всех тяговых обмоток к одной эквивалентной и допущения равенства магнитных потоков рассеяния первичной и вторичных обмоток (Ом):

$$X_{1\sigma} = \frac{1}{2} \cdot X_k,$$

индуктивное сопротивление эквивалентной вторичной обмотки рассеяния с учетом принятого допущения (Ом)

$$X_{2\sigma} = \frac{1}{2} \cdot \frac{X_k}{K_T^2}.$$

Индуктивность рассеяния первичной (сетевой) обмотки (Гн) находим следующим образом:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_c},$$

где f_c – частота напряжения тяговой сети (Гц) [6].

Индуктивность рассеяния каждой вторичной (тяговой) обмотки трансформатора, (a1–x1, ..., a6–x6) (Гн),

$$L_{2\sigma} = n \frac{X_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_c}.$$

Активное сопротивление первичной (сетевой) обмотки трансформатора определяется на основании допущения равенства потерь в первичной и вторичных обмотках так:

$$r_1 = \frac{r_k}{2},$$

активное сопротивление каждой вторичной (тяговой) обмотки, (a1–x1, ..., a6–x6) (Ом),

$$r_2 = \frac{r_k}{2 \cdot K_T^2} \cdot n.$$

Полное сопротивление магнитной цепи трансформатора (Ом) вычисляется по формуле

$$Z_m = \frac{U_{1H}}{I_{10}},$$

где I_{10} – ток холостого хода трансформатора.

Активная составляющая тока холостого хода трансформатора определяется на основании потерь в стали трансформатора, равных разности полных потерь и потерь короткого замыкания (А):

$$I_{mA} = \frac{\Delta P_H - \Delta P_k}{U_{1H}},$$

активное сопротивление магнитной цепи (Ом)

$$R_m = \frac{U_{1H}}{I_{mA}}.$$

Ток намагничивания магнитной цепи трансформатора (А)

$$I_m = \sqrt{I_0^2 - I_{mA}^2}.$$

Индуктивное сопротивление магнитной цепи (Ом)

$$X_m = \frac{U_{1H}}{I_m}.$$

Индуктивность магнитной цепи трансформатора (Гн)

$$L_m = \frac{X_m}{2 \cdot \pi \cdot f_c}.$$

Результаты расчета параметров обмоток тягового трансформатора JQFP-10160/25 систематизированы в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Расчетные параметры и основные электротехнические величины трансформатора JQFP-10160/25

Параметры и данные	Обозначение	Значение
Полное сопротивление короткого замыкания обмоток, Ом	Z_k	36,47
Потери короткого замыкания, кВт	ΔP_k	155,5
Активное сопротивление обмоток, приведенное к первичной обмотке трансформатора, Ом	r_k	1,38
Индуктивное сопротивление, обусловленное магнитными потоками рассеяния, приведенное к первичной обмотке трансформатора, Ом	X_k	36,37
Индуктивное сопротивление первичной обмотки, Ом	$X_{1\sigma}$	18,19
Индуктивное сопротивление вторичной (тяговой) обмотки, а1–x1, ..., а6–x6, Ом	$X_{2\sigma}$	0,37
Индуктивность рассеяния первичной обмотки, Гн	$L_{1\sigma}$	0,058
Индуктивность рассеяния вторичной обмотки трансформатора, Гн	$L_{2\sigma}$	0,00118
Сопротивление первичной обмотки, Ом	r_1	0,69
Сопротивление вторичной обмотки, Ом	r_2	0,014
Полное сопротивление магнитной цепи, Ом	Z_m	6950
Активное сопротивление магнитной цепи, Ом	R_m	8060
Индуктивное сопротивление магнитной цепи, Ом	X_m	13 900
Индуктивность магнитной цепи трансформатора, Гн	L_m	44
Активная составляющая тока холостого хода трансформатора, А	I_{mA}	3,1
Ток намагничивания магнитной цепи трансформатора, А	I_m	1,8

Компьютерная имитационная модель тягового трансформатора

Компьютерная модель тягового трансформатора на основе функционального блока библиотеки Simulink – Multi-Winding Transformer, показанного на рис. 2, характеризуется следующими параметрами:

- номинальная мощность сетевой обмотки, $S_1 = nS_{2H} \cdot 10^3$, В·А;
- частота напряжения тяговой сети, f_c , Гц;
- номинальное напряжение сетевой обмотки, U_{1H} , В;
- номинальное напряжение тяговых обмоток, $U_{21H}, U_{22H}, \dots, U_{26H}$, В;
- активное сопротивление сетевой обмотки, r_1 , Ом;

– активное сопротивление вторичных обмоток, $r_{21}, r_{22}, \dots, r_{26}$, Ом;

– индуктивность рассеяния первичной обмотки, $L_{1\sigma}$, Гн;

– индуктивность рассеяния вторичных обмоток, $L_{21\sigma}, L_{22\sigma}, \dots, L_{26\sigma}$, Гн;

– индуктивность цепи намагничивания, L_m , Гн;

– активное сопротивление цепи намагничивания, R_m , Ом.

Параметры компьютерной модели тягового трансформатора JQFP-10160/25, определенные на основе опытов холостого хода и короткого замыкания с использованием паспортных данных трансформатора, приведены в табл. 2 [7, 8].

Блок-схема компьютерной модели тягового трансформатора электровоза переменного тока,

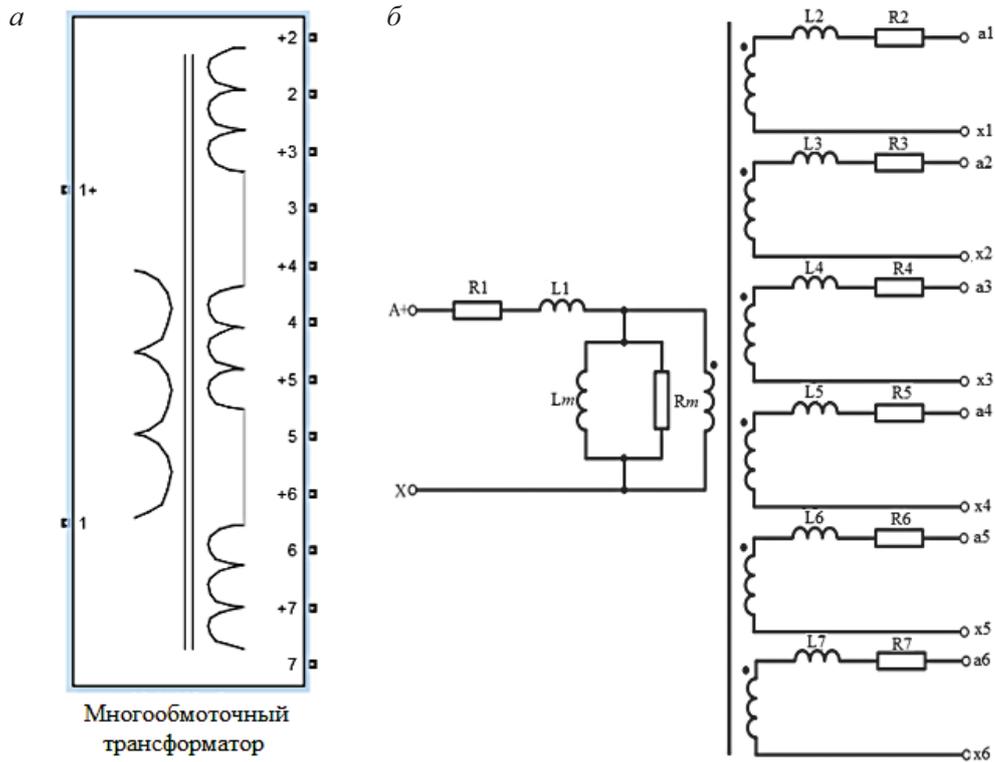


Рис. 2. Пиктограмма (а) и схемное исполнение модели многообмоточного трансформатора электровоза (б) в библиотеке Simulink

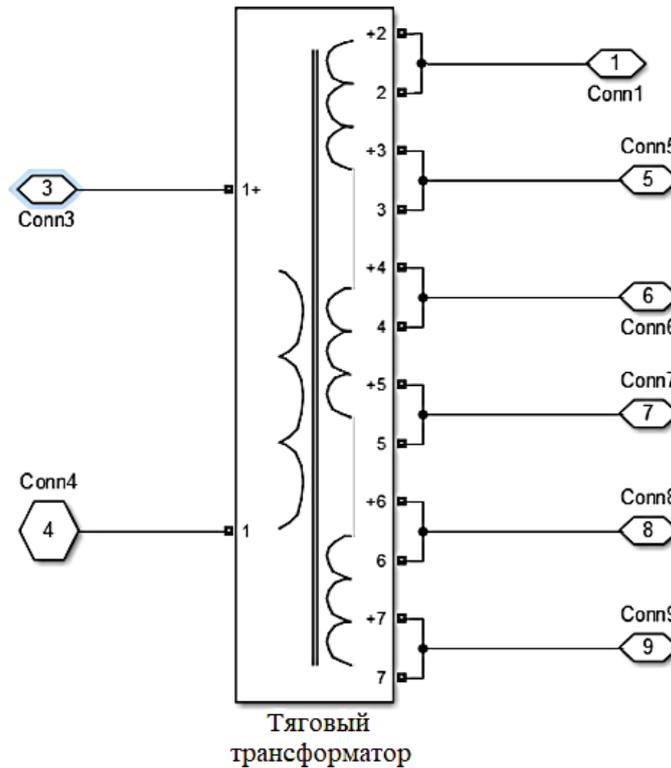


Рис. 3. Блок-схема тягового трансформатора электровоза переменного тока «O'Z-ELR» в редакторе Simulink

полученная в редакторе Simulink, изображена на рис. 3. Адекватность этой модели оценивается на основании моделирования режимов холостого хода и короткого замыкания всех тяговых обмоток. На рис. 4 показаны диаграммы опыта холостого хода, на рис. 5 – моделирования короткого замыкания тягового трансформатора [8].

При моделировании опыта холостого хода на первичную обмотку подано номинальное напряжение, амплитудное значение которого равно

$$U_{1m} = 25000 \cdot \sqrt{2} = 35250 \text{ В.}$$

Амплитудное значение напряжения тяговой обмотки компьютерной модели трансформатора в режиме холостого хода

$$U_{2m} = 2043 \text{ В.}$$

Относительная погрешность напряжения тяговой обмотки компьютерной модели трансформатора

$$\begin{aligned} & \frac{U_{2н} \cdot \sqrt{2} - U_{2m}}{U_{2н} \cdot \sqrt{2}} \cdot 100 = \\ & = \frac{1450 \cdot \sqrt{2} - 2043}{1450 \cdot \sqrt{2}} \cdot 100 \approx 0,1 \%. \end{aligned}$$

Амплитудное значение тока холостого хода сетевой обмотки компьютерной модели трансформатора

$$I_{10m} = 4,9 \text{ А.}$$

Относительная погрешность тока холостого хода первичной обмотки компьютерной модели трансформатора

$$\begin{aligned} & \frac{0,01 \cdot I_{1н} \cdot \sqrt{2} - I_{10m}}{0,01 \cdot I_{1н} \cdot \sqrt{2}} \cdot 100 = \\ & = \frac{0,01 \cdot 360 \cdot \sqrt{2} - 4,9}{0,01 \cdot 360 \cdot \sqrt{2}} \cdot 100 \approx 3,75 \%. \end{aligned}$$

Характеристика намагничивания типовой компьютерной модели трансформатора Multi-

Winding Transformer линейна, без насыщения, поэтому ток холостого хода, полученный в этой модели, имеет синусоидальную форму без искажений, характерных для тока холостого хода реального трансформатора [9, 10].

При моделировании опыта короткого замыкания на первичную обмотку подано расчетное напряжение, амплитудное значение которого равно

$$\begin{aligned} U_{1кзм} &= \frac{U_{к}}{100} \cdot U_{1н} \cdot \sqrt{2} = \\ &= \frac{49}{100} \cdot 25000 \cdot \sqrt{2} = 17272 \text{ В.} \end{aligned}$$

Амплитудное значение тока сетевой обмотки компьютерной модели трансформатора

$$I_{1кз.м} = 472 \text{ А.}$$

Относительная погрешность тока сетевой обмотки компьютерной модели трансформатора

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{nI_{2н}}{K_{т}} \cdot \sqrt{2} - I_{1кз.м}}{\frac{nI_{2н}}{K_{т}} \cdot \sqrt{2}} \cdot 100 = \\ & = \frac{\frac{6 \times 965}{17,24} \cdot \sqrt{2} - 472}{\frac{6 \times 965}{17,24} \cdot \sqrt{2}} \cdot 100 = 0,4 \%. \end{aligned}$$

Амплитудное значение тока тяговой обмотки компьютерной модели трансформатора в режиме короткого замыкания

$$I_{2кз.м} = 1356 \text{ А.}$$

Относительная погрешность тока тяговой обмотки компьютерной модели трансформатора

$$\begin{aligned} & \frac{I_{2н} \cdot \sqrt{2} - I_{2кз.м}}{I_{2н} \cdot \sqrt{2}} \cdot 100 = \\ & = \frac{965 \cdot \sqrt{2} - 1356}{965 \cdot \sqrt{2}} \cdot 100 \approx 0,35 \%. \end{aligned}$$

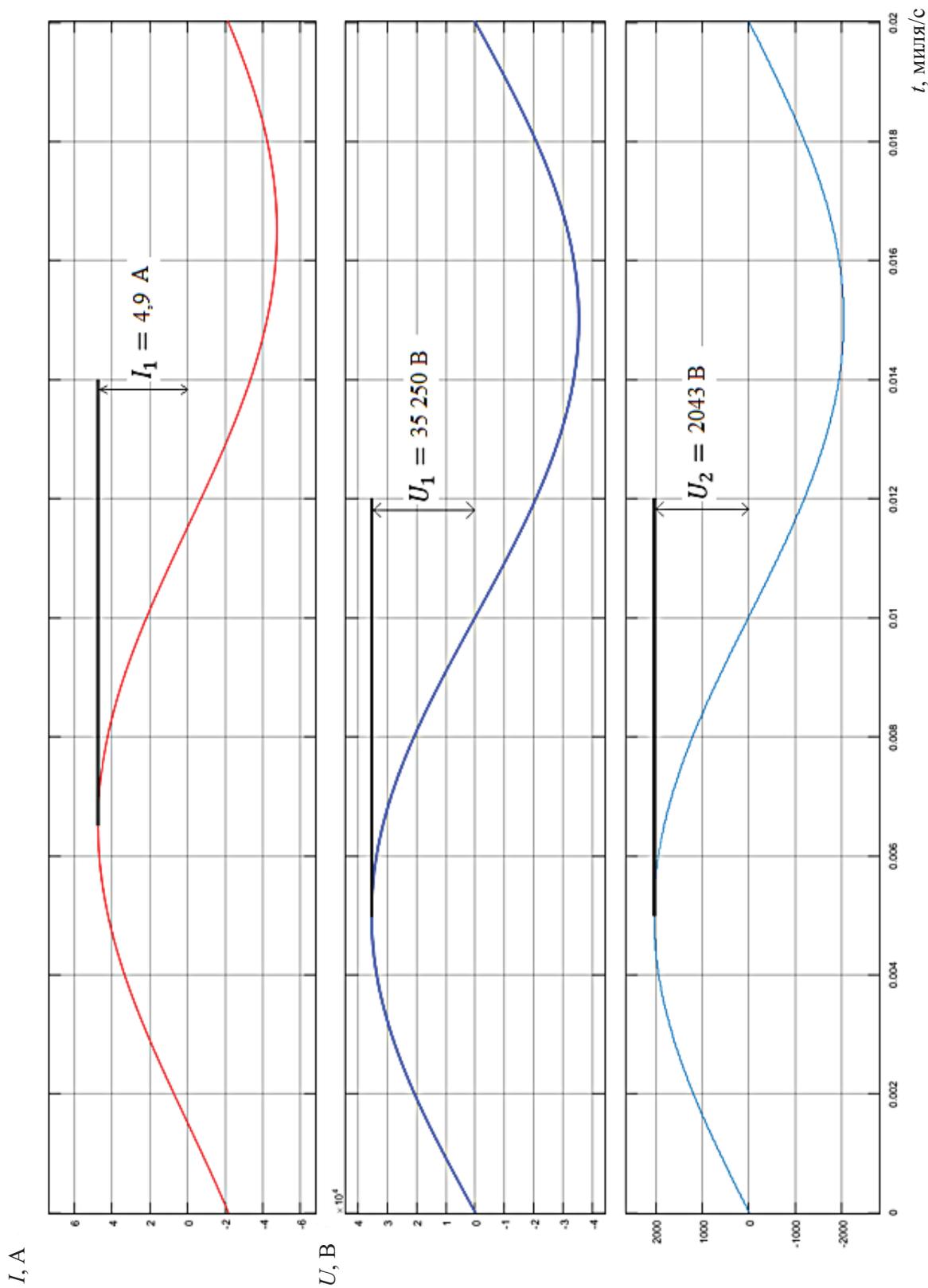


Рис. 4. Моделирование опыта холостого хода тягового трансформатора: U_1 – напряжение и I_1 – ток первичной обмотки трансформатора при холостом ходе, U_2 – напряжение тяговой обмотки

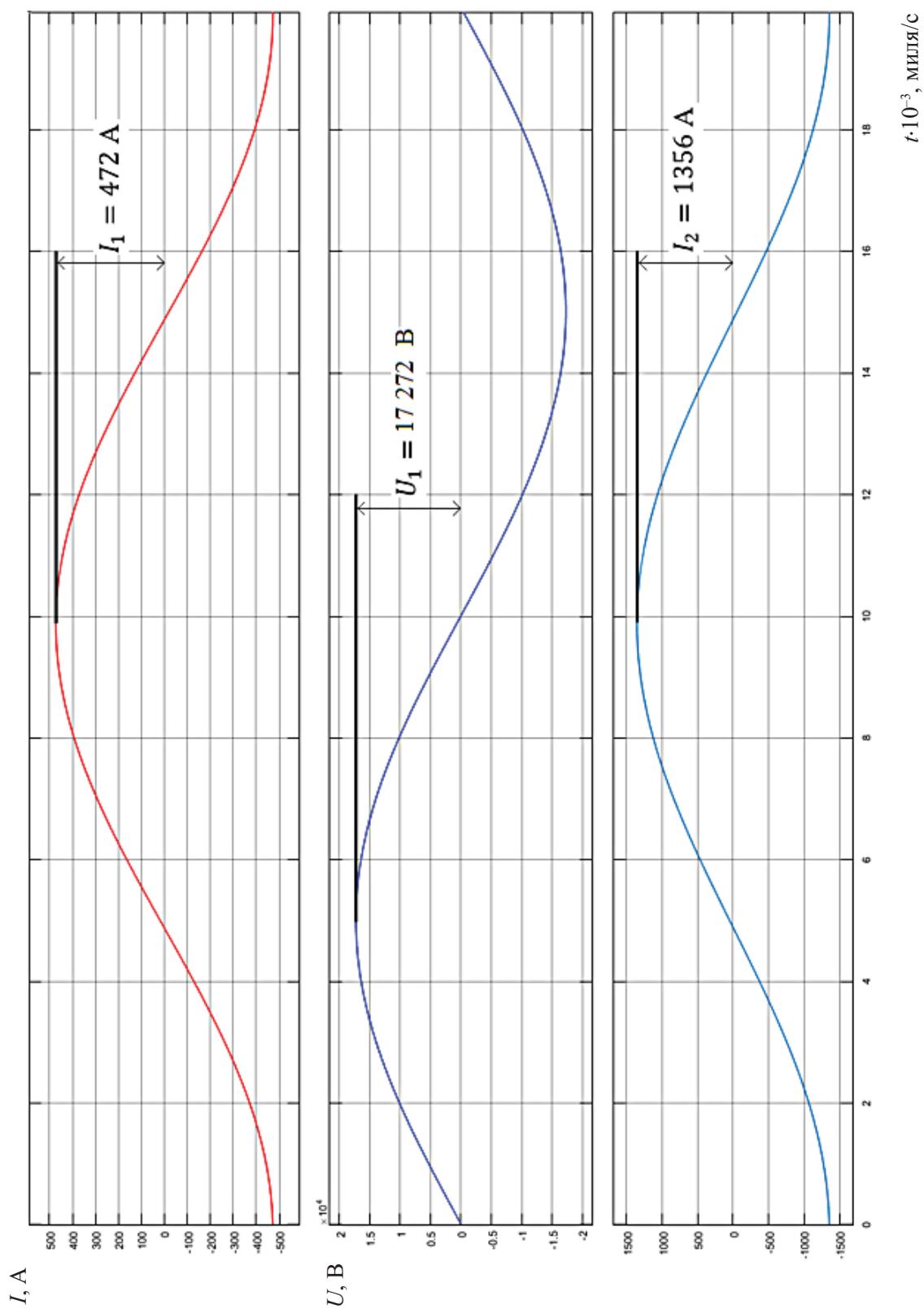


Рис. 5. Моделирование короткого замыкания тягового трансформатора: U_1 – напряжение, I_1 и I_2 – ток первичной и вторичной обмотки трансформатора

Заключение

Полученные результаты моделирования опытов холостого хода и короткого замыкания тягового трансформатора подтверждают адекватность компьютерной модели реальному тяговому трансформатору. Рассчитанные параметры тягового трансформатора позволяют воспроизводить электромагнитные процессы, протекающие в тяговом приводе электровоза серии «O'Z-ELR» переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения, близкие к реальным.

Библиографический список

1. Викулов И. П. Сравнительный анализ технических характеристик электровозов серий «O'Z-ELR» и «O'zbekiston» / И. П. Викулов, Т. М. Назирхонов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2019. – Т. 16. – Вып. 1. – С. 68–76.
2. Назирхонов Т. М. Имитационная модель $4q-s$ преобразователя электровоза переменного тока с асинхронным тяговым двигателем серии «O'Z-ELR» / Т. М. Назирхонов // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте. – Ташкент : Ташкент. ин-т инженеров ж.-д. транспорта, 2019. – С. 52–54.
3. Мощный электрический локомотив с приводом переменного тока типа СКЕ2: руководство машиниста по эксплуатации. – Ташкент : Ташкент. ин-т инженеров ж.-д. транспорта, 2014. – 120 с.
4. Якушев А. Я. Определение основных параметров асинхронного тягового электродвигателя / А. Я. Яку-

шев, Т. М. Назирхонов, И. П. Викулов, К. В. Марков // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2019. – Т. 16. – Вып. 4. – С. 25–34.

5. Михеев Г. М. Методы определения индуктивности рассеяния обмоток силового трансформатора / Г. М. Михеев, В. М. Шевцов, Т. Г. Иванова // Вестн. Чуваш. ун-та. – 2009. – Вып. 2. – С. 45–52.

6. Вопросы теории и расчета трансформаторов / под ред. С. Б. Васютинского. – Л. : Энергия, 1970. – 432 с.

7. Трансформатор тяговый однофазный типа ОДЦЭ-2000/25 Б-У1 : руководство по эксплуатации 1ВП.713.004РЭ. – Киев : ПАО «Укрэлектрораппарат», 2005. – 34 с.

8. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.

9. Плакс А. В. Новый пассажирский электровоз серии «O'Z-Y» / А. В. Плакс, Д. О. Раджибаев, Х. М. Турсунов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 1. – С. 237–240.

10. Бердиев У. Т. Эксплуатация и ремонт электровозов «O'zbekiston» и «O'Z-Y» / У. Т. Бердиев, И. С. Камалов, У. Ш. Исроилов, Д. О. Раджибаев. – Ташкент : МСГНЖ ADAD PLYUS, 2016. – 286 с.

Дата поступления: 26.03.2020

Решение о публикации: 13.05.2020

Контактная информация:

НАЗИРХОНОВ Тулаган Мансурхон угли – аспирант; tolagan@mail.ru

ЯКУШЕВ Алексей Яковлевич – канд. техн. наук, доцент; el_tyaga@mail.ru

Computer model of a traction transformer of O'Z-ELR series alternating current electric locomotive

T. M. Nazirkhonov, A. Ya. Yakushev

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

For citation: Nazirkhonov T. M., Yakushev A. Ya. Computer model of a traction transformer of O'Z-ELR series alternating current electric locomotive. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 416–427. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-416-427

Summary

Objective: To present a method for determining the main parameters and – using the MATLAB Simulink environment – to develop a computer model of a traction transformer of an alternating current electric rolling stock JQFP-10160/25. A traction transformer is one of the critical elements of a traction drive, the parameters of which significantly influence the electromagnetic processes in a traction converter and traction motors in traction and regenerative braking modes. This article discusses modern O'Z-ELR series AC electric locomotives. The adequacy of the computer simulation model of the electric locomotive traction transformer is confirmed by reproducible idle and short-circuit modes. **Methods:** The main parameters of the traction transformer windings for modeling are based on the manufacturer's certificate data, idle and short circuit tests. The mathematical model reliability was verified by comparing the values of currents and voltages obtained during the simulation with the calculated values based of the idle and short-circuit tests of the traction transformer. **Results:** The simulation carried out shows that the computer simulation model parameters correspond to the characteristics of the O'Z-ELR series electric locomotive traction transformer. **Practical importance:** The developed mathematical model of traction converters is part of an integrated simulation model of traction converters and an asynchronous traction drive of an electric locomotive. The computer model will make it possible to reproduce almost real-life electromagnetic processes occurring in a traction drive of an AC electric locomotive during traction and regenerative braking.

Keywords: Traction transformer, traction electric motor, idle run, short circuit, simulation, electric locomotive, alternating current.

References

1. Vikulov I. P. & Nazirkhonov T. M. Sravnitel'nyy analiz tekhnicheskikh kharakteristik elektrovozov seriy "O'Z-ELR" i "O'zbekiston" [A comparative analysis of the technical parameters of the O'Z-ELR and O'zbekiston series electric locomotives]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, vol. 16, iss. 1, pp. 68–76. (In Russian)

2. Nazirkhonov T. M. Imitatsionnaya model' 4q-s preobrazovatelya elektrovoza peremennogo toka s asinkhronnym tyagovym dvigatelem serii "O'Z-ELR" [Simulation model of 4q-s AC electric locomotive con-

verter with O'Z-ELR asynchronous traction motor]. *Resursosberegayushchiye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte* [Resource-saving technologies in railway transport]. Tashkent, Tashkent Institute of Railway Engineers Publ., 2019, pp. 52–54. (In Russian)

3. *Moshchnyy elektricheskiy lokomotiv s privodom peremennogo toka tipa CKE2*. Rukovodstvo mashinista po ekspluatatsii [Powerful electric locomotive with AC drive type CKE2. Operator's manual]. Tashkent, Tashkent Institute of Railway Engineers Publ., 2014, 120 p. (In Russian)

4. Yakushev A. Ya., Nazirkhonov T. M., Vikulov I. P. & Markov K. V. Opredeleniye osnovnykh parametrov asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya [Determi-

nation of the main parameters of an asynchronous traction electric motor]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 25–34. (In Russian)

5. Mikheyev G. M., Shevtsov V. M. & Ivanova T. G. Metody opredeleniya induktivnosti rasseyaniya obmotok silovogo transformatora [Methods for determining the leakage inductance of power transformer windings]. *Vestnik Chuvachkogo universiteta [Chuvash University Bulletin]*, 2009, iss. 2, pp. 45–52. (In Russian)

6. *Voprosy teorii i rascheta transformatorov [Problems of theory and design of transformers]*. Edited by S. B. Vasyutinskiy. Leningrad, Energiya Publ., 1970, 432 p. (In Russian)

7. *Transformator tyagovyy odnofaznyy tipa ОДЦЭ-2000/25Б-У1. Rukovodstvo po ekspluatatsii 1ВП.713.004РЭ [Single-phase traction transformer ODTsE-2000/25B-U1. Operating manual 1VP.713.004 RE]*. Kiev, PJSC Ukrelektroapparat Publ., 2005, 34 p. (In Russian)

8. Chernykh I. V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink*

[*Simulation of electromechanical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink*]. Moscow, DMK Press, St. Petersburg, Piter Publ., 2008, 288 p. (In Russian)

9. Plaks A. V., Radzhibayev D. O. & Tursunov Kh. M. Novyy passazhirskiy elektrovoz serii O'Z-Y [New passenger electric locomotive of the O'Z-Y series]. *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka [Scientific Problems of Transport of Siberia and the Far East]*, 2011, no. 1, pp. 237–240. (In Russian)

10. Berdiyev U. T., Kamalov I. S., Isroilov U. Sh. & Radzhibayev D. O. *Ekspluatatsiya i remont elektrovozov "O'zbekiston" i "O'Z-Y" [Operation and repair of O'zbekiston and O'Z-Y electric locomotives]*. Tashkent, MCHJ ADAD PLYUS Publ., 2016, 286 p. (In Russian)

Received: March 26, 2020

Accepted: May 13, 2020

Author's information:

Tulagan M. ugli NAZIRKHONOV – Postgraduate Student; tolagan@mail.ru

Aleksey Ya. YAKUSHEV – PhD in Engineering, Associate Professor; el_tyaga@mail.ru

УДК 625.033.34

Повышение конкурентоспособности транспортно-логистических компаний в условиях цифровизации

Т. Г. Сергеева, Г. И. Никифорова

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

Для цитирования: Сергеева Т. Г., Никифорова Г. И. Повышение конкурентоспособности транспортно-логистических компаний в условиях цифровизации // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 428–436. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-428-436

Аннотация

Цель: Оценить информационную составляющую логистического процесса с участием железнодорожного транспорта; показать уровень развития и пути совершенствования информационного взаимодействия всех участников перевозок, основываясь на базовом едином сетевом технологическом процессе железнодорожных перевозок (ЕСТП); изучить влияние операторских компаний на железнодорожные перевозки, описать и рассчитать уровень конкуренции на рынке оперирования вагонным парком и исследовать наиболее значимые и доходные перевозки. **Методы:** Применялись анализ информационных технологий в логистических процессах с участием железнодорожного транспорта; моделирование информационного и технологического взаимодействия участников перевозок на основе ЕСТП. Проводилась систематизация операторских компаний железнодорожного подвижного состава. **Результаты:** Установлена необходимость использования логистического аутсорсинга, выработки базы и дополнительных параметров взаимодействия участников перевозочного процесса, рассчитан уровень конкуренции в сфере оперирования железнодорожным подвижным составом, определен наиболее доходный сектор рынка железнодорожных перевозок. **Практическая значимость:** Показана необходимость создания параметров информационного взаимодействия на базе ЕСТП. Проведенная классификация операторов железнодорожного подвижного состава позволила выявить наиболее доходный сектор рынка железнодорожных перевозок. Анализ количества операторских компаний и объемов их работы охарактеризовал монополистическую конкуренцию в сфере оперирования железнодорожным подвижным составом. Повышение качества транспортно-логистических услуг в области грузовых перевозок дает возможность выйти отечественной транспортной отрасли на более высокий уровень, делает транспортную сферу Российской Федерации конкурентоспособной, что положительно отразится на экономических показателях.

Ключевые слова: Логистика, аутсорсинг, оператор подвижного состава, логистический провайдер, индекс Герфиндаля, единый сетевой технологический процесс.

Несмотря на развивающийся в мире экономический кризис, до 2030 г. ожидается значительный рост рынка аутсорсинговой логистики. Приобретение логистических услуг у специализированных компаний, передача им транспортно-логистической составляющей производственного процесса позволит сегменту аутсорсинговой

логистики расти темпами, превышающими рост ВВП при оптимизации общего уровня транспортных издержек [1].

В отечественной транспортной отрасли аутсорсинг стали применять около 10 лет назад. Логистический аутсорсинг в нашей стране имеет высокий рейтинг популярности.

В настоящее время логистические провайдеры специализируются на выполнении следующих видов услуг: оказание складских и транспортных услуг; организация логистического процесса доставки. Для осуществления складской и транспортной деятельности им необходимы складские комплексы, терминалы и подвижной состав. В основном этим видом бизнеса занимаются логистические компании, владеющие реальными активами [2]. Провайдеры, которые организуют логистический процесс доставки, берут на себя роль организатора интегрированной логистической цепи доставки, и часто это компании, не владеющие реальными активами. Данные статистики говорят, что именно такой вид бизнеса является наиболее успешным.

Однако высокое качество логистики способны обеспечить только специализированные логистические предприятия. Причем спектр предоставляемых ими услуг находится в прямой зависимости от требований клиентов и постоянно расширяется. Логистические компании стремятся выйти на аутсорсинг уровня 4PL. В этом случае компания передает оператору свои товары или продукцию, а он полностью контролирует перевозку и формирует логистические цепочки [3].

Стратегическим приоритетом развития логистических компаний следует считать отказ от выполнения традиционных функций по перевозке и хранению к организации интегрированной логистической цепи, с предоставлением грузовладельцам комплексных логистических услуг «от двери до двери» уровня 4 PL.

По оценкам участников рынка, логистический аутсорсинг может охватывать более 28 видов услуг [4]. К ним можно отнести: согласование графиков производства, графиков поставок продукции, управление персоналом транспортного подразделения компании, управление внутренней логистикой, материальными запасами и др. [5, 6]. Такие услуги наиболее актуальны для новых и модернизированных предприятий с высокой долей транспортных расходов в конечной стоимости продукции.

По данным маркетинговых исследований 67% респондентов положительно относятся к аутсорсинговой логистике. Однако имеет место и отрицательный опыт работы с провайдерами услуг. Самая распространенная причина негативных явлений – непрозрачность расходов логистических провайдеров [4]. Ее устранение возможно путем автоматизации процессов внутри бизнеса оператора и интеграции автоматизированных систем логистического провайдера и клиента.

Современный грузовладелец обладает большими возможностями в получении разнообразной информации, и это повышает его требования к услугам, предоставляемым логистическим провайдером. Для повышения уровня сервиса необходимо ориентироваться на потребности клиента, учитывая автоматизацию всех сфер деятельности логистического провайдера, начиная от планирования бизнес-процесса до контроля и его реализации. По результатам аналитических исследований экспертов ОАО «РЖД» от логистических компаний требуются гибкость и скорость реакции на конкурентный рынок. Успешность компаний в этом случае будет определяться принципами цифрового бизнеса, основу которых составляют: полная согласованность; бизнес в режиме онлайн; управление сервисами; применение современных механизмов обеспечения информационной безопасности.

Можно выделить основные принципы цифрового логистического бизнеса:

- полная согласованность – наличие необходимой, достоверной и своевременной информации о событиях и намерениях одновременно у всех субъектов, участвующих в предоставлении услуг, включая сотрудников, клиентов и партнеров;
- бизнес в режиме онлайн – принятие решений, направленных на минимизацию дополнительных рисков, снижающих конкурентоспособность предоставляемых логистическим провайдером услуг;
- управление сервисами – планирование и контроль деятельности компании в области повышения показателей качества услуг [7].

Реализация указанных принципов будет осуществляться за счет развития и внедрения модели цифровой железной дороги. Цифровая платформа ОАО «РЖД» – это несколько ключевых блоков, включая цифровые клиентские сервисы для грузоперевозчиков, блок управления производством, перевозочным процессом, объектами железнодорожной инфраструктуры.

В модели цифровой железной дороги следует выделить информационные блоки, которые имеют большое бизнес-значение для логистического провайдера. К ним относятся:

1) управление терминально-складскими комплексами путем автоматизации деятельности терминалов, грузовых дворов, складов, специализированной техники;

2) применение имитационного моделирования:

– для поиска оптимальных вариантов размещения грузов, использования оборудования и внутренней логистики,

– для поиска оптимального варианта использования оборудования и транспорта для выгрузки и вывоза грузов,

– для поиска оптимальных вариантов погрузки и резервирования вагономест,

– для поиска наиболее привлекательного варианта перевозки (время доставки, стоимость);

3) планирование перевозок грузов: динамическое моделирование перевозок на краткосрочную и среднесрочную перспективу с учетом изменения таких факторов как спрос на перевозки, состояние инфраструктуры, доступность подвижного и тягового состава;

4) электронная площадка вагонов, позволяющая повышать коэффициент полезного использования подвижного состава за счет оптимизации его работы с учетом местонахождения, планов использования и технического состояния;

5) онлайн контроль технического состояния подвижного состава с отображением его текущего местоположения, осуществляемый путем сбора информации с навигационно-связных модулей с функцией технической диагностики критических узлов и деталей, а также параметров работы подвижного состава.

В основу создания проекта «Цифровой железной дороги» должна войти действующая нормативно-правовая база. Структура функционирования железнодорожного транспорта охватывает все уровни работы, начиная с работы станции, заканчивая работой дороги и всей отрасли в целом. При этом необходимо учитывать сложность взаимодействия ОАО «РЖД» с партнерами: грузообразующими предприятиями, операторами подвижного состава, крупнейшими экспедиторами, смежными видами транспорта и т. д. Учитывая вышесказанное, целесообразно рассмотреть подробнее Единый сетевой технологический процесс железнодорожных грузовых перевозок (ЕСТП). Он регулирует нормативно-технологическое обеспечение управления процессом железнодорожных грузовых перевозок. Сетевой процесс организует системное взаимодействие участников перевозочного процесса, обеспечивая эффективное управление ресурсами на всех этапах перевозочного процесса. Участниками ЕСТП являются: грузовладельцы, владельцы железнодорожных путей необщего пользования, операторы железнодорожного подвижного состава, ОАО «РЖД» как владелец инфраструктуры общего пользования и перевозчик грузов [8, 9].

Согласно ЕСТП (рис. 1), оператор железнодорожного подвижного состава по сформированной заявке на перевозку согласовывает с грузоотправителем условия предоставления вагонов на планируемый месяц. При заключении долгосрочного договора на организацию перевозки период планирования может быть шире. Планирование порожних вагонопотоков по объемам и корреспонденциям осуществляется на календарный месяц, после этого в ОАО «РЖД» подаются уведомления на перевозки порожних вагонов в рамках системы месячного планирования «шахматок» порожних вагонопотоков в установленные сроки до начала планируемого месяца. Также в соответствии с заявками грузоотправителей определяются станции назначения порожних вагонов. На основании договора с перевозчиком (ОАО «РЖД») вагоны передаются на пути общего пользования. С ОАО «РЖД»

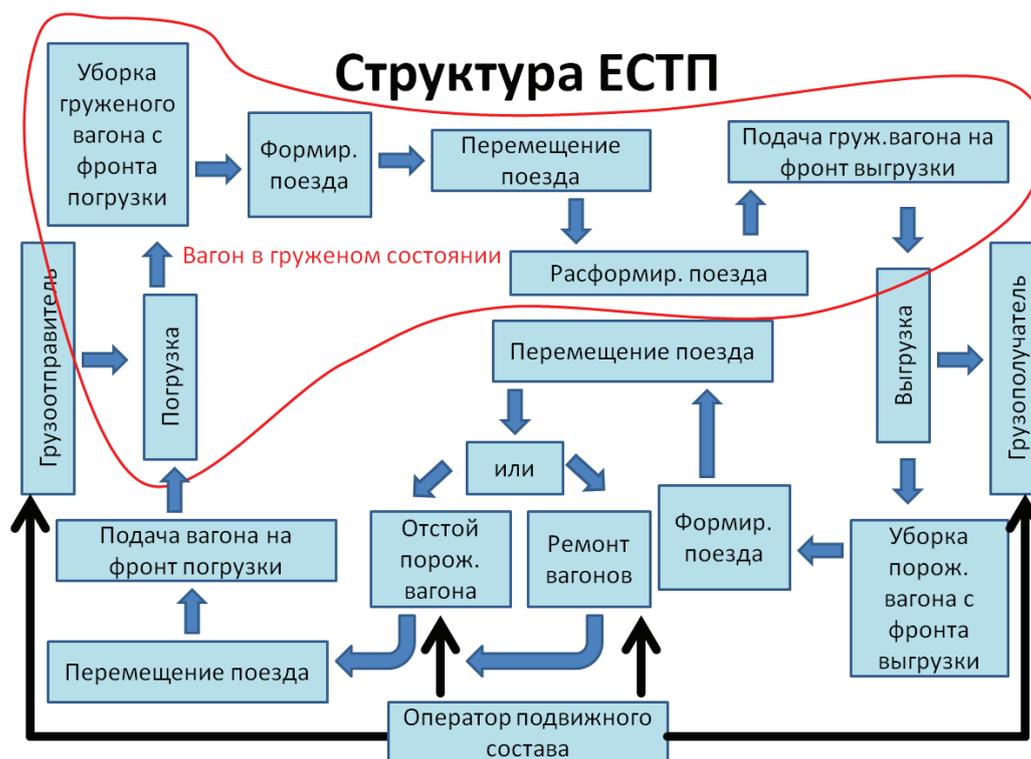


Рис. 1. Структура ЕСТП

согласуются возможности временного отстоя порожних грузовых вагонов, не связанных с договором перевозки грузов. На рис. 1 выделена область, где показаны этапы технологического цикла вагона в груженом состоянии.

Эффективное развитие цифровой железной дороги потребует развития информационных технологий логистических (операторских) компаний.

Работа логистической компании с рассмотренными блоками информации может осуществляться с учетом внедрения новых автоматизированных решений. Автоматизированная система планирования ресурсов предприятия должна иметь возможность сопряжения с сервисными блоками цифровой платформы ОАО «РЖД» и соответствовать организационным и техническим стандартам взаимодействия между ними.

В этом случае логистическим провайдерам придется обрабатывать колоссальный массив данных. Тем не менее это возможно, если использовать цифровые технологии. ERP-система

(Enterprise Resource Planning), или система планирования ресурсов предприятия, предоставит возможность управлять единой информационной средой логистического провайдера для автоматизации сфер его деятельности от планирования бизнес-процессов до контроля их выполнения и дальнейшего анализа выполненных работ. Применение ERP-системы позволит повысить качество транспортных услуг. С ее помощью можно:

- осуществлять управление проектами и программами;
- выполнять прогнозирование;
- получать информацию о продукции;
- управлять затратами, финансами, кадрами и т. д.

ERP-система состоит из функциональных модулей, которые дают возможность реализовать потребности предприятий в автоматизации бизнес-процессов, приводящей к оптимальному решению в рассматриваемой области деятельности или бизнес-процессе.

Рассматриваемая ERP-система строится по модульному принципу и может охватывать все ключевые процессы деятельности логистической компании. Структура этой системы представлена на рис. 2.

Крупнейшие компании-операторы подвижного состава определяют развитие железнодорожной отрасли наравне с ОАО «РЖД». Очень часто операторские компании не только и не столько владельцы подвижного состава, но и логистические операторы. Интересными представляются исследование наиболее успешных представителей операторских компаний и анализ характеристик их работы.

В настоящее время к основным крупным операторам можно отнести АО «Федеральная грузовая компания», АО «Первая грузовая компания», ГК РТК, АО «НефтеТрансСервис», PLC «Globaltrans Investment». На долю этих компаний приходится около 40,5% вагонного парка [8]. Совершенно закономерно развитие конкурентной среды между ними, уровень развития которой определяется с помощью индекса Герфиндаля:

$$G = \sum_{i=0}^n q_i^2,$$

где G – значение индекса Герфиндаля; q_i – доля компании на рынке, %.

По данным за 2018/2019 год индекс Герфиндаля равен

$$G = \sum_{i=0}^n q_i^2 = 466,05 \approx 466.$$

Значение индекса Герфиндаля на этом уровне показывает, что в РФ присутствует монополистическая конкуренция, т. е. действуют 10–20 крупных игроков. Анализ сферы деятельности крупнейших железнодорожных операторских компаний позволяет выделить наиболее успешных представителей. Классификация операторских компаний может быть проведена по следующим параметрам: характер работы (общесетевые или технологические перевозки), вид сообщения, форма собственности компании, виды основного дохода, вид эксплуатируемого подвижного состава и род перевозимого груза.

Разнообразие операторских компаний, действующих на рынке транспортных услуг, можно представить в виде классификационной схемы (рис. 3), где выделены те сегменты, в которых работают компании, лидирующие в сфере грузовых железнодорожных перевозок. Анализ текущей ситуации на рынке транспортных услуг показывает, что именно логистическая составляющая в работе операторской компании позволяет вывести последнюю на лидирующую позицию.



Рис. 2. Блок-схема модулей ERP-системы

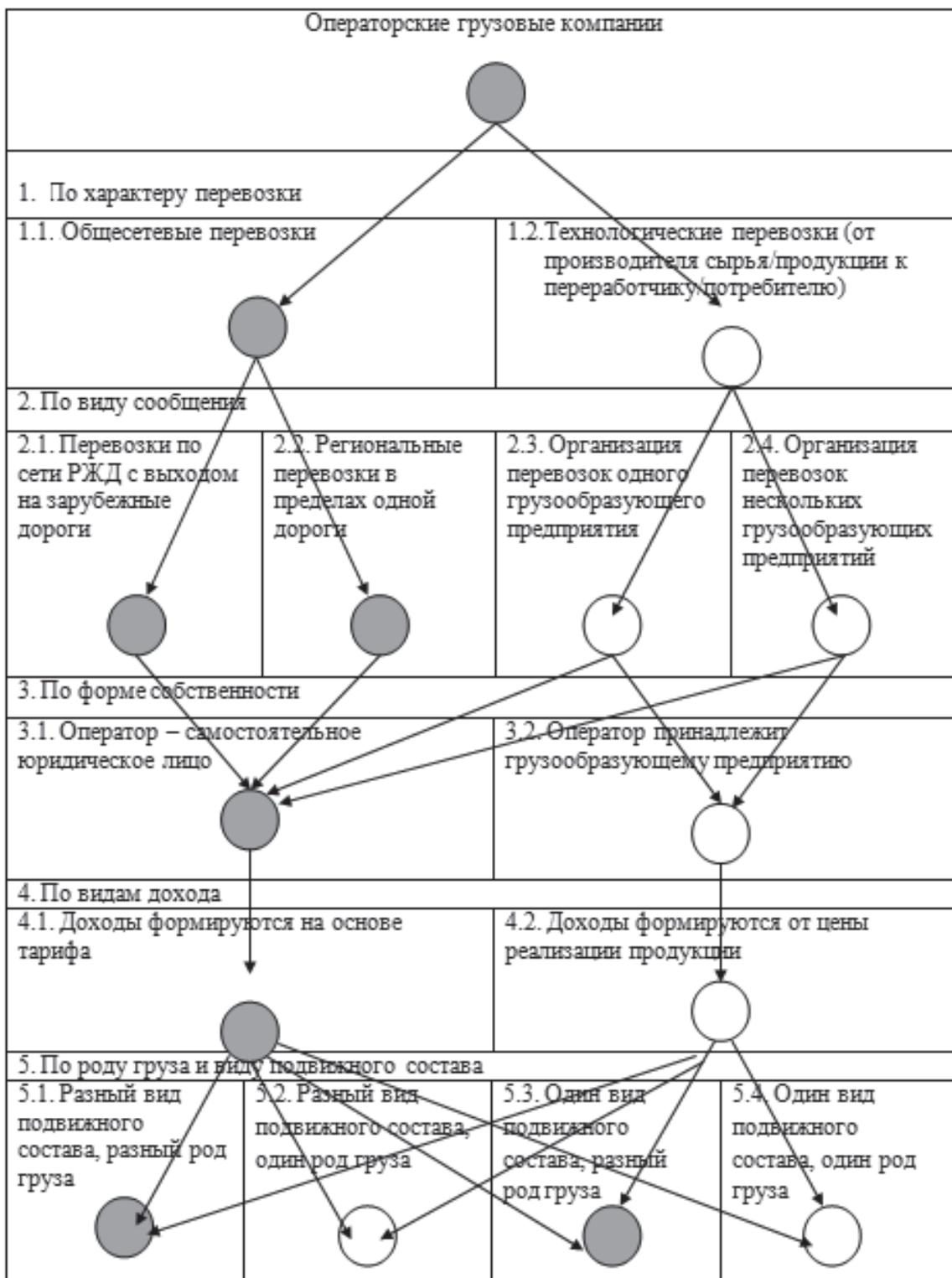


Рис. 3. Классификация операторских компаний с выделением сегментов, соответствующих работе лидирующих игроков:

-  – компании-операторы, лидирующие на рынке грузовых железнодорожных транспортных услуг;
-  – компании-операторы, занимающие незначительный сегмент рынка грузовых железнодорожных транспортных услуг

Таким образом, операторская компания должна не только эффективно управлять вагонным парком, но и развивать логистический аспект в своей деятельности, что, в свою очередь, способствует реализации проекта «Цифровая железная дорога».

Информационная и материальная подсистемы логистического процесса неразрывно связаны между собой и оказывают взаимное влияние [10]. При совершенствовании одной из подсистем изменения затронут другую. Соответственно введение ERP-системы в логистический процесс будет влиять и на материальную подсистему. Однако планирование ресурсов предприятия не может в полной мере удовлетворить потребности грузовладельцев к качеству транспортных услуг. Совершенствование материальной подсистемы логистического процесса позволит приблизиться к этой цели.

Библиографический список

1. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года. – URL : <http://doc.rzd.ru> (дата обращения : 18.06.2019 г.).
2. Сергеева Т. Г. Проблемы функционирования железнодорожного транспорта в логистических системах доставки грузов / Т. Г. Сергеева, Г. И. Никифорова // Транспорт России : проблемы и перспективы – 2018 : материалы Междунар. науч.-практич. конференции, 13–14 ноября 2018 г. – СПб. : ИПТ РАН, 2018. – Т. 1. – С. 245–249.
3. РЖД партнер. – 2019. – Вып. 5–6 (393–394). – С. 33–36.

4. РЖД партнер. – 2019. – Вып. 5–6 (393–394). – С. 14–15.

5. Маликов О. Б. Деловая логистика / О. Б. Маликов. – СПб. : Политехника, 2003. – 223 с.

6. Смехов А. А. Основы транспортной логистики : учебник для вузов / А. А. Смехов. – М. : Транспорт, 1995. – 197 с.

7. Концепция реализации комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога». – М., 2017. – URL : <https://zinref.ru> (дата обращения : 05.02.2020 г.).

8. Никифорова Г. И. Исследование проблем деятельности операторских компаний в управлении вагонным парком / Г. И. Никифорова // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке : сб. трудов XII Санкт-Петербургского конгресса. – СПб., 2018. – С. 172–173.

9. Никифорова Г. И. Проблемы оперирования железнодорожным подвижным составом в современных условиях / Г. И. Никифорова, Т. Г. Сергеева // Транспорт России : проблемы и перспективы – 2014 : материалы Междунар. науч.-практич. конференции. – СПб. : ИПТ РАН, 2014. – С. 185–189.

10. Никифорова Г. И. Взаимодействие железнодорожного и морского транспорта при передаче контейнеропотока на основе принципов логистики : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.08 / Г. И. Никифорова. – СПб. : ПГУПС, 2005. – 195 с.

Дата поступления: 01.06.2020

Решение о публикации: 16.06.2020

Контактная информация:

СЕРГЕЕВА Татьяна Георгиевна – канд. техн. наук, доцент; sergeeva@pgups.ru
НИКИФОРОВА Гузель Ислямовна – канд. техн. наук, доцент; guzel.spb@mail.ru

Competitive recovery of transport and logistics companies in the era of digitization

T. G. Sergeeva, G. I. Nikiforova

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

For citation: Sergeeva T. G., Nikiforova G. I. Competitive recovery of transport and logistics companies in the era of digitization. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 428–436. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-428-436

Summary

Objective: To assess information content of the railway logistic process; to demonstrate the level of development and ways for the improvement of communication between all participants of shipping operations, based on basic unified net technological process of rail transportation (ESTP); to study the influence of operator companies on rail transportation, to describe and calculate the competition level at the market of fleet management and study the most significant and profitable traffic. **Methods:** IT analysis was applied in railway logistic processes; modeling was used for information and technological interaction of participants of shipping operations based on ESTP. Classification of the rolling stock operator companies was carried out. **Results:** The necessity to use logistic outsourcing, as well as the elaboration of the base and additional parameters of cooperation between the participants of shipping operations was established. The competition level in the sphere of the railway rolling stock operation was calculated, as well as the most profitable market niche for rail transportation was determined. **Practical importance:** The necessity to elaborate the parameters of information interaction on the basis of ESTP was demonstrated. The conducted classification of the railway rolling stock operators made it possible to detect the most profitable market niche for rail transportation. Analysis of the number of operator companies and the volume of work carried out by these companies characterized monopolistic competition in the sphere of the railway rolling stock operation. The refinement of transport and logistics services in the sphere of shipping allows the domestic transportation sector to reach a higher level and makes the Russian Federation sphere of transport and shipping more competitive, which is good for economic indicators.

Keywords: Logistics, outsourcing, rolling stock operator, logistic service provider, Herfindahl index, unified net technological process.

References

1. *Strategiya razvitiya kholdinga "RZhD" na period do 2030 goda* [Development strategy of the "Russian Railways" holding company for the period through to 2030]. Available at: <http://doc.rzd.ru> (accessed: June 18th, 2019). (In Russian)
2. Sergeeva T. G. & Nikiforova G. I. Problemy funktsionirovaniya zheleznodorozhnogo transporta v logisticheskikh sistemakh dostavki gruzov [Problems of railway transport operation in logistic cargo delivery systems]. *Transport Rossii: problem i perspektivy* [The Russian Transport: problems and prospects]. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Proceedings of the International research and training conference], November 13–14th, 2018, St. Petersburg, IPT RAN [Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences] Publ., 2018, vol. 1, pp. 245–249. (In Russian)
3. *RZhD partner* [The partner of Russian Railways], 2019, iss. 5–6 (393–394), pp. 33–36. (In Russian)
4. *RZhD partner* [The partner of Russian Railways], 2019, iss. 5–6 (393–394), pp. 14–15. (In Russian)
5. Malikov O. B. *Delovaya logistika* [Business logistics]. St. Petersburg, Polytekhnika Publ., 2003, 223 p. (In Russian)
6. Smekhov A. A. *Osnovy transportnoy logistiki* [Foundations of transport logistics]. College textbook. Moscow, Transport Publ., 1995, 197 p. (In Russian)
7. *Kontsepsiya realizatsii kompleksnogo nauchno-tekhnicheskogo proekta "Tsifrovaya zheleznaya doroga"* [Implementation concept for a comprehensive development project "Digital railway"]. Available at: <https://zin-ref.ru> (accessed: February 5th, 2020) (In Russian)
8. Nikiforova G. I. Issledovaniye problem deyatel'nosti operatorskikh kompaniy v upravlenii vagonnym parkom [The activity of operator companies in the sphere of fleet management: case study]. *Professionalnoye obra-*

zovaniye, nauka, innovatsii v XXI veke [*Professional education, science and innovations in the 21st century*]. Sbornik trudov XII Sankt-Peterburgskogo kongressa [Collected papers of the 12th Congress in Saint Petersburg], 2018, pp. 172–173. (In Russian)

9. Nikiforova G. I. & Sergeeva T. G. Problemy operirovaniya zheleznodorozhnym sostavom v sovremennykh usloviyakh [Problems of the railway stock operation in the present context]. *Transport Rossii: problem i perspektivy* [*The Russian Transport: problems and prospects*]. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Proceedings of the International research and training conference]. Saint Petersburg, IPT RAN [Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences] Publ., 2014, pp. 185–189. (In Russian)

10. Nikiforova G. I. *Vzaimodeistviye zheleznodorozhnogo i morskogo transporta pry peredache konteyneropotoka na osnove printsipov logistiki* [*Cooperation of the railway and marine transport during the container flow transfer based on foundations of logistics*]. PhD thesis in Engineering, speciality: 05.22.08. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2005, 195 p. (In Russian)

Received: June 01, 2020

Accepted: June 16, 2020

Author's information:

Tatiana G. SERGEEVA – PhD in Engineering, Associate Professor; sergeeva@pgups.ru
Guzel Is. NIKIFOROVA – PhD in Engineering, Associate Professor; guzel.spb@mail.ru

УДК 629.4.027.4

Анализ остаточного технического ресурса железнодорожных колес

Р. А. Сахаров, К. К. Ким, С. В. Урушев

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

Для цитирования: Сахаров Р. А., Ким К. К., Урушев С. В. Анализ остаточного технического ресурса железнодорожных колес // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 437–442.

DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-437-442

Аннотация

Цель: Провести анализ технического ресурса железнодорожных колес с точки зрения технического диагностирования. **Методы:** Применяется графическое представление зависимости степени поврежденности железнодорожного колеса от расхода его ресурса. **Результаты:** Показана необходимость усовершенствования методов технического диагностирования железнодорожных колес для перехода на техническое обслуживание по фактическому состоянию. **Практическая значимость:** Установлено: 1) повышение надежности объектов железнодорожного транспорта и безопасность эксплуатации подвижного состава и сопутствующей инфраструктуры; 2) своевременное и оперативное диагностирование дефектов и неисправностей; 3) полное использование межремонтного ресурса ответственных деталей обеспечит резкое сокращение затрат на их эксплуатацию; 4) обеспечение оперативного принятия обоснованных решений по дальнейшему применению подвижного состава с учетом условий эксплуатации и индивидуальных особенностей; 5) обеспечение возможности доступа к информации о состоянии подвижного состава и объектов инфраструктуры в режиме реального времени для всех заинтересованных служб ОАО «РЖД» независимо от места их расположения.

Ключевые слова: Железнодорожное колесо, техническое диагностирование, остаточный технический ресурс, дефекты, структура.

Введение

В настоящее время техническое обслуживание железнодорожных колес в составе колесных пар (КП) проводится по нормативной документации [1, 2], согласно которой межремонтный период колес назначается по их пробегу и составляет 200 тыс. км.

Жизненный цикл железнодорожного колеса условно можно разделить на 8 этапов (рис. 1), причем технический ресурс колеса рассчитывается уже на стадии проектирования. Однако остаточный технический ресурс возможно оце-

нить лишь на стадиях эксплуатации, ремонта и повторной эксплуатации.

Следует отметить, что стадии ремонта (6) и повторной эксплуатации (7) для железнодорожных колес проходят до 4–5 итераций, но, как показывает практика, время развития дефектов колес до возникновения их отказа часто оказывается меньше назначенного межремонтного периода. Это приводит к необходимости перехода от принципов обслуживания на основе среднестатистических показателей (наработка на отказ) к технологии обслуживания по фактическому состоянию, что позволит предупре-

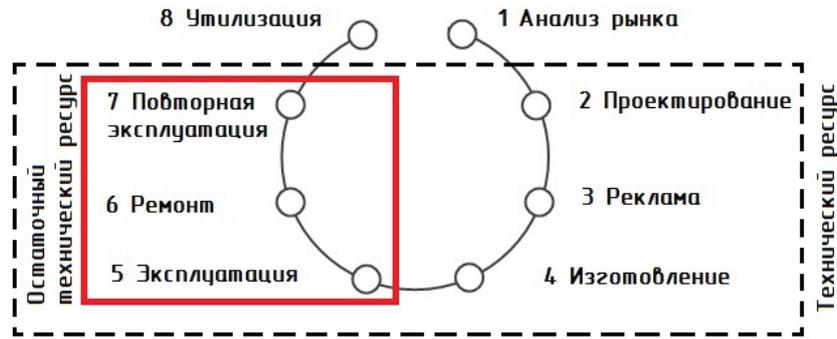


Рис. 1. Жизненный цикл железнодорожного колеса

дить внезапный отказ, а также скорректировать межремонтный пробег колес.

Еще одной специфической особенностью эксплуатации железнодорожных колес является наличие по профилю поверхности катания (ППК) структурной неоднородности, которая никак не учитывается средствами диагностики, применяемыми на ОАО «РЖД». Для оценки технического состояния КП непосредственно в процессе эксплуатации необходимо использование мобильных средств технического диагностирования в режиме реального времени (мониторинг), привязанных к конкретным колесам.

Мониторинг может проводиться в процессе эксплуатации железнодорожных колес непрерывно или через запланированные интервалы времени. На основе данных мониторинга осуществляется контроль технического состояния и остаточного технического ресурса [3].

Техническое состояние цельнокатаных колес вагонов

В соответствии с ГОСТ 27.002–89 «Надежность в технике», различают следующие основные виды технического состояния объектов:

- 1) исправное состояние;
- 2) неисправное состояние;
- 3) работоспособное состояние;
- 4) неработоспособное состояние;
- 5) предельное состояние.

Также, согласно ГОСТ 32192–2013 «Надежность в железнодорожной технике. Основные

понятия. Термины и определения» [5], введены дополнительные технические состояния для железнодорожной техники:

- 1) предотказное состояние;
- 2) частично неработоспособное состояние;
- 3) опасное состояние.

До сих пор не внесена ясность в определении границ видов технических состояний, поэтому для наглядности в данной работе на основании [4, 5] приведен график зависимости степени поврежденности колеса от расхода его ресурса, показывающий распределение видов технического состояния и видов повреждений на всем сроке технического ресурса колеса (рис. 2).

В начале эксплуатации (область I) происходит накопление внутренних напряжений и повреждений структуры металла колеса, которые со временем начинают проявляться. При этом происходит образование дефектов (область II) – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния колес при сохранении их работоспособного состояния. Дефекты могут быть скрытыми и видимыми. Область II является наиболее опасной для эксплуатации, так как в любой момент времени может произойти внезапный отказ (область III). Именно поэтому в ГОСТ 32192–2013 «Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения» [5] были введены дополнительные технические состояния для железнодорожной техники [4–7], чтобы хоть как-то определить границы перехода объекта диагностирования в неработоспособное состояние (8) (рис. 2).

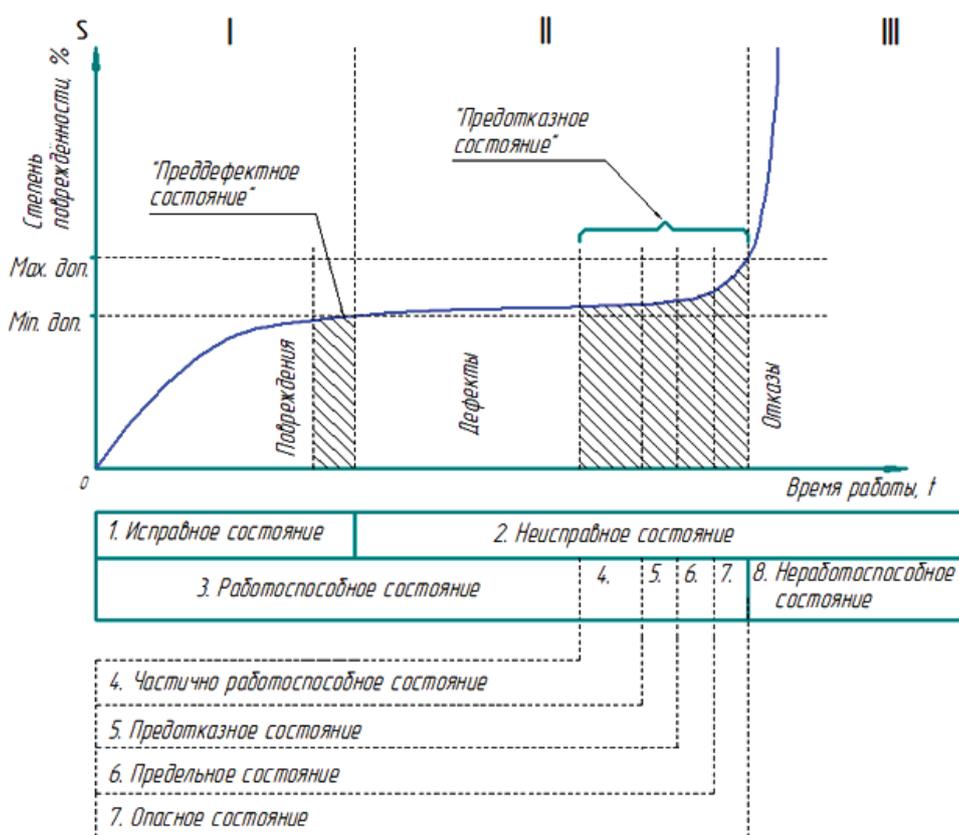


Рис. 2. График зависимости степени поврежденности колеса от расхода его ресурса [5] (объяснение в тексте)

Таким образом, можно условно говорить о «Предотказном состоянии» как некотором времени перед наступлением отказа, который необходимо начать контролировать, чем раньше, тем лучше. Однако отказ может наступить в любой момент времени, т. е. еще до начала образования дефектов. Поэтому определение технического состояния колес должно начинаться с «Преддефектного состояния», когда еще только начинают происходить существенные изменения в структуре металла.

Техническое диагностирование цельнокатаных колес вагонов

Техническая диагностика, как область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объек-

тов [6], решает обширный круг задач, многие из которых являются смежными с задачами других научных дисциплин. Основная задача технической диагностики – распознавание состояния технической системы в условиях ограниченной информации [7].

Задачами технического диагностирования согласно [6] являются:

- контроль технического состояния;
- поиск места и определение причин отказа (неисправности);
- прогнозирование технического состояния.

Сегодня способы технического диагностирования структурного состояния ППК ВКП в ОАО «РЖД» представлены в основном магнитными и акустическими (ультразвуковыми) инструментальными, оперативными, косвенными, тестовыми и функциональными методами, которые

относятся к методам неразрушающего контроля (НК). Обзор этих средств и методов диагностирования представлен в [8–11].

Согласно ГОСТ 56542–2015 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов» [10], классификация методов НК условно предполагает их деление еще и на «пассивные» – использующие собственные физические поля, отображающие внутреннюю энергию материала объектов контроля, и «активные» – с созданием в материале исследуемых объектов «принудительного» физического поля заданной ориентации [12].

К пассивным методам НК можно отнести: автоэмиссионный, акустико-эмиссионный, метод магнитной памяти металла (МПМ), магниторезистивный, метод эффекта Холла, магнитографический, тепловой и т. п. Активные методы НК направлены на поиск дефектов в структуре металла, в то время, когда годность диагностируемых железнодорожных колес должна определяться непосредственно степенью усталости металла [13, 14].

Из «пассивных» методов НК наиболее подходящим для оценки структурного состояния ППК железнодорожных колес в процессе эксплуатации из соотношения затрат и контролепригодности является магниторезистивный метод, так как он позволяет определить не только интенсивность магнитного поля, как при использовании датчика Холла, но и направленность магнитных полей. Это создает возможность отображения взаимосвязи магнитного и структурного состояния металла, благодаря чему возможно применение физических критериев для оценки конфигурации магнитного поля вблизи возможных зон концентрации напряжений в исследуемом изделии, отображающих характерные признаки влияния местной конструктивной особенности или наличия скрытого внутреннего дефекта в рассматриваемой детали [15].

Заключение

Актуальным направлением для исследований является: разработка и внедрение мобиль-

ных систем технического диагностирования железнодорожных колес, обладающих способностью обнаружения зарождающихся дефектов в структуре металла и возможностью последующего прогнозирования их остаточного технического ресурса.

Разработка и внедрение подобной системы, реализующей предлагаемый метод, должны разрабатываться на основе принципов модульности и универсальности, которые могут обеспечить переход на новые современные принципы эксплуатации подвижного состава ОАО «РЖД» по реальному техническому состоянию, что, в свою очередь, позволит:

- повысить надежность объектов железнодорожного транспорта и безопасность эксплуатации подвижного состава и сопутствующей инфраструктуры;
- своевременно и оперативно диагностировать дефекты и неисправности;
- полностью использовать межремонтный ресурс ответственных деталей, что приведет к резкому сокращению затрат на их эксплуатацию;
- обеспечить оперативное принятие обоснованных решений по дальнейшему использованию подвижного состава с учетом условий эксплуатации и индивидуальных особенностей;
- обеспечить возможность доступа к информации о состоянии подвижного состава и объектов инфраструктуры в режиме реального времени для всех заинтересованных служб РЖД независимо от места их расположения.

Библиографический список

1. ЦВ-ЦЛ-408. Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации. – Утв. Советом по железнодорожному транспорту Государственных Сдружеств. – Протокол от 21–22 мая 2009 г. № 50. – 129 с.
2. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 мм (1524 мм). – М., 2012. – 279 с.

3. ГОСТ 27.002–2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. – 01.03.2017 г. – 28 с.
4. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. – 01.07.1990 г. – 24 с.
5. ГОСТ 32192–2013. Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения. – 01.07.2014 г. – 35 с.
6. ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. – 01.01.1991 г. – 11 с.
7. Биргер И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с. – (Надежность и качество.)
8. Сахаров Р. А. Процесс определения преддефектного состояния металлических конструкций бесконтактным методом / Р. А. Сахаров // Судостроительная промышленность. Сер. Технология и организация производства. Судовое машиностроение. Опыт проектирования и создания судовых механизмов. – 2016. – С. 88–95.
9. ГОСТ Р 55612–2013. Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения. – 01.01.2015 г. – 11 с.
10. ГОСТ 56542–2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – 07.08.2015 г. – 15 с.
11. ГОСТ Р 55724–2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. – 08.11.2013 г. – 31 с.
12. Дубов А. А. О новой классификации методов НК с позиции оценки рисков и ресурса оборудования / А. А. Дубов, В. Т. Власов // Диагностика оборудования и конструкций с использованием метода магнитной памяти металла : Четвертая междунар. науч.-технич. конференция : сб. докл. – М. : Энергодиагностика, 2007. – 232 с.
13. Сахаров Р. А. Разработка методики оценки преддефектного состояния металлических конструкций / Р. А. Сахаров // Изобретательство. – М. : Изд-во МИПС, 2016. – Т. 16. – № 2. – С. 23–30.
14. Сахаров Р. А. Решение задачи технического диагностирования ответственных узлов и деталей оборудования / Р. А. Сахаров, Я. С. Ватулин // Юбил. междунар. науч.-практич. конференция «Транспорт России : проблемы и перспективы – 2015» : сб. статей. – В 3 т. – СПб. : Ин-т проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, 2015. – Т. 3. – С. 98–102.
15. Сахаров Р. А. Устройство для магнитометрии : патент. – Заявка № 2015126439/28 от 01.07.2015 г. / Р. А. Сахаров, Я. С. Ватулин. – Решение о выдаче патента 12.08.2015 г.

Дата поступления: 04.09.2020

Решение о публикации: 24.09.2020

Контактная информация:

САХАРОВ Роман Александрович – аспирант;
sakhar.ok@mail.ru

КИМ Константин Константинович – д-р техн. наук, профессор; toe@pgups.ru

УРУШЕВ Сергей Викторович – д-р техн. наук, профессор; ktehmet@pgups.edu

Analysis of the residual technical resource of railway wheels

R. A. Sakharov, K. K. Kim, S. V. Urushev

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

For citation: Sakharov R. A., Kim K. K., Urushev S. V. Analysis of the residual technical resource of railway wheels. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 437–442. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-437-442

Summary

Objective: To analyze the technical resource of railway wheels from the point of view of technical diagnostics. **Methods:** The use graphic representation of dependence of the degree of damage to the railway wheel on the consumption of its resource. **Results:** We show the need to improve the technical

methods for diagnosing railway wheels to go to the maintenance by the actual state. **Practical importance:** 1) to increase the reliability of the objects of railway transport and the safety of the operation of rolling stock and the related infrastructure; 2) the timely and prompt diagnosis of defects and malfunctions; 3) fully utilize the overhaul life of responsible details and it will ensure sharp reducing the cost of their operation; 4) to ensure the prompt adoption of the informed decisions on further using rolling stock, taking into account the operating conditions and individual characteristics; 5) to provide the possibility to real-time information on the state of the rolling stock and infrastructure facilities for all the interested services of the Russian Railways regardless of their location.

Keywords: Railway wheel, technical diagnostics, residual technical resource, defects, structure.

References

1. CV-TsL-408. *Instruction for maintenance of wagons in operation*. Approved by the Council on Railway Transport of the Member States of the Commonwealth, Protocol no. 50, May 21–22, 2009, 129 p. (In Russian)
2. *Guidance document on repair and maintenance of wheelsets with axle boxes of freight cars of main railroads adhesives 1520 mm (1524 mm)*. Moscow, 2012, 279 p. (In Russian)
3. GOST 27.002–2015. *Reliability in technology (SSNT). Terms and Definitions*. 01.03.2017, 28 p. (In Russian)
4. GOST 27.002–89. *Reliability in technology*. 01.07.1990, 24 p. (In Russian)
5. GOST 32192–2013. *Reliability in railway engineering. Basically concepts. Terms and Definitions*. 01.07.2014, 35 p. (In Russian)
6. GOST 20911–89. *Technical diagnostics. Terms and Definitions*. 01.01.1991, 11 p. (In Russian)
7. Birger I.A. *Technical diagnostics*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1978, 240 p. (Reliability and quality) (In Russian)
8. Sakharov R.A. The process of determining the pre-defect state of metal structures by the non-contact method. *Shipbuilding industry. Ser. Technology and organization of production. Marine engineering. Experience in designing and creating ship mechanisms*, 2016, pp. 88–95. (In Russian)
9. GOST R 55612–2013. *Non-destructive magnetic testing. Terms and Definitions*. 01.01.2015, 11 p. (In Russian)
10. GOST 56542–2015. *Non-destructive testing. Classification of types and method*. 07.08.2015, 15 p. (In Russian)
11. GOST R 55724–2013. *Non-destructive testing. Welded joints. Ultrasound Techniques*. 08.11.2013, 31 p. (In Russian)
12. Dubov A.A. & Vlasov V.T. On the new classification of NDT methods from the perspective of assessing risks and equipment life. *Diagnostics of equipment and structures using the metal magnetic memory method. Fourth International Scientific and Technical Conference*. Collection of reports. Moscow, Energy Diagnostics Publ., 2007, 232 p. (In Russian)
13. Sakharov R.A. Development of a methodology for assessing the pre-defective state of metal structures. *Invention magazine*. Moscow, MIPS Publishing House, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 23–30. (In Russian)
14. Sakharov R.A. & Vatulin Ya. S. Solving the problem of technical diagnostics of critical components and parts of equipment. *Anniversary international scientific-practical conference “Transport of Russia: problems and prospects – 2015”*. Collection of articles. In 3 vol. Saint Petersburg, Institute of Transport Problems named after N. S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences Publ., 2015, vol. 3, pp. 98–102. (In Russian)
15. Sakharov R.A. & Vatulin Ya. S. *Device for magnetometry*. Patent. Application no. 2015126439/28 from 01.07.2015. The decision to grant a patent on 12.08.2015. (In Russian)

Received: July 27, 2020

Accepted: August 13, 2020

Author's information:

Roman A. SAKHAROV – Postgraduate Student; sakhar.ok@mail.ru

Konstantin K. KIM – D. Sci. in Engineering, Professor; toe@pgups.ru

Sergei V. URUSHEV – D. Sci. in Engineering, Professor; ktehmet@pgups.edu