

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 17, выпуск 1, 2020

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Учредитель и издатель

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

Адрес учредителя и издателя

190031, СПб., Московский пр., 9,
тел. (812) 314-92-32; ООО «ИД Т-ПРЕССА»,
190031, СПб., наб. р. Фонтанки, 117-А, пом. 33Н,
офис 351, тел. 8(921)099-94-77

Адрес редакции

190031, СПб., Московский пр., 9,
тел. (812) 314-92-32; ООО «ИД Т-ПРЕССА»,
190031, СПб., наб. р. 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, Д. И. Иванов, А. Н. Крышня

Верстка

А. А. Стуканова

Редактор

В. Е. Филиппова

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Панычев Александр Юрьевич, канд. экон. наук, до-
цент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель Со-
вета

Шнайдер Экхард, профессор, Фраунгоферовский ин-
ститут неразрушающего контроля, Саарбрюкен,
Германия

Ситаж Марек, профессор, Силезский технический уни-
верситет, 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 30.03.2020.

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

Усл. печ. л. 19,5. Установочный тираж 300 экз.

Заказ 465. Цена свободная.

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

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY, volume 17, issue 1, 2020

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Founder and publisher

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Emperor Alexander I Petersburg State Transport University";
OOO "ID T-PRESS"

Founder and publisher address

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9,
(812) 314-92-32;
190031, St. Petersburg, Fontanka River emb., 117-A,
prem. 33N, of. 351, 8(921)099-94-77

Editorial address

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9,
(812) 314-92-32;
190031, St. Petersburg, Fontanka River emb., 117-A,
prem. 33N, of. 351, 8(921)099-94-77
e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Mass media registration certificate number

П И Н 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, D. Ivanov, A. N. Kryshnia

Layout

A. Stukanova

Editor

V. Philippova

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

Ekhard 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 Petersburg State Transport University
190031, St. Petersburg., Moskovskiy pr., 9
Open price

© Petersburg State Transport University, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов, А. В. Белянкин

Разработка новых методов измерения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары при движении вагона 7

Д. С. Марков, О. А. Наседкин

Инструментальное средство оценки вероятностных показателей надежности и безопасности систем железнодорожной автоматики 23

О. Д. Покровская, К. А. Заболоцкая, И. Д. Новикова

Решение «Built-to-suit» в сегменте терминально-логистического сервиса 35

О. Р. Хамидов

Моделирование и экспериментальное исследование асинхронного тягового электродвигателя локомотивов при аварийных режимах работы 44

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

Н. Н. Богомолова, И. Н. Журавлев

Методическое сопровождение штамповых испытаний армогрунтовых конструкций 55

А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко, Д. Д. угли Каримов

Эволюция конструкции подвижного состава легкорельсового транспорта в Санкт-Петербурге 62

И. Н. Журавлев

Методологические аспекты исследования деформативности армогрунтовых конструкций 71

Н. Г. Кобозева

Анализ показателей эффективности использования железнодорожного подвижного состава 77

Ю. А. Кочунов, Е. С. Волгин

Основные направления и методы совершенствования поддерживающих конструкций контактной сети железных дорог 84

В. А. Кручек, О. Р. Хамидов

Возможности, перспективы и особенности модульной конструкции грузового электровоза в современных эксплуатационных условиях 96

И. О. Лобыцин

Использование инфракрасного излучения при упрочнении изоляционных конструкций электрооборудования тягового подвижного состава 108

Н. А. Таничева, И. В. Федоров, И. О. Филиппова

Съемное оборудование для перевозки лесоматериалов: новые технические решения и применение высокопрочных сталей 117

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**К. К. Ким, Е. Л. Рыжова**

Использование интеллектуальных цифровых технологий при эксплуатации электроподвижного состава с позиции электробезопасности 129

А. Ю. Попадюк, Е. К. Коровяковский, Т. С. Титова

Экологические аспекты технологии распределенного реестра на примере алгоритма консенсуса Proof-of-Work 136

В. И. Штыков, А. Б. Пономарев

Гидравлический расчет бесполостных дрен треугольного профиля, усиленных дренажной трубой 144

CONTENTS

→ PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

Yu. P. Boronenko, R. V. Rakhimov, A. V. Belyankin

Developing new methods for measuring vertical forces acting on the bogie side frame from the wheelset of a moving wagon 7

D. S. Markov, O. A. Nasedkin

Tool for evaluation of probability rates of reliability and safety of railway automatic control systems 23

O. D. Pokrovskaya, K. A. Zabolotskaya, I. D. Novikova

Build-to-suit solution in the terminal and logistics service segment 35

O. R. Khamidov

Simulation and experimental research of asynchronous traction motor of the locomotive in case of emergency operation mode 44

→ HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

N. N. Bogomolova, I. N. Zhuravlev

Methodology of plate-bearing tests of reinforced ground structures 55

A. A. Vorob'ev, A. M. Budiukin, V. G. Kondratenko, D. D. ugli Karimov

Evolution of design of light-rail transport rolling stock in Saint Petersburg 62

I. N. Zhuravlev

Methodological aspects of reinforced ground structures' deformability study 71

N. G. Kobozeva

Railway rolling stock performance analysis 77

Yu. A. Kochunov, E. S. Volgin

Basic trends and methods of improvement for supporting structures of the railroad catenary system 84

V. A. Kruchek, O. R. Khamidov

Opportunities, prospects and special features of modular design of the electric freight locomotive in modern operational conditions 96

I. O. Lobytsin

Utilization of infrared radiation in strengthening insulation constructions of electrical equipment of traction rolling stock 108

N. A. Tanicheva, I. V. Fedorov, I. O. Filippova

Removable equipment designed to transport timber: new engineering solutions and application of high-yield-stress steel 117

→ GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH**K. K. Kim, E. L. Ryzhova**

Smart digital technologies in the operation of electric rolling stock from the electrical safety perspective 129

A. Yu. Popadyuk, E. K. Korovyakovskiy, T. S. Titova

Environmental aspects of blockchain technology illustrated through the example of the Proof-of-Work consensus algorithm 136

V. I. Shtykov, A. B. Ponomarev

Hydraulic calculation of triangular-profile non-cavity drains reinforced by water drain pipe 144



УДК 629.4.01

Разработка новых методов измерения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары при движении вагона

Ю. П. Бороненко¹, Р. В. Рахимов¹, А. В. Белянкин²

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

² ООО «Тихвинский испытательный центр железнодорожной техники», Российская Федерация, 187556, Ленинградская область, Тихвин, Промплощадка, 6, стр. 1

Для цитирования: Бороненко Ю. П., Рахимов Р. В., Белянкин А. В. Разработка новых методов измерения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары при движении вагона // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 7–22. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-7-22

Аннотация

Цель: Выбор мест расстановки тензорезисторов и способа обработки их сигналов, обеспечивающих максимальную точность измерения величины вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары при движении вагона. **Методы:** Использованы статистические, аналитические и экспериментальные методы. Выполнены теоретические исследования напряженно-деформированного состояния боковой рамы тележки модели 18-9855 с использованием метода конечных элементов при действии нагрузок на буксовом проеме от колесной пары. **Результаты:** Определены места установки тензорезисторов и способ обработки получаемых сигналов, обеспечивающих измерения вертикальных сил с погрешностью не более 4%. Выявлено, что традиционная схема установки тензорезисторов для измерения боковых (рамных) сил, действующих на раму тележки от колесной пары, согласно ГОСТ 33788–2016, при соединении тензорезисторов в два полных моста с четырехпроводной схемой подключения с дальнейшей обработкой сигналов позволяет применить схему одновременно для измерения вертикальных и боковых (рамных) сил. Это дает возможность, не увеличивая количество измерительных каналов в аппаратуре, сократить количество тензорезисторов для измерения рассматриваемых сил при проведении ходовых динамических испытаний. **Практическая значимость:** Для подтверждения выбора мест расстановки тензорезисторов и способа обработки их сигналов, обеспечивающих максимальную точность измерения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары, рекомендуется разработанный метод проверить экспериментальным путем и при подтверждении теоретически полученных результатов использовать их при проведении ходовых динамических испытаний.

Ключевые слова: Ходовые динамические испытания, коэффициент динамической добавки, рамная сила, боковая рама, нагрузка, места установки тензорезисторов, схема соединения тензорезисторов, цифровое моделирование, масштабный коэффициент, виртуальное испытание.

Введение

Ходовые динамические испытания являются одним из основных этапов отработки конструк-

ции разрабатываемого нового подвижного состава и оценки его динамических качеств [1, 2].

При оценке ходовых динамических качеств грузовых вагонов важное значение имеет точное

измерение коэффициента динамической добавки необрессоренных частей и рамной силы [3]. Данные показатели рассчитываются через значения вертикальных и боковых сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары, и используются при расчете коэффициентов запаса устойчивости от схода колеса с рельса и устойчивости от опрокидывания, что непосредственно относится к вопросам безопасности при движении подвижного состава.

Цель исследования – выбор мест расстановки тензорезисторов и способа обработки их сигналов, обеспечивающих максимальную точность измерения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары при движении вагона.

Существующие методы измерения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары

По действующей нормативно-технической документации ГОСТ 33788–2016 [4] традиционная схема измерения вертикальной силы, через которую рассчитывается коэффициент динамической добавки, состоит из двух тензорезисторов, установленных на поверхности радиуса, образованного зоной перехода от верхнего пояса

боковой рамы к наклонному поясу в сечениях I-I и 0I-0I (рис. 1). Тензорезисторы собираются в схему, которая суммирует сигналы от этих тензорезисторов.

На практике также используется схема измерений, применяемая испытательными центрами, где тензорезисторы размещаются на верхней наружной части верхнего пояса боковой рамы над радиусом, образованном зоной перехода от верхнего пояса к наклонному поясу боковой рамы в сечениях II-II и 0II-0II (рис. 1).

Также известен способ измерения вертикальных сил [5, 6], включающий установку двух тензорезисторов: активного (1), компенсационного (2), на верхнюю наружную часть верхнего пояса боковой рамы, в надбуксовую зону, Т-образно (рис. 2, а) по отношению друг к другу или в виде креста (рис. 2, б).

Выполненные исследования [6–8] показывают, что существующие схемы измерения вертикальной силы не позволяют определить ее значение с достаточной точностью. При одновременном действии нескольких сил эти схемы не в полной мере позволяют исключить влияние дополнительных нагрузок, возникающих при движении в кривых участках пути и на стрелочных переводах.

При проведении испытаний было замечено, что вертикальные силы и коэффициент динамической добавки необрессоренных частей в кри-

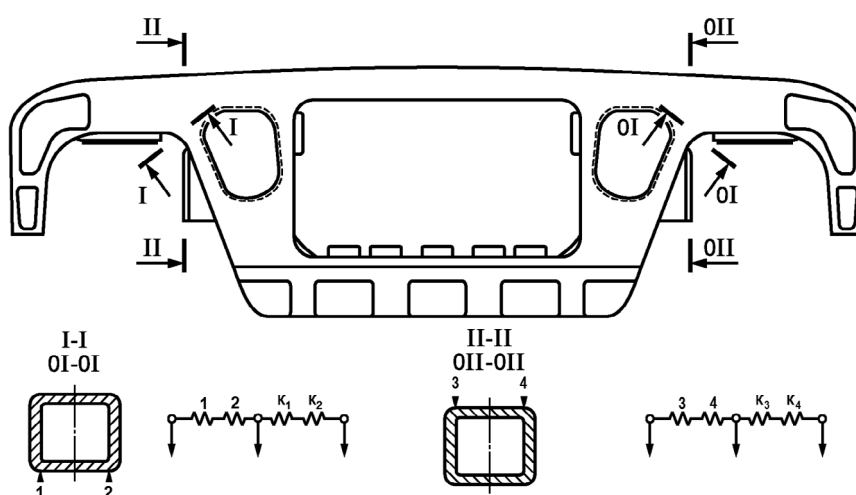


Рис. 1. Схема установки и соединения тензорезисторов для измерения вертикальной силы на боковой раме тележки:

1–4 – номера тензорезисторов; K_1 – K_4 – компенсационные тензорезисторы

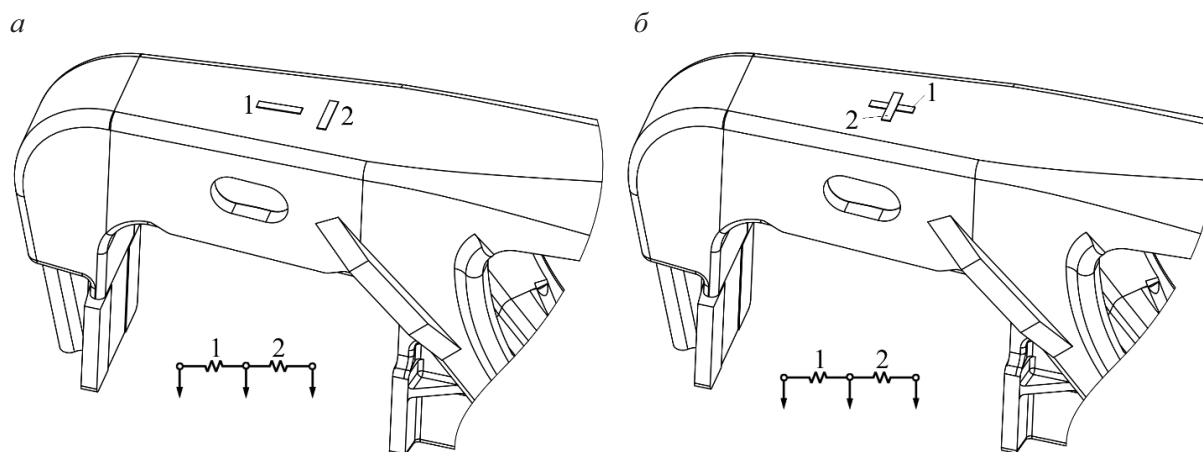


Рис. 2. Схема установки и соединения тензорезисторов для измерения вертикальной силы на боковой раме тележки:
1, 2 – номера тензорезисторов

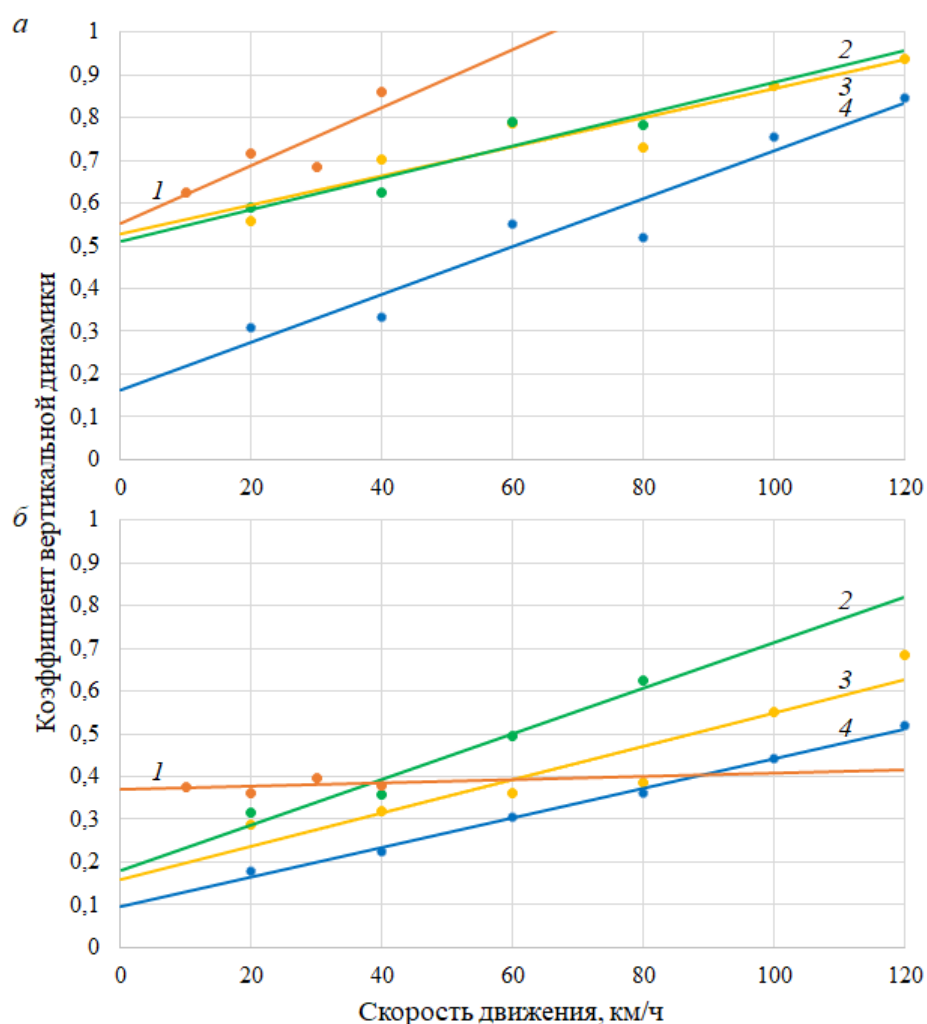


Рис. 3. Зависимость коэффициента вертикальной динамики необрессоренных частей вагона от скорости движения подвижного состава:
а – порожний вагон; б – груженный вагон; 1 – стрелочные переводы; 2 – кривая радиусом 350 м; 3 – кривая радиусом 650 м; 4 – прямая

вых и на стрелочных переводах существенно выше (в 1,5–2,0 раза), чем в прямых участках пути (рис. 3). На наш взгляд, теоретические обоснования данного факта отсутствуют.

Анализ влияния продольных сил на измерения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары

Для изучения выявленной особенности полученных результатов было оценено влияние продольных сил, действующих на тележку в кривых, на вертикальные усилия с помощью стержневой расчетной модели буксового проема боковой рамы тележки. Упрощенная схема и стержневая модель буксового проема боковой рамы тележки в виде стержня переменного сечения в вертикальной плоскости приведены на рис. 4.

Эпюры изгибающих моментов поперечных и продольных сил от вертикальной силы P_z иллюстрирует рис. 5.

В этом случае в районе сечения I–I изгибающий момент прямо пропорционален силе P_z и, регистрируя изгибную деформацию, можно рассчитать вертикальную силу P_z следующим образом:

$$\varepsilon_1 = \frac{M_{P_{z1}}}{W_1 E} = \frac{l_2}{W_1 E} P_z,$$

где E – модуль упругости; W_1 – момент сопротивления сечения I–I.

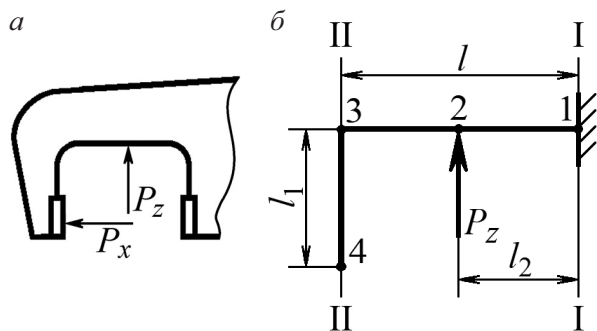


Рис. 4. Упрощенная схема (а) и стержневая расчетная схема (б) буксового проема боковой рамы тележки

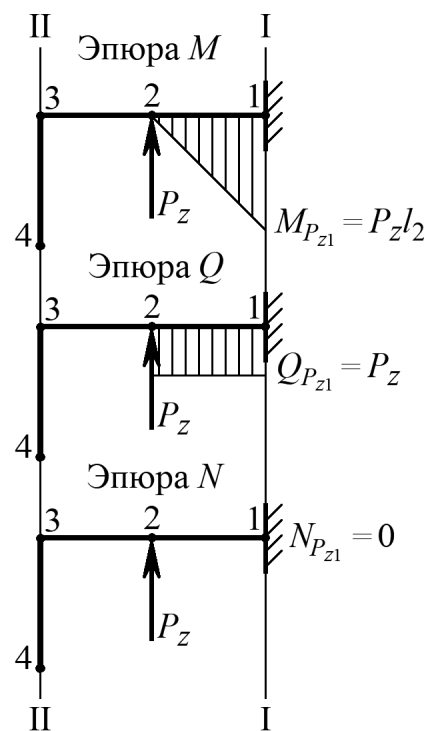


Рис. 5. Эпюры внутренних усилий при действии вертикальной силы

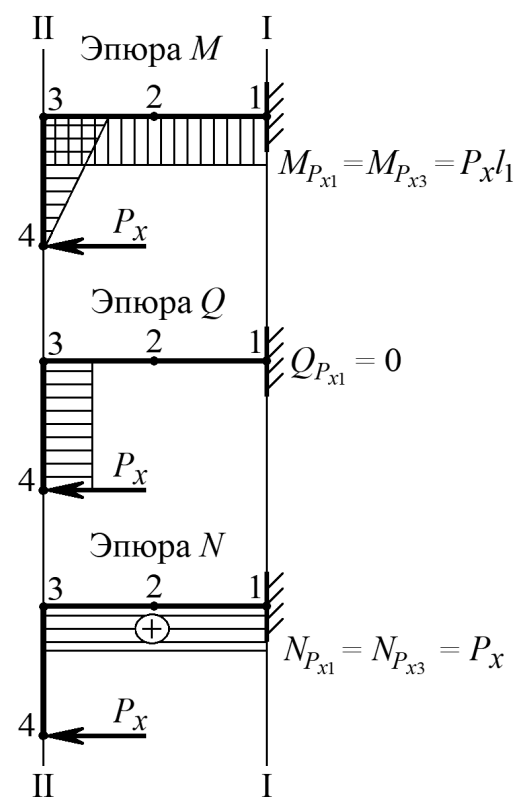


Рис. 6. Эпюры внутренних усилий при действии продольной силы

При действии продольной силы P_x на наружную челюсть буксы возникающая изгибная деформация в сечении I-I (рис. 6) прямо пропорциональна продольной силе и ее невозможно отличить от деформации от вертикальной силы:

$$\varepsilon_1 = \frac{M_{P_{x1}}}{W_1 E} = \frac{l_1}{W_1 E} P_x.$$

Таким образом, проведенные расчеты показали, что деформации, возникающие на боковой раме при действии продольной силы на наружную челюсть буксы, при принятой схеме измерения по ГОСТ 33788–2016 увеличивают значение вертикальной силы.

Альтернативные методы измерения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары

Учитывая недостатки существующих измерительных схем и с целью поиска новых мест установки тензорезисторов и способа обработки получаемых сигналов, позволяющего с достаточной точностью определить значения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары, были разработаны альтернативные методы.

Специалистами ООО «Тихвинский испытательный центр железнодорожной техники» [9]

в результате статических исследований боковой рамы тележки при действии сил от буксового узла (в трех направлениях) одинаковой величины и изучения эпюр напряжений и деформаций предлагается устанавливать тензорезисторы на верхней наружной части верхнего пояса боковой рамы над технологическим проемом (окном), в местах, нечувствительных к действию продольных и боковых (рамных) сил (рис. 7). Чтобы не принимать во внимание действие боковой (рамной) силы, предлагается наклеивать тензорезисторы с разных краев в местах, где деформации одинаковые по величине и разные по знаку. При этом тензорезисторы соединяются в полумост для исключения влияния боковой силы.

Для совершенствования такого метода было предложено на верхней наружной части верхнего пояса боковой рамы вместо двух тензорезисторов устанавливать один на линии, где напряжения от действия продольных сил меняют знак и равны нулю, а также нечувствительны к действию боковых сил. Анализ эпюр распределения напряжений, возникающих при действии продольных и боковых сил, показал, что из-за размещения на внутренней поверхности рамы кронштейна подвески триангеля линия установки тензорезистора не проходит через середину, а находится на некотором расстоянии от него (уточняется расчетом в зависимости от конструкции боковой рамы).

Следующим способом измерения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележ-

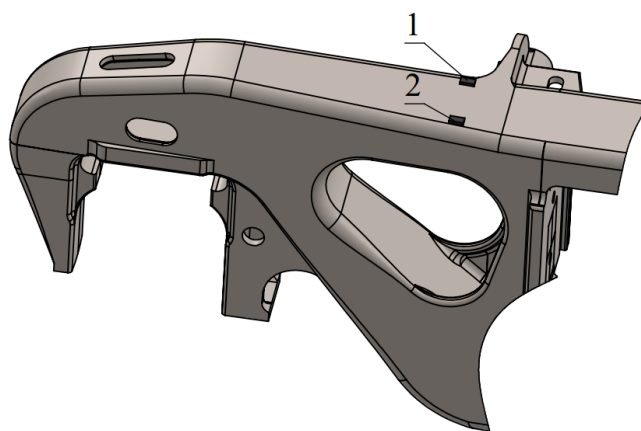


Рис. 7. Схема установки тензорезисторов для измерения вертикальной силы на боковой раме тележки: 1, 2 – номера тензорезисторов

ки от колесной пары, может стать традиционная схема установки тензорезисторов для измерения боковых (рамных) сил, согласно действующей нормативно-технической документации ГОСТ 33788–2016, которая состоит из восьми тензорезисторов, размещенных с двух сторон на верхнем и наклонном поясах боковой рамы тележки (рис. 8). При этом четыре тензорезистора располагаются на боковой части верхнего пояса боковой рамы над технологическим

окном, четыре других – на наклонном поясе под технологическим окном.

Выполненные конечно-элементные расчеты напряженно-деформированного состояния боковой рамы тележки модели 18-9855 [10] при действии сил от колесной пары показали, что традиционная схема установки тензорезисторов для измерения боковых (рамных) сил, согласно ГОСТ 33788–2016, при соединении тензорезисторов, как показано на рис. 9, позволяет также

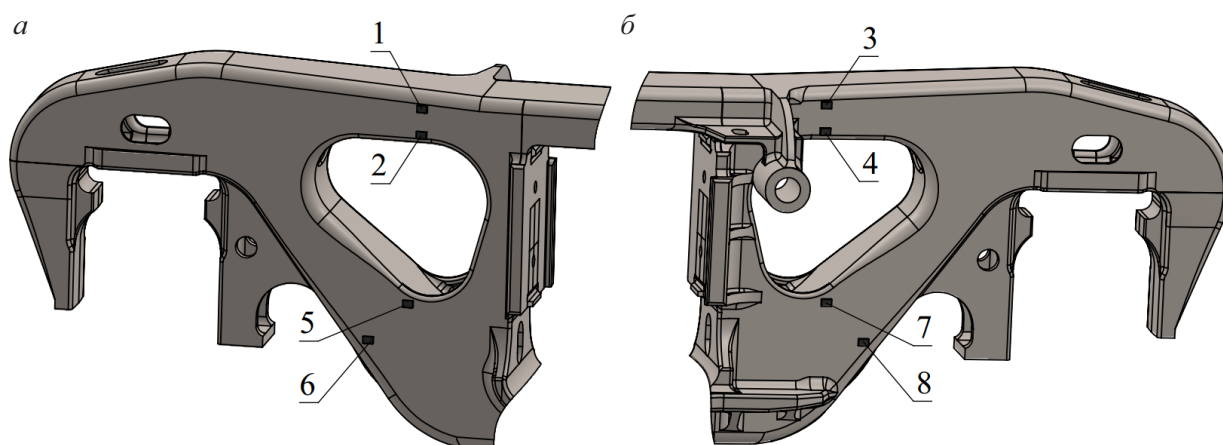


Рис. 8. Традиционная схема установки тензорезисторов для измерения горизонтальной силы на боковой раме тележки, согласно ГОСТ 33788–2016:
а – вид снаружи; б – вид изнутри; 1–8 – номера тензорезисторов

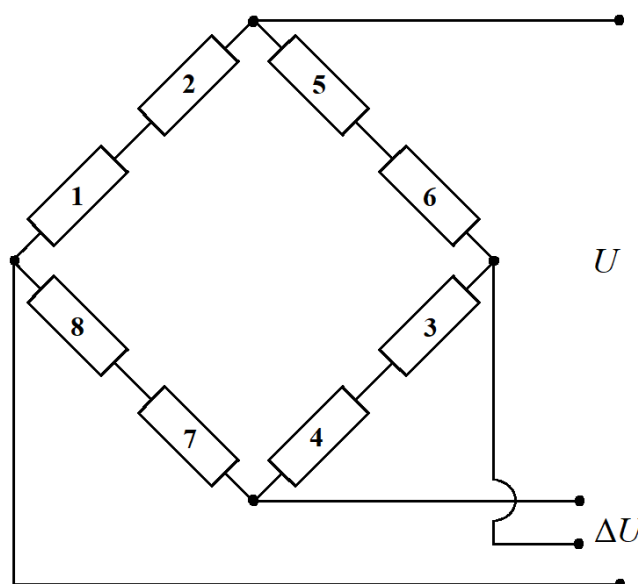


Рис. 9. Схемы соединения тензорезисторов для измерения вертикальной силы на боковой раме тележки: 1–8 – номера тензорезисторов; U – напряжение измерительного моста; ΔU – изменение выходного напряжения измерительного моста

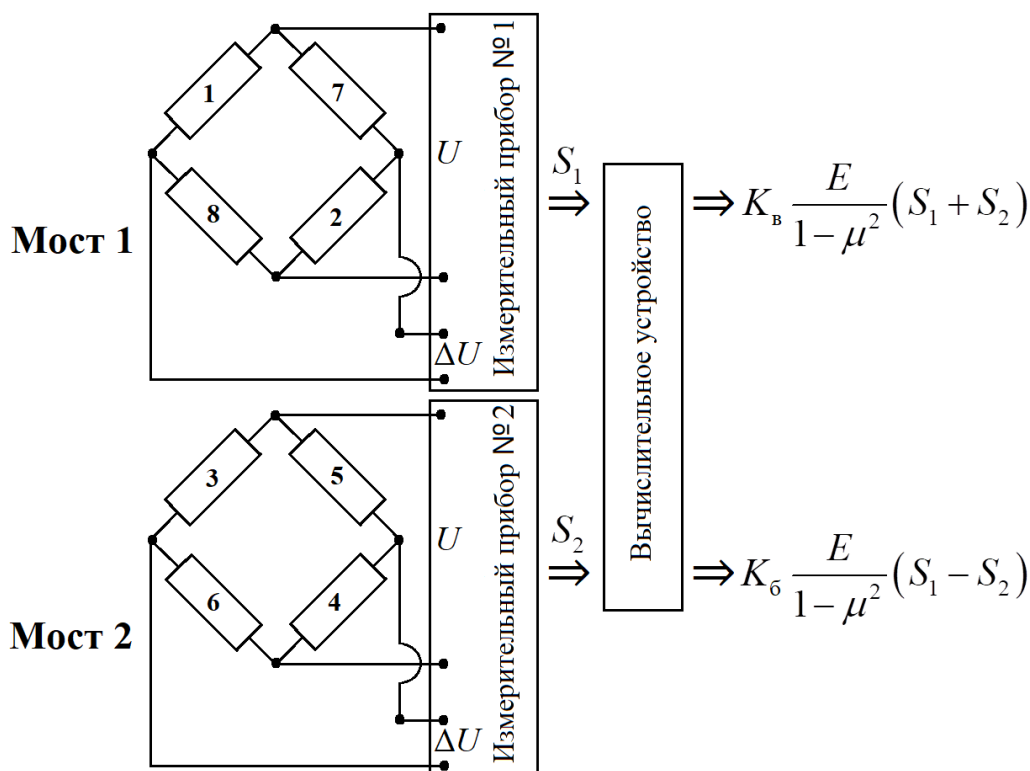


Рис. 10. Схема соединения резисторов в два моста для вычисления вертикальных и боковых сил

определить вертикальные силы, действующие на раму тележки от колесной пары.

Величина вертикальной силы, выраженная через деформации ε_{xi} , имеет вид

$$P_b = K_b \frac{E}{1 - \mu^2} \times (\varepsilon_{x1} + \varepsilon_{x2} + \varepsilon_{x3} + \varepsilon_{x4} - \varepsilon_{x5} - \varepsilon_{x6} - \varepsilon_{x7} - \varepsilon_{x8}), \quad (1)$$

где K_b – постоянный коэффициент для измерения вертикальной силы, определяемый при градуировке тензометрических схем; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; ε_{xi} – линейные деформации, вызванные продольными нормальными напряжениями σ_{xi} в измерительных точках, расположенных на поверхности боковой рамы тележки.

Если учесть, что

$$\begin{aligned} S_1 &= \varepsilon_{x1} + \varepsilon_{x2} - \varepsilon_{x7} - \varepsilon_{x8}, \\ S_2 &= \varepsilon_{x3} + \varepsilon_{x4} - \varepsilon_{x5} - \varepsilon_{x6}, \end{aligned} \quad (2)$$

выражение (1) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} P_b &= K_b \frac{E}{1 - \mu^2} \times \\ &\times \left((\varepsilon_{x1} + \varepsilon_{x2} - \varepsilon_{x7} - \varepsilon_{x8}) + (\varepsilon_{x3} + \varepsilon_{x4} - \varepsilon_{x5} - \varepsilon_{x6}) \right) = \\ &= K_b \frac{E}{1 - \mu^2} (S_1 + S_2). \end{aligned} \quad (3)$$

Чтобы использовать одну схему установки тензорезисторов для измерения вертикальных и боковых (рамных) сил, действующих на раму тележки от колесной пары, тензорезисторы целесообразно соединить в два полных моста с четырехпроводной схемой подключения, как показано на рис. 10. Это позволит получить суммирование и вычитание сигналов S_1 и S_2 .

Тогда из выражений (2) и (3) для вычисления вертикальной и боковой (рамной) сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары при движении вагона, имеем

$$P_b = K_b \frac{E}{1-\mu^2} (S_1 + S_2),$$

$$P_6 = K_6 \frac{E}{1-\mu^2} (S_1 - S_2). \quad (4)$$

Таким образом, традиционная схема установки тензорезисторов для измерения боковых (рамных) сил, согласно ГОСТ 33788–2016, при соединении тензорезисторов, как показано на рис. 10 и согласно формуле (4), позволяет также определить вертикальные силы, действующие на раму тележки от колесной пары. Это дает возможность, не увеличивая количество измерительных каналов в аппаратуре, сократить количество тензорезисторов для измерения вертикальных и боковых (рамных) сил, действующих на раму тележки от колесной пары, при проведении ходовых динамических испытаний.

Цифровое моделирование измерений вертикальных сил при ходовых испытаниях

Для дальнейшей оценки точности методов измерения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары при движении вагона по железнодорожным путям, была разработана расчетная модель боковой рамы тележки модели 18-9855 с конечно-элементной сеткой. Она использовалась при

дальнейших расчетах в Ansys Workbench версия 18 и представлена на рис. 11.

Применялись конечные элементы типа Solid186 размером 10 мм. Элемент Solid186 имеет квадратичные формы с двадцатью узлами, имеющими три степени свободы в каждом узле: перемещения в направлении осей x , y и z узловой системы координат. В качестве системы координат были приняты следующие направления осей системы координат: ось x – продольная, ось y – поперечная, ось z – вертикальная (рис. 11).

Виртуальное определение масштабных коэффициентов

Масштабные коэффициенты рассмотренных методов измерения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки, определялись нагружением боковой рамы тележки: вертикальной силой F_b величиной 10 кН по зонам контакта пружин рессорного подвешивания и рессорного проема боковой рамы (рис. 12).

На основании данного нагружения были определены масштабные коэффициенты:

для метода № 1 – традиционная схема измерения вертикальной силы, согласно ГОСТ 33788–2016:

$$K_b = \frac{P_b}{(\sigma_{x1} + \sigma_{x2})} = \frac{10}{4,1834} =$$

$$= 2,3904 \text{ кН/МПа};$$

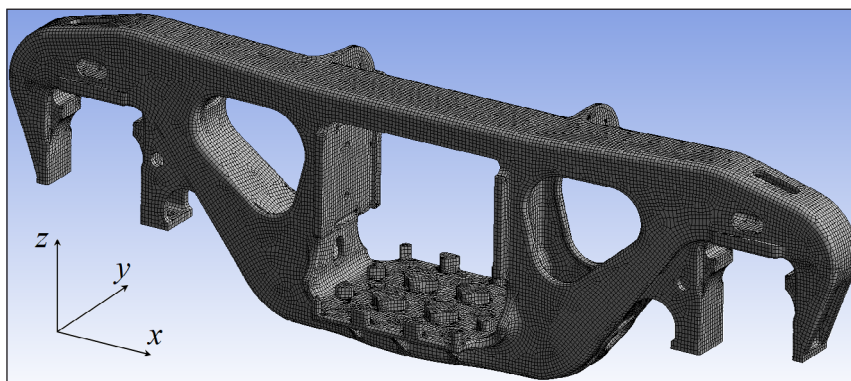


Рис. 11. Общий вид расчетной модели боковой рамы тележки 18-9855 с конечно-элементной сеткой

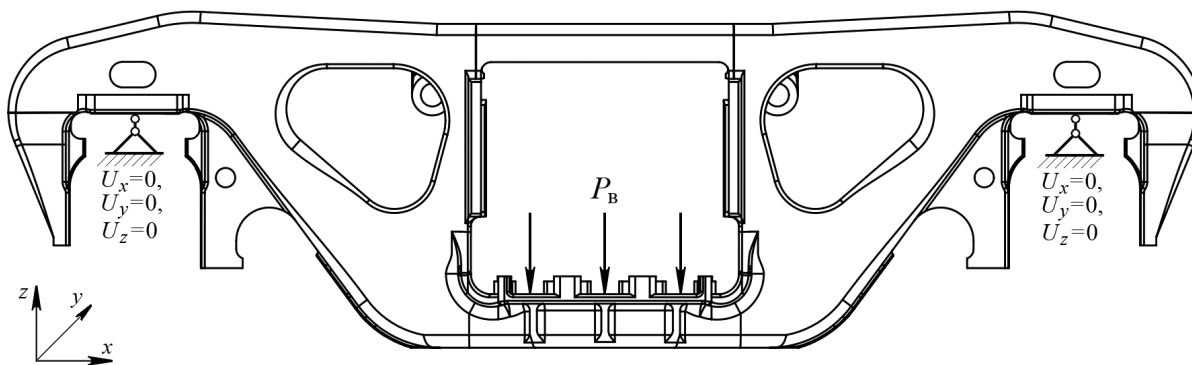


Рис. 12. Кинематические граничные условия при нагружении боковой рамы вертикальной силой

для метода № 2 – схема измерения вертикальной силы, применяемая испытательными центрами:

$$K_B = \frac{P_B}{(\sigma_{x3} + \sigma_{x4})} = \frac{10}{-1,47889} = -6,7618 \text{ кН/МПа};$$

для метода № 3 – схема измерения вертикальной силы двумя тензорезисторами, установленными на верхней наружной части верхнего пояса боковой рамы над технологическим проемом (см. рис. 7):

$$K_B = \frac{P_B}{(\sigma_{x1} + \sigma_{x2})} = \frac{10}{-2,7191} = -3,6777 \text{ кН/МПа};$$

для метода № 4 – схема измерения вертикальной силы одним тензорезистором на верхней наружной части верхнего пояса боковой рамы в месте, установленным расчетом:

$$K_B = \frac{P_B}{\sigma_{x1}} = \frac{10}{-1,1322} = -8,8324 \text{ кН/МПа};$$

для метода № 5 – схема измерения вертикальной силы восемью тензорезисторами (см. рис. 8):

$$K_B = \frac{P_B}{(\sigma_{x1} + \sigma_{x2} - \sigma_{x7} - \sigma_{x8}) + (\sigma_{x3} + \sigma_{x4} - \sigma_{x5} - \sigma_{x6})} =$$

$$= \frac{10}{-6,094} = -1,641 \text{ Н/МПа}.$$

Виртуальное восстановление вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары

Далее к расчетной модели боковой рамы тележки 18-9855 были приложены возможные режимы нагружения, возникающие при движении вагона. Вертикальные, продольные и боковые силы были найдены по результатам моделирования движения груженого и порожнего грузового вагона по прямым и кривым участкам пути на программном комплексе «Универсальный механизм». При этом определено, что в груженом и порожнем режимах максимальные значения продольных и боковых сил составляют практически одинаковую долю от величины вертикальных сил. Поэтому при расчетах были рассмотрены вертикальные, продольные и боковые силы, действующие на боковую раму тележки от колесной пары, только при груженом режиме. Схемы нагружения и результаты измерений сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары, и сравнение погрешностей измерения в различных эксплуатационных нагружениях по результатам расчетов представлены в таблице.

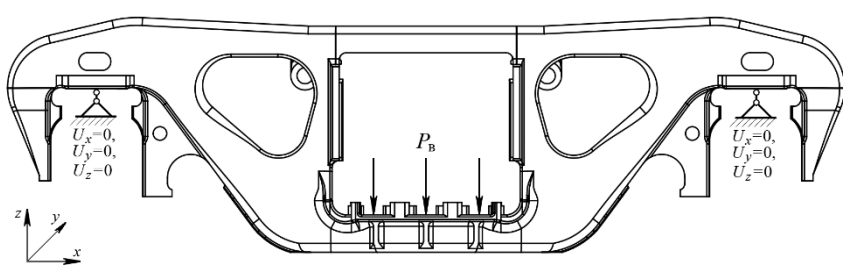
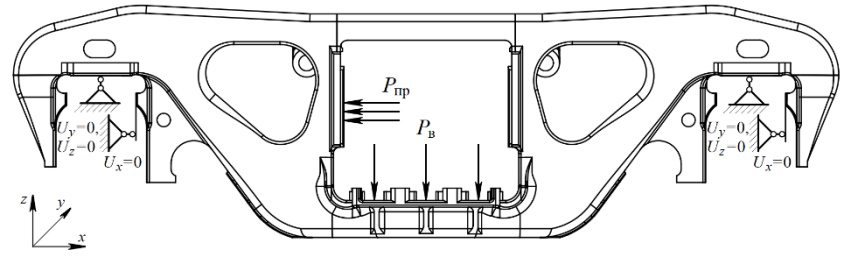
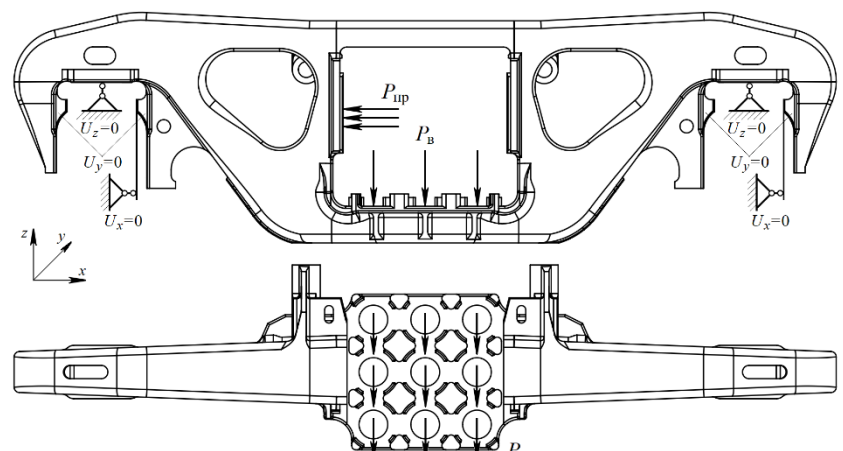
В результате выполненных расчетов было установлено следующее.

При действии вертикальной силы по зонам контакта пружин рессорного подвешивания и рессорного проема боковой рамы (таблица, схема нагружения 1) все методы позволяют максимально точно восстанавливать значения вер-

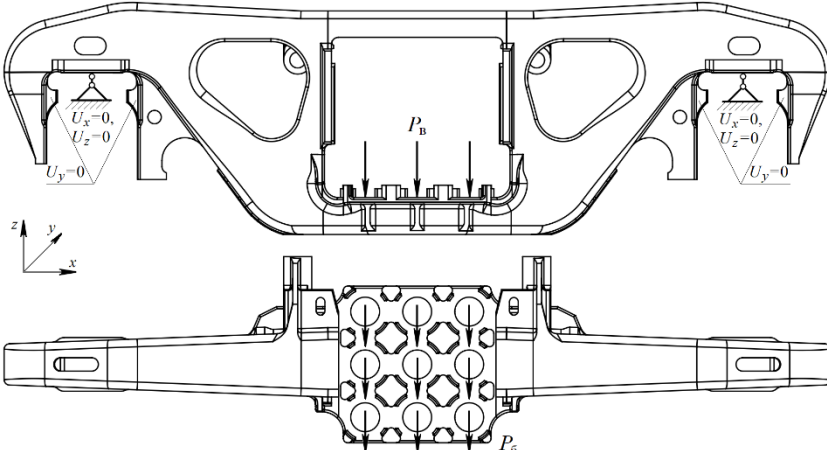
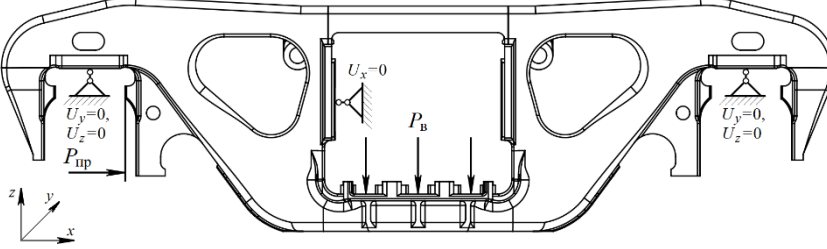
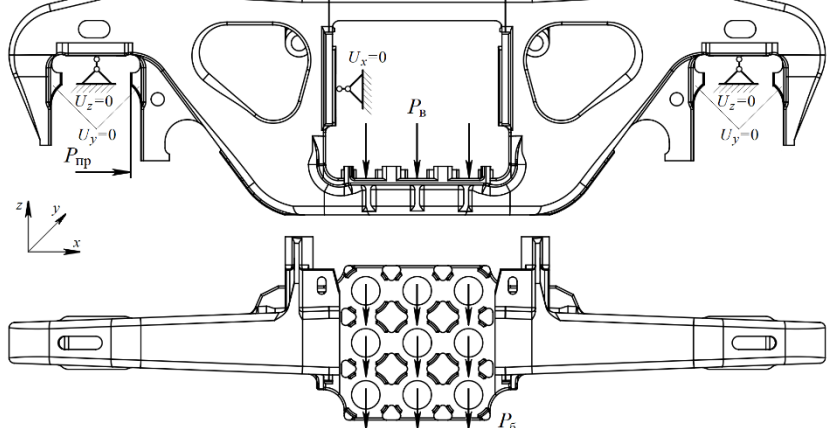
тикальных сил. Погрешность оказалась равной нулю.

При одновременном действии вертикальной силы по зонам контакта пружин рессорного подвешивания и рессорного проема боковой

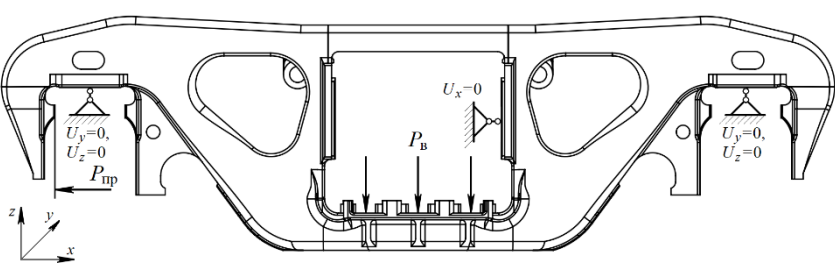
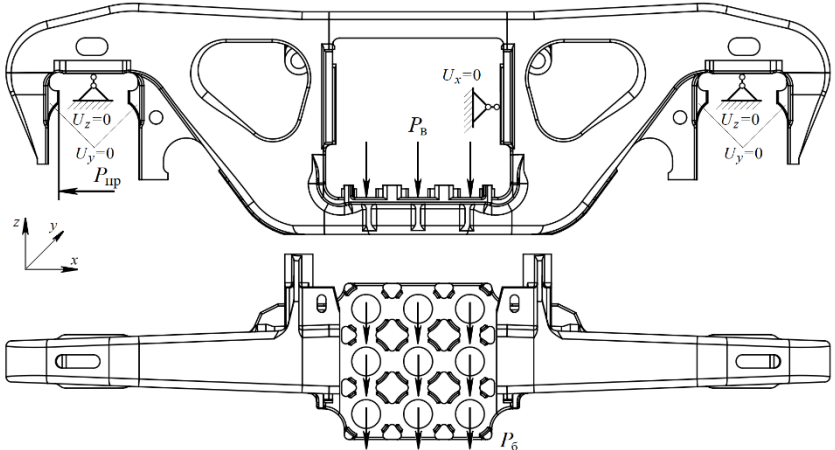
Результаты виртуальных измерений сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары, при различных схемах нагружения

Схема нагружения		Вертикальные силы		
		№ метода	Восстановленные значения, кН	Погрешность, %
1	 $P_B = 225 \text{ кН}$	1	225,00	0,00
		2	225,00	0,00
		3	225,00	0,00
		4	225,00	0,00
		5	225,00	0,00
2	 $P_B = 225 \text{ кН}; P_{\text{пр}} = 20 \text{ кН}$	1	208,69	7,25
		2	217,70	3,24
		3	209,62	6,84
		4	216,36	3,84
		5	223,38	0,72
3	 $P_B = 225 \text{ кН}; P_{\text{пр}} = 20 \text{ кН}; P_6 = 20 \text{ кН}$	1	201,36	10,51
		2	217,76	3,22
		3	209,32	6,97
		4	216,18	3,92
		5	222,94	0,92

Продолжение таблицы

Схема нагружения		Вертикальные силы		
№	метода	Восстановленные значения, кН	Погрешность, %	
4	 $P_B = 225 \text{ кН}; P_6 = 20 \text{ кН}$	1	217,83	3,19
		2	224,61	0,17
		3	224,48	0,23
		4	224,85	0,07
		5	224,73	0,12
5	 $P_B = 225 \text{ кН}; P_{\text{пр}} = 20 \text{ кН}$	1	208,70	7,24
		2	215,66	4,15
		3	222,54	1,09
		4	221,14	1,72
		5	221,81	1,42
6	 $P_B = 225 \text{ кН}; P_{\text{пр}} = 20 \text{ кН}; P_6 = 20 \text{ кН}$	1	201,78	10,32
		2	215,91	4,04
		3	222,03	1,32
		4	220,75	1,89
		5	221,49	1,56

Окончание таблицы

Схема нагружения		Вертикальные силы		
		№ метода	Восстановленные значения, кН	Погрешность, %
7	 $P_v = 225 \text{ кН}; P_{pr} = 20 \text{ кН}$	1	249,72	10,99
		2	257,50	14,44
		3	221,55	1,53
		4	229,76	2,12
		5	228,56	1,58
8	 $P_v = 225 \text{ кН}; P_{pr} = 20 \text{ кН}; P_6 = 20 \text{ кН}$	1	243,15	8,07
		2	257,65	14,51
		3	221,32	1,64
		4	229,39	1,95
		5	228,26	1,45

рамы и продольной силы по площадке контакта клина и стенки рессорного проема боковой рамы (таблица, схема нагружения 2) методы № 2, 4 и 5 позволяют удовлетворительно восстанавливать значения вертикальных сил с погрешностью не более 4 %. Традиционная схема измерения вертикальной силы, согласно ГОСТ 33788–2016, имеет наибольшую погрешность (7,25 %).

При одновременном действии вертикальной и боковой сил по зонам контакта пружин рессорного подвешивания и рессорного проема боковой рамы и продольной силы по площадке контакта клина и стенки рессорного проема

боковой рамы (таблица, схема нагружения 3) методы № 2, 4 и 5 дают возможность удовлетворительно восстанавливать значения вертикальных сил с погрешностью не более 4 %. Традиционная схема измерения вертикальной силы, согласно ГОСТ 33788–2016, показала еще большую погрешность (10,51 %).

При одновременном действии вертикальной и боковой сил по зонам контакта пружин рессорного подвешивания и рессорного проема боковой рамы (таблица, схема нагружения 4) все методы позволяют восстанавливать значения вертикальных сил с погрешностью не более 4 %. При этом максимальная погрешность из-

мерения вертикальных сил методами № 2–5 не превышает 1 %.

При одновременном действии вертикальной силы по зонам контакта пружин рессорного подвешивания и рессорного проема боковой рамы и продольной силы на внутренний опорный упор буксового проема (таблица, схема нагружения 5) методы № 3–5 дают возможность восстанавливать значения вертикальных сил с погрешностью не более 2 %. Для традиционной схемы измерения вертикальной силы, согласно ГОСТ 33788–2016, погрешность уменьшилась, но составила значительную величину (7,24 %).

При одновременном действии вертикальной и боковой сил по зонам контакта пружин рессорного подвешивания и рессорного проема боковой рамы и продольной силы на внутренний опорный упор буксового проема (таблица, схема нагружения 6) методы № 3–5 позволяют восстанавливать значения вертикальных сил с погрешностью не более 2 %. При этом наибольшую погрешность имела по-прежнему традиционная схема измерения вертикальной силы, согласно ГОСТ 33788–2016 (10,32 %).

При одновременном действии вертикальной силы по зонам контакта пружин рессорного подвешивания и рессорного проема боковой рамы и продольной силы на наружный опорный упор буксового проема (таблица, схема нагружения 7) методы № 3–5 дают возможность восстанавливать значения вертикальных сил с погрешностью не более 3 %. Худшие результаты показала схема измерения вертикальной силы, применяемая испытательными центрами (14,44 %).

При одновременном действии вертикальной и боковой сил по зонам контакта пружин рессорного подвешивания и рессорного проема боковой рамы и продольной силы на наружный опорный упор буксового проема (таблица, схема нагружения 8) методы № 3–5 позволяют восстанавливать значения вертикальных сил с погрешностью не более 2 %. Схема измерения вертикальной силы, применяемая испытательными центрами, показала максимальную погрешность (14,51 %).

Таким образом, по результатам проведенной работы установлено:

- метод № 1 – традиционная схема измерения вертикальной силы, согласно ГОСТ 33788–2016, не дает возможность восстанавливать значения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки с достаточной точностью. Максимальная погрешность восстановления сил составляет примерно 11 % (схема нагружения 7);

- метод № 2 – схема измерения вертикальной силы, применяемая испытательными центрами, также не позволяет восстанавливать значения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки с достаточной точностью. Максимальная погрешность восстановления сил – около 14,5 % (схема нагружения 8);

- метод № 3 – схема измерения вертикальной силы двумя тензорезисторами, размещенными на верхней наружной части верхнего пояса боковой рамы над технологическим проемом, не приводит к получению значений вертикальных сил с достаточной точностью. Максимальная погрешность восстановления вертикальных сил – приблизительно 7 % (схема нагружения 3);

- метод № 4 – схема измерения вертикальной силы одним тензорезистором на верхней наружной части верхнего пояса боковой рамы в месте, установленным расчетом, восстанавливает значения вертикальных сил с достаточной точностью. Максимальная погрешность восстановления вертикальных сил не превышает 4 % (схема нагружения 3);

- метод № 5 – схема измерения вертикальной силы восемью тензорезисторами восстанавливает значения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки с максимальной точностью. Максимальная погрешность восстановления вертикальных сил не превышает 1,6 % (схема нагружения 7).

Заключение

Проведенные виртуальные испытания боковой рамы тележки показали, что при действии продольной силы на внутренний опорный упор буксового проема, а также по площадке контакта клина и стенки рессорного проема при принятой схеме измерения по ГОСТ 33788–2016 верти-

кальная сила уменьшается, тогда как при действии продольной силы на наружный опорный упор буксового проема ее значение увеличивается. Это приведет к существенным ошибкам в определении коэффициента динамической добавки необрессоренных частей при ходовых испытаниях.

Выполненные исследования напряженно-деформированного состояния боковой рамы тележки модели 18-9855 с использованием метода конечных элементов при действии нагрузок на буксовом проеме от колесной пары позволили выделить места установки тензорезисторов, обеспечивающих измерения вертикальных сил с погрешностью не более 4% (методы наклейки тензорезисторов № 4 и 5).

Для подтверждения выбора мест расстановки тензорезисторов и способа обработки их сигналов, обеспечивающих максимальную точность измерения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары, рекомендуется методы № 4 и 5 проверить экспериментальным путем и при подтверждении теоретически полученных результатов использовать их при проведении ходовых динамических испытаний, в ходе которых определяются показатели динамических качеств вагона при его движении по железнодорожному пути.

Библиографический список

1. Анисимов П. С. Испытания вагонов : монография / П. С. Анисимов. – М. : Маршрут, 2004. – 197 с.
2. Вершинский С. В. Динамика вагона : учебник для вузов ж.-д. транспорта / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов ; под ред. С. В. Вершинского. – М. : Транспорт, 1991. – 360 с.
3. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – М. : Стандартинформ, 2016. – 54 с.
4. ГОСТ 33788–2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. – М. : Стандартинформ, 2016. – 41 с.
5. Ушкалов В. Ф. К вопросу о влиянии продольных усилий, действующих на боковую раму тележки грузового вагона, на показатели его вертикальной динамики / В. Ф. Ушкалов, Ю. С. Ромен, А. В. Завертало, В. И. Рубан // Наука и прогресс транспорта. Вестн. Днепропетровск. нац. ун-та ж.-д. транспорта. – 2005. – № 8. – С. 112–114.
6. Манашкин Л. А. Об измерении вертикальных сил в тележках грузовых вагонов / Л. А. Манашкин, С. В. Мямлин, Е. А. Письменный // Наука и прогресс транспорта. Вестн. Днепропетровск. нац. ун-та ж.-д. транспорта. – 2004. – № 5. – С. 132–135.
7. Бороненко Ю. П. Измерение нагрузок, действующих на боковую раму тележки от колесной пары при движении вагона / Ю. П. Бороненко, Ю. Б. Житков, Р. В. Рахимов // Материалы XIV Междунар. науч.-технич. конференции «Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты». – СПб. : ПГУПС, 2019. – С. 121–124.
8. Рахимов Р. В. Об измерениях вертикальных, продольных и боковых сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары при движении вагона / Р. В. Рахимов // Науч. труды Республиканск. науч.-технич. конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». – Ташкент : ТашиИИТ, 2019. – С. 102–110.
9. Белянкин А. В. К вопросу экспериментального определения коэффициента динамической добавки необрессоренных частей двухосной тележки грузового вагона / А. В. Белянкин, А. И. Коновалов, Д. Н. Дорохин // Материалы XIV Междунар. науч.-технич. конференции «Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты». – СПб. : ПГУПС, 2019. – С. 203–205.
10. Орлова А. М. Апробация режимов ресурсных испытаний боковых рам тележки модели 18-9855 на стенде пространственного нагружения / А. М. Орлова // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2014. – № 4 (40). – С. 36–37.

Дата поступления: 22.01.2020

Решение о публикации: 06.02.2020

Контактная информация:

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

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

БЕЛЯНКИН Алексей Владимирович – abelyankin@railtest.ru

Developing new methods for measuring vertical forces acting on the bogie side frame from the wheelset of a moving wagon

Yu. P. Boronenko¹, R. V. Rakhimov¹, A. V. Belyankin²

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

² OOO "Tikhvin Test Center for Railway Equipment", 6, bldg. 1, Industrial site, Tikhvin, Leningrad region, 187556, Russian Federation

For citation: Boronenko Yu. P., Rakhimov R. V., Belyankin A. V. Developing new methods for measuring vertical forces acting on the bogie side frame from the wheelset of a moving wagon. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 1, pp. 7–22. (In Russian)

DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-7-22

Summary

Objective: Selecting locations of strain gages and the method of processing their signals, ensuring maximum accuracy in measuring vertical forces acting on the bogie side frame from the wheelset of a moving wagon. **Methods:** Statistical, analytical and experimental methods have been used. Theoretical studies of the stress-strain state of the side frame of a 18-9855 bogie under the action of loads from the wheelset on the pedestal jaw opening have been performed using the finite element method. **Results:** The installation locations of strain gages and the method of processing the received signals providing the measurement of vertical forces with an error of not more than 4 % have been determined. It has been revealed that the traditional installation layout of strain gages for measuring lateral (frame) forces acting on the bogie frame from the wheelset, according to GOST 33788–2016, when connecting the strain gages into two full bridges with a four-wire connection circuit with further signal processing, allows the layout to be used simultaneously for vertical and lateral (frame) forces measurement. This allows us, without increasing the number of measuring channels in the equipment, to reduce the number of strain gages for measuring the described forces during dynamic line tests. **Practical importance:** To confirm the choice of locations of strain gages and the method of processing their signals, ensuring the maximum accuracy in measuring vertical forces acting on the bogie side frame from the wheelset, it is recommended that the developed method be verified experimentally and that the theoretically obtained results, upon confirmation, be used when conducting dynamic line tests.

Keywords: Dynamic line tests, dynamic addition coefficient, frame force, side frame, load, strain gauge installation locations, strain gauge connection diagram, digital simulation, scale factor, virtual test.

References

1. Anisimov P. S. *Ispytaniya vagonov* [Testing of wagons]. Monograph. Moscow, Marshrut Publ., 2004, 197 p. (In Russian)
2. Vershinskiy S. V., Danilov V. N. & Khusidov V. D. *Dinamika vagona*. Uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta [The dynamics of a wagon. A textbook for universities of railway transport]. Ed. by S. V. Vershinskiy. Moscow, Transport Publ., 1991, 360 p. (In Russian)
3. GOST 33211–2014. *Vagony gruzovyye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities]. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 54 p. (In Russian)
4. GOST 33788–2016. *Vagony gruzovyye i passazhir-skiye. Metody ispytaniy na prochnost' i dinamicheskiye kachestva* [Freight and passenger railcars. Methods of testing structural strength and dynamic performance]. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 41 p. (In Russian)

5. Ushkalov V. F., Romen Yu. S., Zavertalyuk A. V. & Ruban V. I. K voprosu o vliyaniy prodol'nykh usiliy, deystvuyushchikh na bokovuyu ramu telezhki gruzovogo vagona, na pokazateli ego vertikal'noy dinamiki [About the issue of influence of longitudinal forces acting on the freight wagon bogie side frame, on its vertical dynamics]. *Nauka i progress transporta* [Science and transport progress]. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Dnipro National University of Railway Transport], 2005, no. 8, pp. 112–114. (In Russian)

6. Manashkin L. A., Myamlin S. V. & Pis'mennyy E. A. Ob izmerenii vertikal'nykh sil v telezhkakh gruzovykh vagonov [About the measurement of vertical forces in freight wagon bogies]. *Nauka i progress transporta* [Science and transport progress]. *Vestnik Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the Dnipro National University of Railway Transport], 2004, no. 5, pp. 132–135. (In Russian)

7. Boronenko Yu. P., Zhitkov Yu. B. & Rakhimov R. V. Izmereniye nagruzok, deystvuyushchikh na bokovuyu ramu telezhki ot kolesnoy pary pri dvizhenii vagona. *Materialy XIV Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konferentsii "Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proyekty"* [Measuring the loads acting on the bogie side frame from the wheelset of a moving wagon. *Proceedings of the 14th International Scientific and Technical Conference "Rolling stock of the 21st century: ideas, requirements, projects"*]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, pp. 121–124. (In Russian)

8. Rakhimov R. V. Ob izmereniyakh vertikal'nykh, prodol'nykh i bokovykh sil, deystvuyushchikh na bokovuyu ramu telezhki ot kolesnoy pary pri dvizhenii vagona [About measurements of vertical, longitudinal and lateral forces acting on the bogie side frame from the wheelset of a moving wagon]. *Nauch. trudy Respublikansk.*

nauch.-tekhnich. konferentsii s uchastiyem zarubezhnykh uchenykh "Resursosberegayushchiye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte" [Proceedings of the Republican Scientific and Technical Conference with the participation of foreign scientists "Resource-saving technologies in railway transport"]. Tashkent, TashIIT [Tashkent Railway Engineering Institute] Publ., 2019, pp. 102–110. (In Russian)

9. Belyankin A. V., Konovalov A. I. & Dorokhin D. N. K voprosu eksperimental'nogo opredeleniya koeffitsiyenta dinamicheskoy dobavki neobressorenykh chastey dvukhosnoy telezhki gruzovogo vagona [About experimental determination of the dynamic addition coefficient of non-sprung parts of a biaxial bogie of a freight wagon]. *Materialy XIV Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konferentsii "Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proyekty"* [Proceedings of the 14th International Scientific and Technical Conference "Rolling stock of the 21st century: ideas, requirements, projects"]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, pp. 203–205. (In Russian)

10. Orlova A. M. Aprobatsiya rezhimov resursnykh ispytaniy bokovykh ram telezhki modeli 18-9855 na stende prostranstvennogo nagruzheniya [Practical evaluation of the life test modes of the 18-9855 bogie side frames on the spatial loading test bench]. *Vagony i vagonnoye khozyaystvo* [Wagons and Carriage Facilities], 2014, no. 4 (40), pp. 36–37. (In Russian)

Received: January 22, 2020

Accepted: February 06, 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

Aleksey V. BELYANKIN – abelyankin@railtest.ru

УДК 656.25:681.32

Инструментальное средство оценки вероятностных показателей надежности и безопасности систем железнодорожной автоматики

Д. С. Марков, О. А. Наседкин

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

Для цитирования: Марков Д. С., Наседкин О. А. Инструментальное средство оценки вероятностных показателей надежности и безопасности систем железнодорожной автоматики // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 23–34. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-23-34

Аннотация

Цель: Синтез моделирующего алгоритма для оценки вероятностных показателей надежности и безопасности устройств и (или) систем железнодорожной автоматики и телемеханики на этапах разработки и доказательства безопасности. **Методы:** Для решения поставленной задачи предложено использовать метод имитационного моделирования, а модель определена как прямая процессная имитационная, воспроизводящая процессы отказов, обнаружения отказов элементов и восстановления работоспособности системы. **Результаты:** Даны уточненные с точки зрения синтеза имитационной модели определения маскируемых, защитных, опасных отказов и состояний для основных избыточных структур микропроцессорных систем железнодорожной автоматики. Сформулированы принципы и требования к программному средству построения имитационной модели. В качестве программного средства предложено применять систему GPSS World. С учетом особенностей GPSS World и на основе сформулированных принципов разработан моделирующий алгоритм. **Практическая значимость:** Предложенный моделирующий алгоритм обеспечивает в дальнейшем простоту реализации GPSS-модели оценки интенсивностей маскируемых, защитных и опасных отказов избыточных структур, используемых для построения систем железнодорожной автоматики.

Ключевые слова: Системы железнодорожной автоматики и телемеханики, показатели надежности и безопасности, имитационная модель, маскируемые и защитные отказы, опасные отказы, моделирующий алгоритм.

1. Введение

Решение задачи оценки соответствия объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта требованиям безопасности в виде сертификации или декларации о соответствии предполагает наличие доказательных материалов на продукцию [1, 2]. То есть практическая реали-

зация такой задачи становится возможной, если принимаются во внимание результаты работ по доказательству безопасности системы [устройства], сформированные разработчиком на этапах разработки и оформленные в виде документа «Доказательство безопасности». Одними из составляющих процесса доказательства безопасности являются определение вероятност-

ных показателей надежности и безопасности (ВПНБ) и проверка их соответствия нормативным значениям, приведенным в нормативной или конструкторско-технической документации на данный вид продукции.

Из-за очень малых значений интенсивностей опасных отказов определительные испытания на ВПНБ практически невозможны. Существующие методики оценки ВПНБ основаны на расчетных методах с использованием математического аппарата теории надежности. Однако аналитические модели требуют достаточно жестких ограничений на вероятностные характеристики процессов отказов, обнаружения и восстановления работоспособности устройств и подсистем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) [3, 4]. Оценка количественных результатов по полученным формулам часто требует применения приближенных методов численного анализа. Преодоление указанных ограничений достигается с помощью методов имитационного моделирования. В [5, 6] предложены методы формализации имитационных моделей (ИМ) функционирования ЖАТ как сложных систем массового обслуживания, т. е. процессов, выполняемых системами.

В настоящей работе предлагается развитие ИМ по моделированию процессов, происходящих в системах железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ), связанных с процессами отказов и восстановлений элементов и устройств ЖАТ. Для решения поставленной задачи используется подход, основанный на прямом имитационном моделировании процессов отказов, обнаружения и восстановления, и на этой основе выполняется расчетная оценка ВПНБ СЖАТ с избыточной структурой или сочетания состояний элементов, нарушающих работоспособное и (или) защитное состояние систем [устройств] ЖАТ. Перечень ВПНБ включает следующие «первичные» показатели: общая интенсивность отказов λ_o , интенсивность защитных отказов λ_{3o} , интенсивность опасных отказов $\lambda_{оп}$, а также параметры $\dot{\omega}_o$, $\dot{\omega}_{3o}$, $\dot{\omega}_{оп}$ соответствующих потоков отказов. Применяя данные показатели, рассчитываются

показатели СЖАТ как восстанавливаемых систем: средняя наработка на отказ T_o , наработка между отказами $T_{мо}$, вероятность безотказной работы $P_{б(t)}$, вероятность отказа $Q_{о(t)}$ – для защитных и опасных отказов, коэффициент готовности K_g , коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$, коэффициент технического использования $K_{ти}$ и коэффициент безопасности K_b . Отдельные устройства и функциональные модули (блоки, конструктивы) являются невосстанавливаемыми и характеризуются такими ВПНБ: вероятность безотказной работы $P_{б(t)}$, средняя наработка до отказа T_o , вероятность отказа $Q_{оп(t)}$ также для защитных и опасных отказов.

2. Основные положения имитационного моделирования надежности и безопасности ЖАТ

2.1. Понятийный аппарат

О п р е д е л е н и е 1. Имитационная модель системы [устройства] железнодорожной автоматики: программный аналог, подобный моделируемой системе [устройству] относительно цели моделирования.

О п р е д е л е н и е 2. Прямая имитационная модель: моделирующая программа, в которой в явном виде установлено соответствие виртуальных объектов модели реальным объектам моделируемой системы [устройства] с учетом их взаимосвязей.

О п р е д е л е н и е 3. Процессная имитационная модель: моделирующая программа, воспроизводящая выполняемые системой [устройством] процессы и (или) процессы, происходящие в ней в модельном времени.

О п р е д е л е н и е 4. Имитационная модель надежности и безопасности (ИМНБ) системы [устройства] железнодорожной автоматики: это прямая процессная моделирующая программа, воспроизводящая дискретные процессы отказов, обнаружения отказов элементов и восстановления работоспособного (исправного) состояния системы [устройства]

с целью оценки вероятностных показателей надежности и безопасности моделируемой системы [устройства].

Определение 5. Имитационный эксперимент (ИЭ) с ИМНБ: единичный прогон имитационной модели с целью получения точечной оценки ВПНБ с заданными структурой, значениями вероятностно-временных характеристик процессов отказов, обнаружения отказов, восстановления работоспособного (исправного) состояния всех элементов системы [устройства] ЖАТ, включенных в модель.

Определение 6. Планирование имитационных экспериментов: организация рациональной по затратам машинного времени последовательности имитационных экспериментов с целью определения зависимости ВПНБ от вероятностно-временных характеристик процессов отказов, обнаружения отказов, восстановления работоспособного (исправного) состояния элементов системы [устройства] ЖАТ и обеспечивающая требуемое качество результатов моделирования.

Определение 7. Серия имитационных экспериментов (СИЭ) с ИМНБ: последовательность имитационных экспериментов, проведенная в соответствии с заданным планом с целью получения множества точечных оценок ВПНБ, достаточного для определения зависимости ВПНБ от вероятностно-временных характеристик процессов отказов, обнаружения отказов, восстановления работоспособного (исправного) состояния всех элементов системы [устройства] ЖАТ, включенных в модель.

Определение 8. Сеанс имитационного моделирования с ИМНБ: множество серий имитационных экспериментов, выполняемых в соответствии со стратегическими и тактическими планами для всего множества ВПНБ, множества зависимостей ВПНБ от различных факторов с целью обеспечения полноты оценки моделируемой системы [устройства] ЖАТ по ВПНБ.

Применение для оценки ВПНБ прямой процессной модели ИМНБ требует уточнения по-

нятийного аппарата по событиям и состояниям избыточных структур микропроцессорных ЖАТ с учетом средств обнаружения отказов, прежде всего по их временным характеристикам. В соответствии с этим введем ряд определений, рассматривая избыточные структуры микропроцессорных (МП) ЖАТ как объекты имитационного моделирования процессов отказов, обнаружения отказов и восстановления работоспособного состояния. Следует отметить, что один и тот же отказ элементов или устройств может приводить систему в разные состояния в зависимости от времени возникновения. Определения вводятся для основных структур, нашедших практическое применение МП СЖАТ, а именно 2v2, 2v3, 2v4. Средства диагностики и устройства сопряжения с объектами управления считаются абсолютно надежными. В ИМНБ они рассматриваются как отдельные устройства или подсистемы и при необходимости включаются в модель со своими вероятностно-временными характеристиками.

Определение 9. Исправное состояние системы [устройства] ЖАТ с избыточной структурой: состояние системы [устройства] ЖАТ, в котором состояние всех элементов, функциональных блоков и подсистем является работоспособным согласно требованиям технической документации.

Примечание: в контексте данной работы царапины на корпусе не переводят СЖАТ в неисправное состояние.

Определение 10. Работоспособное состояние системы [устройства] ЖАТ с избыточной структурой: это состояние включает исправное состояние и неисправное, в котором система [устройство] ЖАТ с избыточной структурой выполняет требуемые функции в соответствии с технической документацией при неработоспособном состоянии отдельных элементов, функциональных блоков, подсистем.

Примечание: работоспособное состояние системы [устройства] ЖАТ с избыточной структурой в неисправном состоянии обеспечивается ее резервными возможностями. При этом с целью обеспечения безопасности функционирования есть предельный порог снижения избыточно-

сти. Как правило, он ограничен двумя вычислительными каналами.

Определение опасного отказа по-разному трактуется разработчиками систем и устройств ЖАТ. Часто это связывают с внешним проявлением системы или устройства с учетом его функционального назначения. Например, для блока управления светофором при установлении критериев опасного отказа указывают в качестве опасного отказа «включение лампы более разрешающего сигнального показания» или для устройств кодирования рельсовых цепей «формирование более разрешающей кодовой комбинации». Это было допустимо, когда вероятность указанных событий была соизмерима с вероятностью опасного отказа элементной базы технических средств, в частности неконтролируемого реле или реле первого класса надежности. С учетом специфики технических средств, концепция обеспечения безопасности которых в корне отличается от релейных систем, критерии опасного отказа формулируют, принимая во внимание принятую разработчиком концепцию. Например, исключение с заданной вероятностью накопления допустимого числа отказов в канале обработки информации или отказов в параллельно работающих вычислительных каналах в течение установленного в нормативно-технической документации времени. Принимая во внимание вышесказанное, можно сформулировать определение опасного отказа в общем виде как событие, заключающееся в нарушении положений концепции, в соответствии с которыми осуществляется построение системы [устройства], отвечающего требованиям безопасности. В [7, 8] сформулирован соответствующий понятийный аппарат, который для целей имитационных экспериментов необходимо конкретизировать с учетом применяемых на практике избыточных структур технических средств.

Определение 11. Защитный отказ структуры 2v2: принудительный перевод структуры в неработоспособное состояние после обнаружения отказа в одном из каналах обработки информации.

Определение 12. Защитное состояние структуры 2v2: неработоспособное состояние

от момента возникновения защитного отказа до восстановления работоспособного состояния системы.

Определение 13. Опасный отказ структуры 2v2: событие, связанное с возникновением в вычислительных каналах структуры отказа, в интервале времени от его возникновения до обнаружения предыдущего отказа.

Определение 14. Маскируемый отказ структуры 2v3: отказ одного из каналов структуры.

Определение 15. Неисправное состояние структуры 2v3: работоспособное состояние структуры от момента возникновения маскируемого отказа до его устранения.

Определение 16. Защитный отказ структуры 2v3: принудительный перевод структуры в неработоспособное состояние при обнаружении отказа в одном из каналов обработки информации после ее реконфигурации в структуру 2v2.

Определение 17. Защитное состояние структуры 2v3: неработоспособное состояние структуры от момента возникновения защитного отказа до восстановления работоспособного состояния хотя бы одного из отказавших каналов.

Определение 18. Опасный отказ структуры 2v3: событие, связанное с возникновением в вычислительных каналах структуры отказа, в интервале времени от его возникновения до обнаружения предыдущего отказа.

Определение 19. Маскируемый отказ структуры 2v4: отказ одного канала в работающем или резервном комплекте.

Определение 20. Неисправное состояние структуры 2v4: работоспособное состояние системы от момента возникновения маскируемого отказа до его устранения.

Определение 21. Защитный отказ структуры 2v4: принудительный перевод структуры в неработоспособное состояние при возникновении отказа в работающем комплекте за время от обнаружения до устранения отказа в восстанавливаемом комплекте.

Определение 22. Защитное состояние структуры 2v4: неработоспособное состояние

системы от момента возникновения защитного отказа до восстановления работоспособного состояния одного из комплектов структуры 2v4.

Определение 23. Опасный отказ структуры 2v4: отказ, возникающий в работающем или резервном комплекте системы за время от возникновения до обнаружения предыдущего отказа в том же комплекте.

2.2. Принципы разработки ИМН

ИМ оценки показателей надежности и безопасности СЖАТ разрабатывается как прямая процессная ИМНБ согласно приведенным выше определениям.

ИМНБ ЖАТ является объектом выполнения СИЭ, в соответствии с этим все вероятностные показатели надежности и безопасности, в первую очередь «первичные» $\lambda_o, \lambda_{zo}, \lambda_{оп}, \dot{\omega}_o, \dot{\omega}_{zo}, \dot{\omega}_{оп}$, оцениваются не аналитически, а методами математической статистики.

Сокращение затрат машинного времени на выполнение СИЭ для статистической оценки ВПНБ с учетом низкой интенсивности потоков опасных отказов СЖАТ.

По технике проведения экспериментов целесообразно использовать понятие «параметр потока отказов», что позволяет выполнять ИЭ в виде одной длинной реализации процессов отказов, обнаружений отказов и восстановлений ЖАТ (моделирование одной системы длительное время). Такой подход существенно упрощает процедуры ИЭ по отношению множества реализаций при моделировании восстанавливаемых и невосстанавливаемых систем по наработке до отказа (моделирование множества устройств на сравнительно коротком интервале времени). Для восстанавливаемых систем в качестве наработки до отказа может рассматриваться время между отказами. Упрощение процедур моделирования по одной длинной реализации достигается простотой решения проблемы начальных условий, остановка процесса моделирования, отсутствием необходимости организации перезапуска модели для реализации коротких прогонов.

Основным средством обнаружения отказов микропроцессорных ЖАТ является циклическое диагностирование с периодом τ_d , который по сравнению с наработкой на отказ пренебрежимо мал. Очевидно, что тактировать ИМНБ периодом τ_d невозможно из-за запредельного времени реализации ИЭ. В отличие от реальной системы модель «знает» моменты появления отказов, что позволяет тактировать модель временем наработки между отказами. Тогда в момент появления отказа последовательно запускаются выдержки времени $\tau^0 = \tau_d + \tau_{обн}$ и τ^B , где τ^0 – время обнаружения отказа, $\tau_{обн}$ – время выполнения операций по обнаружению отказа по τ_d , τ^B – время восстановления и процедур включения устройства. Кроме того, таким образом учитывается работа средств функциональной диагностики, безопасных схем сравнения и т. п.

Информация о моделируемой СЖАТ по множеству включенных в ИМНБ элементов и их вероятностно-временным характеристикам вводится в модель в виде исходных данных.

Структура моделируемой СЖАТ с точки зрения надежности и безопасности представляется в виде логических функций состояний элементов, описывающих состояния системы, для которых выполняется оценка ВПНБ.

2.3. Требования к ИМНБ

Введенный понятийный аппарат (см. п. 2.1) и принципы разработки (см. п. 2.2) позволяют сформулировать требования к ИМНБ:

1. ИМНБ должна реализовываться как комплекс, включающий следующие программы: собственно ИМНБ ЖАТ; диалоговая подсистема, реализующая интерфейс пользователя с моделью, включающая модуль настройки ИМНБ на структуру моделируемой системы [устройства] ЖАТ; модуль настройки ИМНБ на параметрическое описание процессов отказов, обнаружения отказов элементов и восстановления работоспособного (исправного) состояния моделируемой системы [устройства] ЖАТ; модуль задания планов выполнения СИЭ; модуль настройки представления и вывода результатов СИЭ.

2. Элементы ЖАТ (устройства, модули, подсистемы) должны в явном виде представляться в ИМНБ динамическими объектами, порождающими процессы отказов, их обнаружения и восстановления работоспособного состояния.

3. Элемент моделируемой системы в ИМНБ может находиться в таких состояниях:

- элемент работоспособен;
- элемент в состоянии отказа определенного типа из множества заданных пользователем типов отказов, соответственно различных состояний отказа элемента, столько, сколько задано типов отказов;
- состояние отказа элемента до момента обнаружения отказа;
- состояние отказа элемента до момента восстановления работоспособного состояния системы [устройства].

4. Процессы отказов, обнаружения отказов элементов и восстановления работоспособного (исправного) состояния систем [устройств] ЖАТ должны выполняться в ИМНБ на вероятностно-временном уровне без раскрытия в модели технологий обнаружения и восстановления.

5. Ядром ИМНБ должен быть модуль определения совпадения состояний элементов, заданных пользователем, т.е. тех состояний моделируемой системы [устройства], интенсивность (вероятность) которых оценивается в СИЭ. Определение совпадений должно выполняться в соответствии со структурой СЖАТ (прямая модель).

6. ИМНБ не должна накладывать ограничений на структуру и вероятностно-временные характеристики процессов отказов, обнаружения отказов и восстановления устройств и систем ЖАТ, свойственные аналитическим моделям надежности.

7. Обеспечение независимости процессов отказов, обнаружения отказов и восстановления для различных элементов должно обеспечиваться их генерацией с использованием разных генераторов равномерно-распределенных случайных чисел на интервале $[0,1]$.

8. Адекватность ИМНБ должна подтверждаться процедурами верификации и валидации для всех этапов жизненного цикла экспертными оценками, расчетами аналитических моделей по упрощенной формализованной схеме и (или)

статистическими данными реальной эксплуатации ЖАТ (в качестве контрольных примеров).

9. Вероятностно-временные характеристики потоков отказов элементов должны задаваться настройкой стандартных генераторов случайных величин, вводом значений параметров соответствующих функций распределений с использованием модуля настройки ИМНБ на параметрическое описание моделируемой системы. Однако для процессов с редкими событиями, к которым относятся процессы отказов, обнаружения отказов, восстановления работоспособного (исправного) состояния системы [устройства] ЖАТ, целесообразно применять более быстродействующую форму описания случайных величин – табличную.

10. Времена обнаружения отказов элементов и восстановления работоспособного (исправного) состояния системы [устройства] задаются пользователем и могут варьироваться от детерминированных значений до случайных величин, формируемых аналогично вероятностно-временным характеристикам потоков отказов.

11. ИМНБ должна включать средства организации тактических и стратегических планов СИЭ, генерации отчетов различной формы в соответствии с перечнем оцениваемых ВПНБ.

12. Завершение ИЭ должно выполняться по удовлетворению требований заданной величины доверительного интервала при заданной доверительной вероятности или по сходимости вероятностных характеристик наиболее редких ситуаций (комбинации состояний элементов, входящих в моделируемую СЖАТ) из всего множества ситуаций, ВПНБ которых оценивается в данном эксперименте.

2.4. Выбор инструментального программного средства (ИПС) для реализации ИМНБ

В соответствии с п. 2.3 ИПС должен отвечать следующим требованиям:

- ведение модельного времени по событиям;
- практически неограниченное количество генераторов равномерно распределенных случайных величин на интервале $[0-1]$;

- наличие генераторов случайных величин с различными законами распределения, наиболее распространенными в исследованиях надежности технических систем;
- воспроизведение дискретных процессов;
- ведение параллельных дискретных процессов;
- наличие средств представления элементов систем (устройств) ЖАТ;
- наличие средств определения состояния объектов модели и их сочетаний;
- наличие вычислительных возможностей, используемых непосредственно в процессе моделирования;
- наличие встроенных средств сбора и хранения результатов моделирования;
- наличие встроенных средств предварительной обработки статистических данных;
- возможность организации командами управления автоматического режима выполнения СИЭ;
- наличие встроенных средств синтаксического и логического контроля текста программы и процесса моделирования;
- возможность визуального контроля хода процесса моделирования;
- возможность взаимодействия с другими ИПС для организации наиболее комфортной диалоговой подсистемы в конкретной предметной области (текстовые, графические, мультипликационные ИПС и т. п.);

Почти всем требованиям удовлетворяет ИПС GPSS World [9,10], значительный опыт работы с которым имеется у авторов [2,3]. Основным недостатком GPSS World, с точки зрения разработки ИСНБ, являются довольно слабые диалоговые возможности. Развитие комфортного интерфейса «пользователь–ИМНБ» довольно просто реализуется средствами взаимодействия GPSS World с другими ИПС.

3. Моделирующий алгоритм

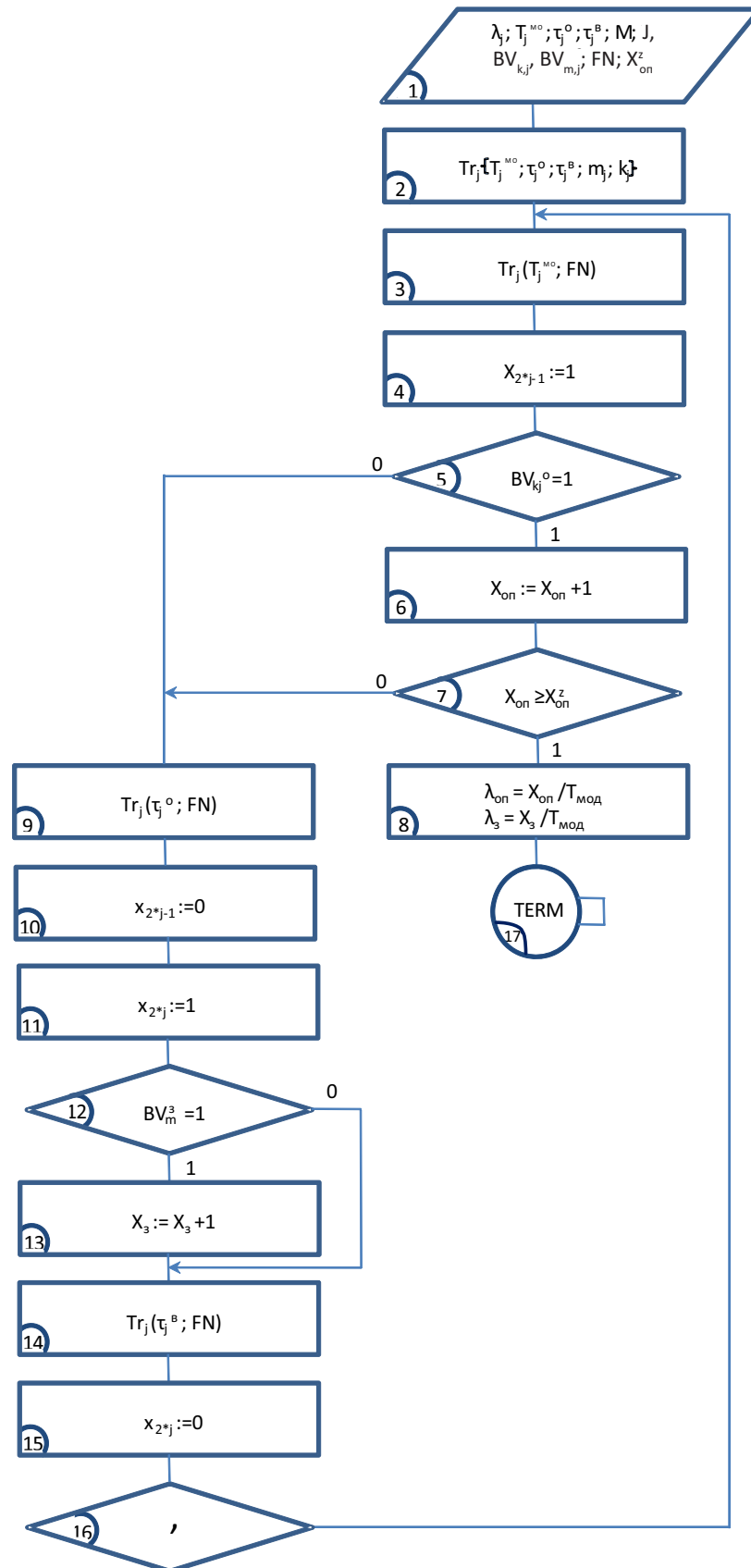
Моделирующий алгоритм разработан с учетом последующей реализации ИМНБ как GPSS-модели и в соответствии с положениями п. 2.

Основным отличием предлагаемого алгоритма от известных имитационных моделей надежности технических систем в среде GPSS [11,12] является применение для представления устройств моделируемой системы динамических объектов – транзактов. Это позволяет в отличие от использования аппаратных объектов GPSS (одноканальные устройства, памяти, логические ключи) синтезировать универсальный алгоритм и GPSS-программу, в которой состав и структура исследуемой системы задаются на уровне исходных данных без изменения текста моделирующей программы. Моделирующий алгоритм ИМНБ представлен на рисунке.

Исходными данными (1) для моделирующего алгоритма являются:

- J – количество устройств, включенных в ИМНБ;
- λ_j – интенсивность отказов, $T_j^{\text{мо}}$ – среднее время между отказами j -го элемента, $j = 1, J$;
- FN – единичная табличная функция распределения случайной величины [9];
- τ_j^o – время обнаружения отказа, τ_j^B – время восстановления работоспособного состояния j -го устройства;
- K, M – количество комбинаций состояний устройств из множества J , соответствующих опасным и защитным состояниям системы соответственно;
- $BV_{k,j}^o, BV_{m,j}^B$, $k = \overline{1, K}$, $m = \overline{1, M}$, – булевы функции, описывающие K опасных и M защитных состояний системы;
- $X_{\text{оп}}^z$ – индекс ячейки памяти, в которую записывается значение количества опасных отказов системы, по достижению которого выполняется останов процесса моделирования.

Оператор (2) выполняет генерацию транзактов Tr_j и присваивает каждому j -му транзакту значения $T_j^{\text{мо}}, \tau_j^o, \tau_j^B, k_j, m_j$. Таким образом, создается множество транзактов $Tr_j, j = 1, J$, представляющих в модели устройства изучаемой системы с их свойствами. Очевидно, что в этом случае при исследовании конкретной системы изменяются не моделирующий алгоритм и GPSS-программа, а количество обрабатываемых транзактов, соответствующее количеству устройств, включенных в ИМНБ.



Моделирующий алгоритм ИМНБ (объяснение в тексте)

Оператор (3) выполняет задержку каждого транзакта Tr_j на случайную величину времени между отказами j -го устройства, определяемую значением T_j^{mo} и единичной функцией распределения FN. Следует отметить, что такой подход используется для однопараметрических функций, например, в наиболее распространенном в исследованиях надежности технических систем экспоненциальном распределении или распределении Релея. При двухпараметрических функциях распределения (например, нормальном распределении) времени между отказами также применяются соответствующие единичные функции FN, а значения их параметров задаются в исходных данных (1).

Окончание выдержки времени для транзакта Tr_j означает наступление события-отказа j -го устройства. Для каждого устройства выделяются две ячейки памяти. В ячейку X_{2*j-1} фиксируется состояние устройства от отказа до окончания τ_j^o , а в X_{2*j} – от окончания τ_j^o до окончания τ_j^b .

Оператор (4) фиксирует отказ $X_{2*j-1} := 1$. Таким образом, в ячейках памяти X_{2*j-1} , $j = 1, J$, фиксируется текущее состояние системы по наличию или отсутствию отказов ее устройств. Опасные состояния системы, например в соответствии с определениями 13, 18, 23, по текущему состоянию устройств определяются множеством K булевых функций – $BV_{k,j}^o(X_{2*j-1})$, аргументами которых являются индексы ячеек памяти X_{2*j-1} , соответствующие устройствам, совместный отказ которых переводит систему в опасное состояние.

Логическое условие (5) определяет значения тех функций $BV_{k,j}^o(X_{2*j-1})$, которые могут измениться при изменении значения ячейки памяти X_{2*j-1} транзактом Tr_j . Если $BV_{k,j}^o(X_{2*j-1}) = 1$, то оператором (6) $X_{оп} := X_{оп} + 1$ фиксируется текущее количество опасных состояний. Логическое условие (6) выполняет сравнение текущего количества опасных состояний $X_{оп}$ с заданным в данном ИЭ $X_{оп}^z$. В случае выполнения условия $X_{оп} > X_{оп}^z$ оператором (8) выполняется расчет значений интенсивностей опасных $\lambda_{оп}$ и защитных $\lambda_{зо}$ отказов, где $T_{мод}$ – значение абсолютного модельного времени по окончанию моделирова-

ния. Далее оператором (17) выполнение данного ИЭ завершается.

В случае отсутствия опасного состояния (логическое условие (5) приняло значение «0»), а также отсутствия условия окончания ИЭ (значения логического условия (7) – «0») выполняется оператор (9), который задерживает транзакт Tr_j на время обнаружения отказа τ_j^o . По окончании τ_j^o отказ признается обнаруженным и оператором (10) $X_{2*j-1} := 0$. Тем самым в данной реализации это устройство исключается из анализа опасных состояний системы.

Оператор (11) $X_{2*j} := 1$ фиксирует начало восстановления работоспособного состояния устройства. Защитные состояния системы, например, в соответствии с определениями 12, 17, 22, по текущему состоянию устройств обуславливаются множеством M булевых функций – $BV_{m,j}^3(X_{2*j})$, аргументами которых являются индексы ячеек памяти X_{2*j} , соответствующие устройствам, совместный отказ которых переводит систему в защитное состояние.

Логическое условие (12) определяет значения тех функций $BV_{m,j}^3(X_{2*j})$, которые могут измениться при изменении значения ячейки памяти X_{2*j} транзактом Tr_j . Если $BV_{m,j}^3(X_{2*j}) = 1$, то оператором (13) $X_3 := X_3 + 1$ фиксируется текущее количество защитных состояний. Далее, как и в случае невыполнения условия (12), выполняется переход к оператору (14), осуществляющему задержку транзакта Tr_j на время восстановления J -го устройства τ_j^b . По окончании τ_j^b оператором (15) ячейке $X_{2*j} := 0$, тем самым в данной реализации это устройство исключается из анализа на защитное состояние системы. Транзакт Tr_j тождественно-ложным логическим условием (16) передается оператору (3), тем самым организуется цикл. Таким образом все J транзактов, представляющие J устройств системы, включенных в ИМНБ, «вертятся» в модели до окончания ИЭ по условию (7).

Заключение

В работе показана актуальность синтеза ИМНБ с целью оценки ВПНБ для доказатель-

ства безопасности современных СЖАТ на этапах разработки и сертификации на безопасность. Получены следующие результаты:

- сформулирован комплекс терминов и определений в области имитационного моделирования процессов отказов, обнаружения отказов и восстановления работоспособного состояния устройств и систем ЖАТ;

- ИМНБ определена как прямая процессная модель, в явном виде воспроизводящая процессы отказов, их обнаружения и восстановления работоспособности, что снимает ограничения, свойственные аналитическим моделям;

- уточнены термины и определения опасных и защитных отказов и состояний для основных избыточных структур микропроцессорных ЖАТ с учетом времени обнаружения и восстановления работоспособности;

- сформулированы принципы синтеза ИМНБ, основными из которых являются представление устройств системы динамическими объектами модели и обеспечение на этой основе возможности задания свойств моделируемой системы на уровне исходных данных без изменения текста моделирующей программы, т. е. универсальности модели для заданной предметной области;

- определен комплекс требований к инструментальному средству, позволивший выбрать для реализации ИМНБ систему моделирования дискретных процессов в непрерывном времени GPSS World;

- разработан моделирующий алгоритм на основе сформулированных принципов и с учетом последующей реализации ИМНБ в среде GPSS World, обеспечивающий универсальность модели и описание структуры системы относительно оценки ВПНБ множеством булевых функций.

Перспективы:

- синтез ИМНБ на основе предложенного моделирующего алгоритма в среде GPSS World с разработкой средств диалоговой подсистемы в соответствии с подпунктом 1 п. 2.3;

- разработка тактических и стратегических планов проведения серий ИЭ по оценке ВПНБ избыточных структур;

- разработка процедур верификации и валидации ИМНБ;

- выполнение серий контрольных экспериментов в соответствии с разработанными планами;

- верификация и валидация ИМНБ с использованием результатов контрольных экспериментов;

- планирование и оценка ВПНБ путем проведения сеансов ИЭ для реальных МП СЖАТ.

Библиографический список

1. Технический регламент ТС «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» ТР ТС 003/2011. – Утв. решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710.
2. Белишкіна Т. А. Особенности подтверждения соответствия требованиям безопасности железнодорожной в переходный период после принятия технических регламентов Таможенного союза / Т. А. Белишкіна // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 2. – С. 23–27.
3. Шубинский И. Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза / И. Б. Шубинский. – М. : Журнал Надежность, 2016. – 546 с.
4. Найхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Ф. Найхельт, П. Франкен; пер. с нем. – М. : Радио и связь, 1988. – 392 с.
5. Марков Д. С. Матричный метод формализации имитационных моделей сложных систем массового обслуживания / Д. С. Марков, П. Е. Булавский // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2010. – Вып. 4. – С. 186–195.
6. Марков Д. С. Метод формализации имитационных моделей технологических процессов в хозяйстве автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте / Д. С. Марков, А. А. Лыков // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2012. – Вып. 1. – С. 23–38.
7. Наседкин О. А. Терминологические особенности этапов разработки и доказательства безопасности железнодорожной автоматики и телемеханики / О. А. Наседкин, Д. С. Марков, Д. А. Васильев, М. А. Бутузов // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 368–379.

8. Наседкин О. А. Понятийный аппарат экспертизы и испытаний на безопасность железнодорожной автоматики / О. А. Наседкин, Д. С. Марков, Д. А. Васильев, М. А. Бутузов // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4. – № 1. – С. 1–12.

9. Девятков В. В. Руководство пользователя по GPSS World / В. В. Девятков. – Казань : Мастер Лайн, 2002. – 383 с.

10. Боев В. Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World / В. Д. Боев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 348 с.

11. Томашевский В. Н. Имитационное моделирование в среде GPSS / В. Н. Томашевский, Е. Г. Жданова. – М. : Бестселлер, 2003. – 416 с.

12. Жернов Ю. В. Имитационные модели расчета надежности систем. Использование GPSS World / Ю. В. Жернов. – Киев : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 96 с.

Дата поступления: 05.12.2019

Решение о публикации: 28.02.2020

Контактная информация:

МАРКОВ Дмитрий Спиридонович – канд.

техн. наук, доцент; mds1945@yandex.ru

НАСЕДКИН Олег Андреевич – канд. техн.

наук, доцент; nasedkin@crtc.spb.com

Tool for evaluation of probability rates of reliability and safety of railway automatic control systems

D. S. Markov, O. A. Nasedkin

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

For citation: Markov D. S., Nasedkin O. A. Tool for evaluation of probability rates of reliability and safety of railway automatic control systems. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 1, pp. 23–34. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-23-34

Summary

Objective: Synthesis of modeling algorithm to evaluate probability rates of reliability and safety of railway automatic control and telecontrol devices and/or systems at the stage of design and demonstration of safety. **Methods:** Method of imitation modeling was proposed to solve the task set. The model is determined as a direct process imitation model reproducing processes of failures, failure detection and system recovery. **Results:** Definitions of camouflaged, protective, dangerous failures and conditions for primary redundant structures of microprocessor-based railway automatic control systems, refined from the point of view of synthesis of imitation model, are provided. Principles and requirements for the software application to build the imitation model are formulated. GPSS World system was proposed as a software application, and a modeling algorithm was developed accounting for its specific features and the formulated principles. **Practical importance:** The newly developed modeling algorithm ensures in the future simplicity of implementation of a GPSS model for evaluation of intensity rates of camouflaged, protective and dangerous failures of redundant structures used in building railway automatic control systems.

Keywords: Railway automatic control and telecontrol systems, reliability and safety indices, imitation model, camouflaged and protective failures, dangerous failures, modeling algorithm.

References

1. *Technical regulation TR TS 003/2011 "O bezopasnosti infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta"* [On safety of railway transport infrastructure]. Approved by the decision of the Customs Union commission no. 710 on Jul. 15, 2011. (In Russian)
2. Belishkina T.A. Osobennosti podtverzhdeniia sootvetstviia trebovaniyam bezopasnosti zheleznodorozhnoi infrastruktury v perekhodnyi period posle priniatiia tekhnicheskikh reglamentov Tamozhennogo soiuza [Specific features of confirming compliance with safety requirements for railway infrastructure in the transient period after Customs Union's technical regulations were passed]. *Avtomatika na transporte* [Automatic control in transport], 2016, vol. 2, no. 2, pp. 23–27. (In Russian)
3. Shubinskii I. B. Nadezhnye otkazoustoichivye informatsionnye sistemy. Metody sinteza [Reliable failure-resistant information systems. Methods of synthesis]. Moscow, Zhurnal Nadezhnost' Publ., 2016, 546 p. (In Russian)
4. Naikhel't F. & Franken P. *Nadezhnost' i tekhnicheskoe obsluzhivanie. Matematicheskii podkhod* [Reliability and technical servicing. Mathematical approach]. Translated from German. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1988, 392 p. (In Russian)
5. Markov D. S. & Bulavskii P. E. Matrichnyi metod formalizatsii imitatsionnykh modelei slozhnykh sistem massovogo obsluzhivaniia [Matrix method for formalization of imitation models of mass-service complex systems]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [Proceedings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2010, iss. 4, pp. 186–195. (In Russian)
6. Markov D. S. & Lykov A. A. Metod formalizatsii imitatsionnykh modelei tekhnologicheskikh protsessov v khoziaistve avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnom transporte [A method for formalization of imitation models of technological processes in automatic control and telecontrol systems on railway transport]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [Proceedings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2012, iss. 1, pp. 23–38. (In Russian)
7. Nasedkin O. A., Markov D. S., Vasil'ev D. A. & Butuzov M. A. Terminologicheskie osobennosti etapov razrabotki i dokazatel'stva bezopasnosti zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki [Terminological features of stages of development and confirming safety of railway automatic control and telecontrol systems]. *Avtomatika na transporte* [Automatic control in transport], 2017, vol. 3, no. 3, pp. 368–379. (In Russian)
8. Nasedkin O. A., Markov D. S., Vasil'ev D. A. & Butuzov M. A. Poniatiinyi apparat ekspertizy i ispytaniia na bezopasnost' zheleznodorozhnoi avtomatiki [Conceptual framework of expert evaluation and safety tests for railway automatic control systems]. *Avtomatika na transporte* [Automatic control in transport], 2018, vol. 4, no. 1, pp. 1–12. (In Russian)
9. Deviatov V. V. *Rukovodstvo pol'zovatel'ia po GPSS World* [GPSS World user manual]. Kazan, Master Lain Publ., 2002, 383 p. (In Russian)
10. Boev V. D. *Modelirovanie sistem. Instrumental'nye sredstva GPSS World* [System modeling. GPSS World tools]. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2004, 348 p. (In Russian)
11. Tomashevskii V. N. & Zhdanova E. G. *Imitatsionnoe modelirovanie v srede GPSS* [Imitation modeling in GPSS environment]. Moscow, Bestseller Publ., 2003, 416 p. (In Russian)
12. Zhernovyi Iu. V. *Imitatsionnye modeli rascheta nadezhnosti sistem. Ispol'zovanie GPSS World* [Imitation models for calculation of system reliability. Use of GPSS World]. Kyiv, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018, 96 p. (In Russian)

Received: December 5, 2019

Accepted: February 28, 2020

Author's information:

Dmitrii S. MARKOV – PhD in Engineering, Associate Professor; mds1945@yandex.ru
 Oleg A. NASEDKIN – PhD in Engineering, Associate Professor; nasedkin@crtc.spb.com

УДК 656.073:658.8

Решение «Build-to-suit» в сегменте терминально-логистического сервиса

О. Д. Покровская, К. А. Заболоцкая, И. Д. Новикова

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

Для цитирования: Покровская О. Д., Заболоцкая К. А., Новикова И. Д. Решение «Build-to-suit» в сегменте терминально-логистического сервиса // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 35–43. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-35-43

Аннотация

Цель: Рассмотрение логистического решения для клиента железнодорожной станции по формату «Build-to-suit». **Методы:** Применяются аналитический, статистический, логистический методы, экономико-математическое моделирование. Были проведены технико-эксплуатационные и экономические расчеты параметров проекта терминально-складского комплекса для крупного клиента-грузовладельца станции. **Результаты:** Проанализированы альтернативные варианты развития, разработан план комплекса. **Практическая значимость:** Учет требований клиентоориентированности и инновационной логистики в работе реальной железнодорожной станции позволяет использовать полученные в исследовании результаты на практике.

Ключевые слова: Build-to-suit, грузовой терминал, клиентоориентированность, терминально-складская инфраструктура, проектирование, технико-экономическое обоснование.

Условия современного транспортно-логистического бизнеса, его цифровизация [1] и быстрая трансформация запросов клиентов требуют от железнодорожного транспорта выработки персональных клиентоориентированных решений «под ключ», т. е. комплексного проектирования с учетом специфики работы клиента-заказчика, а также анализа альтернативных вариантов [2].

Одним из высокодоходных сегментов бизнеса компании ОАО «РЖД» является терминально-складской, который успешно реализуется ее транспортно-логистическим бизнес-блоком Холдинга и составляет в портфеле услуг не менее 20 % [3].

Это определяет важность привлечения клиентов на терминальную сеть (о чем говорится и в Транспортной Стратегии РФ до 2030 года [4]) и предложения им уникальных логистических решений в формате «Build-to-suit» (BTS, с англ. – строительство на заказ). В формате BTS

терминально-складские объекты возводятся или модернизируются под нужды и требования конкретного клиента-заказчика, учитывая типологию его грузов и контрагентов.

Цель работы – поиск персонального логистического решения по развитию терминально-складской инфраструктуры станции с анализом альтернативных вариантов для крупного клиента-грузовладельца.

Станция находится на двухпутном электрифицированном участке Транссибирской магистрали. На основании данных о размерах прибытия, отправления и распределения вагонов по грузовым пунктам построена диаграмма точных вагонопотоков (рис. 1).

Диаграмма, представленная на рис. 2, показывает, что грузо- и вагонооборот в целом по станции увеличивается, однако, если рассмотреть величины погрузки и выгрузки отдельно по каждому пункту грузопереработки, видно,

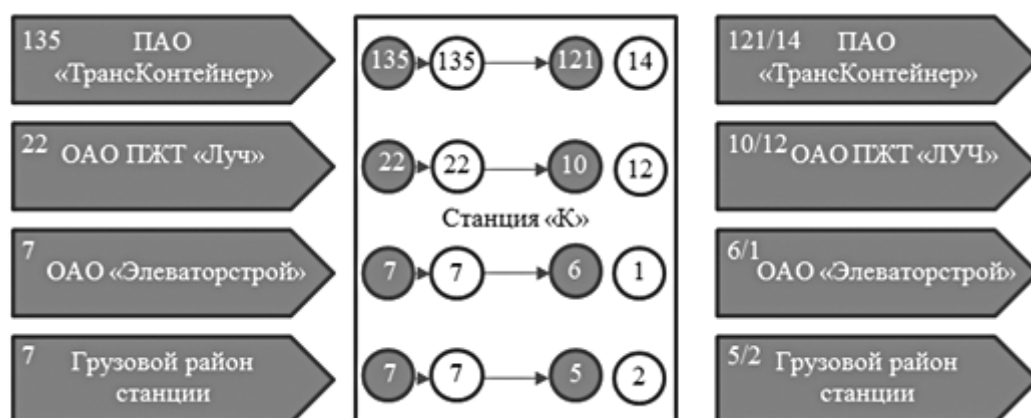


Рис. 1. Диаграмма вагонопотоков по станции «К»:

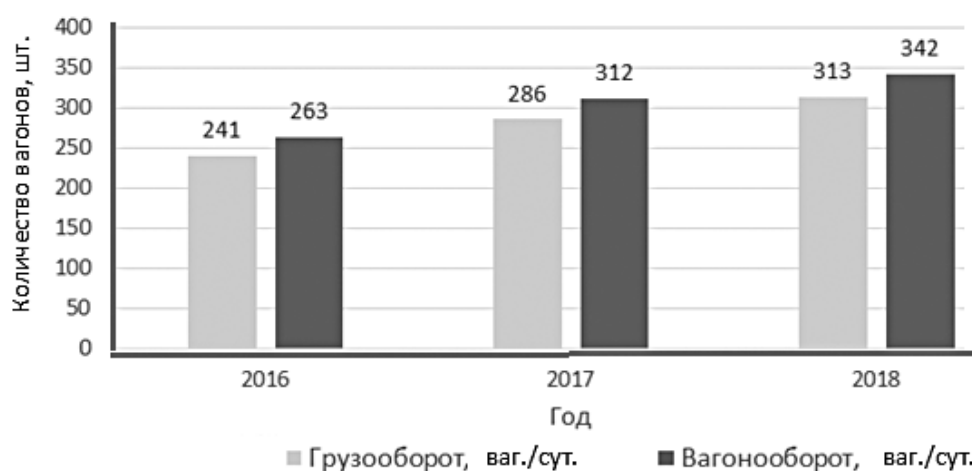
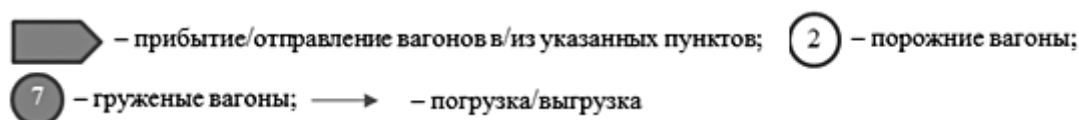


Рис. 2. Динамика изменения грузо- и вагонооборота с 2016 по 2018 г.

что показатели прирастают только за счет ПАО «ТрансКонтейнер». У остальных участников выявлен спад грузооборота.

Наибольший спад в объемах грузопереработки наблюдается у грузового района станции. Грузовые операции на грузовых пунктах района производятся силами ДЗО ОАО «РЖД», а большая часть этих операций (более 72%) выполняется на складах № 1 и 2. Необходимость предотвращения дальнейшего спада объемов послужила одной из причин выбора

в качестве основной темы совершенствование объектов терминально-складского комплекса станции.

В настоящее время клиенты имеют потребность в складах высокого класса (A+, A, B). Однако в транспортном узле нахождения станции значительная часть складских помещений находится в сегменте классов C и D.

В последние годы обнаружена положительная динамика отраслей экономики, пользующихся услугами складской недвижимости вы-

сокого класса. Вместе с тем пропорциональный рост предложения складских помещений класса А и А+ на рынке в достаточном объеме отсутствует.

Также стоит отметить, что на станции расположен крупный контейнерный терминал, для обслуживания которого необходимы качественные складские помещения. В настоящее время накопление грузов на контейнерные поезда происходит в складах, находящихся в различных частях города.

Исходя из этого, рассматривались два варианта персонального логистического решения для клиента-грузовладельца с расчетом экономической эффективности каждого:

- строительство нового транспортно-складского комплекса класса А;
- модернизация и развитие существующего транспортно-складского комплекса.

Предполагается, что строительство нового складского комплекса будет осуществляться на территории нефункционирующего сейчас шпалопропиточного завода. Свободная площадь – 41 000 м². Площадь нового складского комплекса – 13 500 м², длина – 180 м, ширина – 75 м и высота – 10 м.

При проведении расчетов были использованы такие методики:

- позиционирования складского комплекса в цепях поставок – согласно [5–10];
- оценки клиентоориентированности – согласно [11–14];
- построения структуры складского комплекса – согласно [6, 7, 15–17];
- расчета параметров складского комплекса как логистического объекта – согласно [2, 7, 11, 12];
- управления внутренними бизнес-процессами и технологией – согласно работам [6, 9, 10, 18];
- оценки экологической составляющей – согласно [19–24].

Итак, проектирование и строительство современного складского комплекса включает в себя следующие этапы:

- анализ и прогнозирование товарных и транспортных потоков: на данном этапе проводятся

маркетинговые исследования региона расположения складского комплекса;

- разработка варианта размещения склада на участке с учетом ограничений: на этом этапе оценивается территория застройки, выбираются вид застройки складской территории, оптимальная площадь склада и форма, создается система примыкания авто- и железных дорог и стоянки автомобилей;

- определение количества доков для автомобилей и докового оборудования;

- решение по планировке склада: на данном этапе производится топология зон склада;

- анализ и выбор технологии хранения и грузообработки с учетом отраслевой специфики предприятия: на данном этапе выбираются конструкция стеллажного оборудования, вид подъемно-транспортного оборудования и оборудования для работы с товаром (упаковочное, весовое);

- разработка схемы складского технологического процесса;

- расчет количества обслуживаемого персонала;

- выбор автоматизированной системы управления складом.

Для уменьшения обследуемой площади рекомендуется применение «косых» доков, т. е. установленных под углом к стене склада. При этом рекомендуется направлять угловое отклонение от стены здания против часовой стрелки, так как подобное расположение предполагает максимальный обзор для водителя при постановке машины к доку. В результате была разработана схема устройства площадки вдоль здания склада, приведенная на рис. 3.

С учетом ограничений площадь склада составила 13,5 тыс. м². При этой площади необходимо 14 приемных доков для автомобилей.

Генеральный план застройки территории с учетом имеющихся ограничений представлен на рис. 4.

В качестве второй очереди до 2023 г. предложено строительство контейнерной площадки силами и средствами ПАО «ТрансКонтейнер». Строительство площадки даст положительный эффект для ПАО «ТрансКонтейнер» и ОАО

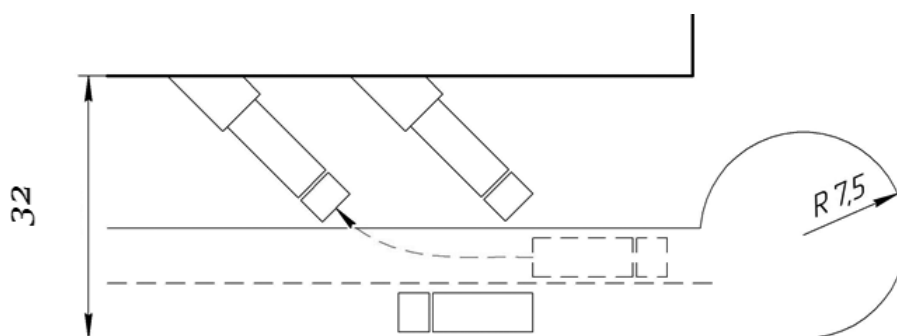


Рис. 3. Схема устройства площадки вдоль здания склада (размеры указаны в метрах)

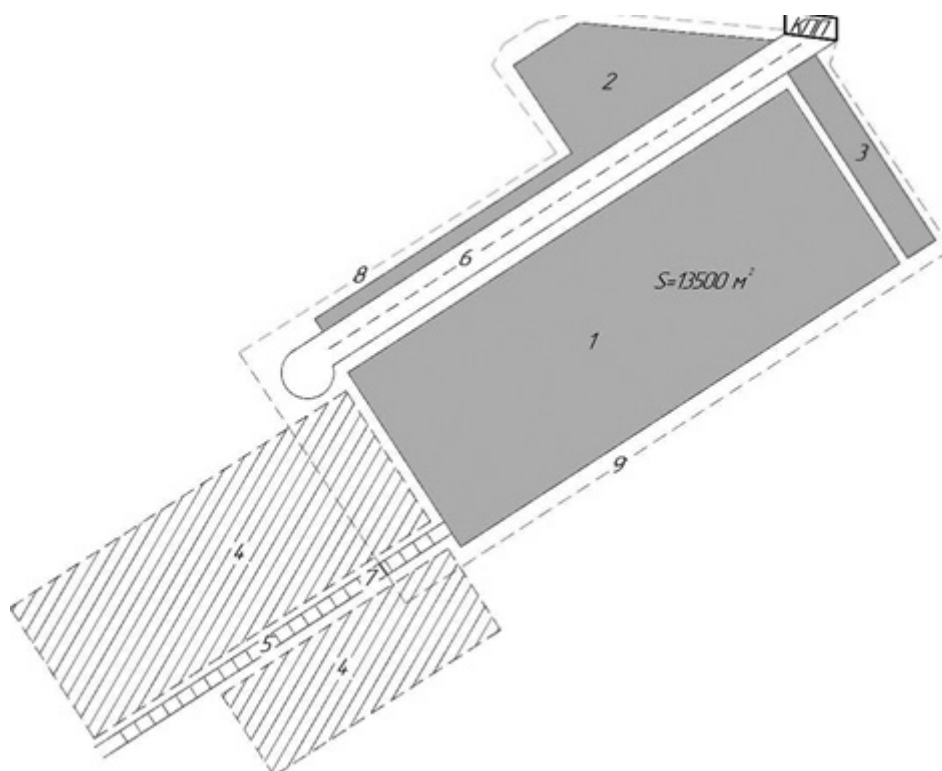


Рис. 4. Генеральный план застройки территории с учетом ограничений:

1 – помещение склада; 2 – места возможной стоянки грузового автотранспорта; 3 – места возможной стоянки легкового автотранспорта и установки вспомогательных устройств; 4 – площадь для перспективного создания контейнерной площадки; 5 – железнодорожный путь, примыкающий к пути № 27 станции; 6 – автодорога; 7 – въездные ворота; 8 – имеющееся ограждение высотой 2 м; 9 – места установки ограждений

«РЖД», так как ПАО «ТрансКонтейнер» будет получать доход от переработки контейнеров, а ОАО «РЖД» – от выгрузки грузов из части контейнеров на склад.

Часть выгружаемых контейнеров (20–23 контейнера в сутки) впоследствии грузятся на кон-

тейнеровоз и отправляются на различные складские комплексы для дальнейшего хранения. Получатель груза в таком случае несет дополнительные расходы на перемещение контейнера до складского комплекса, тем более при условии, что складской комплекс находится в противо-

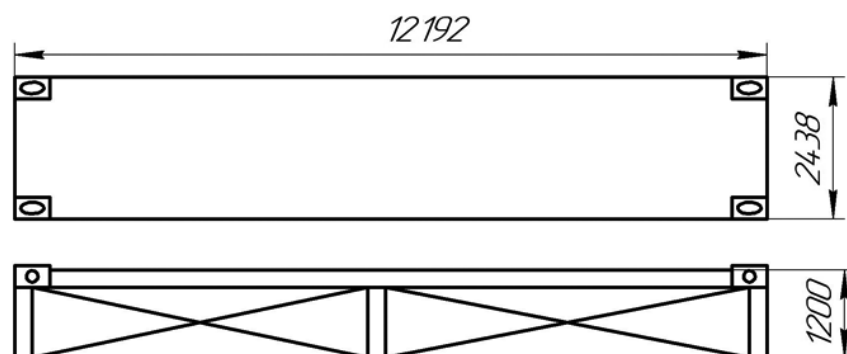


Рис. 5. Горизонтальная рампа для выгрузки контейнеров (размеры указаны в миллиметрах)



Рис. 6. Алгоритм типового технологического процесса складского комплекса

положном направлении от пункта потребления товаров.

Поэтому данную часть контейнеров после строительства контейнерной площадки предложено выгружать на складской комплекс. Для выгрузки потребуются, чтобы контейнер устанавливался на одном уровне с уровнем пола склада, для чего разработана схема горизонтальной мобильной рампы с фитингами для перемещения рампы ричстакером (рис. 5).

Принципиальная технология работы предлагаемого складского комплекса показана на рис. 6.

Был выполнен расчет инвестиционных затрат по первому и второму вариантам, которые

составили 537 351,4 и 4454,2 тыс. руб. соответственно.

Было произведено моделирование денежных потоков и рассчитаны основные показатели экономической эффективности:

- для первого варианта чистый дисконтированный доход (ЧДД) составил 318 450 тыс. руб. при сроке окупаемости в 6,7 лет;
- для второго варианта ЧДД = 6473 тыс. руб. при сроке окупаемости в 2,8 лет.

Таким образом, доказана экономическая эффективность предложенных альтернативных вариантов персонального логистического решения для клиента. Варианты представлены клиенту-заказчику для реализации.

Библиографический список

1. Цифровая логистика. – URL : <https://issek.hse.ru/trendletter/news/217282293.html> (дата обращения : 15.02.2020 г.).
2. Loffredo A. Digital work in the transport sector : In search of the employer / A. Loffredo, M. Tufo // *Work Organisation, Labour and Globalisation*, 2018. – Vol. 12 (2). – P. 23–37. DOI : 10.13169/workorglaboglob.12.2.0023
3. 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.
4. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. – Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22.11.2008 г. № 1734-р. – URL : http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704 (дата обращения : 15.02.2020 г.).
5. Шехтер Д. Логистика : искусство управления цепочками поставок / Д. Шехтер, Г. Сандер ; пер. с англ. – М. : Претекст, 2008. – 230 с.
6. Управление цепями поставок : учебник изд-ва Gower / под ред. Дж. Гатторны (ред. Р. Огулин, М. Рейнольдс) ; пер. с 5-го англ. изд. под науч. ред. В. И. Сергеева. – М. : ИНФРА-М, 2008. – 670 с.
7. Маликов О. Б. Контейнерные терминалы : устройство, оборудование, проектирование, исследования / О. Б. Маликов. – Саарбрюкен, Германия : Lambert Academic Publishing, 2014. – 257 с.
8. Покровская О. Д. Состояние транспортно-логистической инфраструктуры для угольных перевозок в России / О. Д. Покровская // *Инновационный транспорт*. – 2015. – № 1 (15). – С. 13–23.
9. 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.
10. Покровская О. Д. Комплексная оценка транспортно-складских систем железнодорожного транспорта : дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 05.22.08 / О. Д. Покровская. – СПб. : ПГУПС, 2018. – 377 с.
11. Покровская О. Д. Организация работы складской распределительной системы : учеб. пособие / О. Д. Покровская. – Новосибирск : ЦРНС, 2015. – 72 с.
12. Покровская О. Д. Организация международной доставки груза через распределительный центр : учеб. пособие / О. Д. Покровская. — Новосибирск : Центр развития научного сотрудничества, 2015. – 102 с.
13. Покровская О. Д. Понятийный аппарат терминалистики / О. Д. Покровская, Т. С. Титова // *Бюл. результатов науч. исследований*. – 2018. – Вып. 2. – С. 29–43.
14. 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.
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. Формирование терминальной сети региона для организации перевозок грузов : монография / О. Д. Покровская. – Москва : ТрансЛит, 2012. – 192 с.
17. 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.
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. Ахтямов Р. Г. Производственная и промышленная безопасность при обращении с отходами / Р. Г. Ахтямов, Т. С. Титова. – Саарбрюкен, Германия : Lambert Academic Publishing, 2016. – 145 с.
20. Ахтямов Р. Г. Геоэкологические проблемы обеспечения безопасности при обращении с отходами / Р. Г. Ахтямов, Т. С. Титова. – Саарбрюкен, Германия : Lambert Academic Publishing, 2016. – 109 с.
21. Titova T. S. Lifetime of Earth Dams / T. S. Titova, A. Longobardi, R. G. Akhtyamov, E. S. Nasyrova // *Инженерно-строит. журн.* – 2017. – № 1 (69). – С. 34–43.
22. Покровская О. Д. Определение параметров терминальной сети региона (на примере Кемеровской области) / О. Д. Покровская // *Транспорт Урала*. – 2012. – № 1(32). – С. 93–97.

23. Титова Т.С. Экологические проблемы транспортного строительства / Т.С. Титова, А.А. Степанова // Техносферная и экологическая безопасность на транспорте (ТЭБТРАНС–2014) : Материалы IV Международ. науч.-практич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2014. – С. 202–204.

24. Svatovskaya L. B. Foam concrete construction demolished waste / L. B. Svatovskaya, M. V. Shershneva, M. M. Baidarashvili, A. M. Sychova, T. S. Titova, N. I. Yakimova, A. V. Khitrov // Proceedings of the International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling : Construction Demolition Waste International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling. Sponsors : Kingston University, Concrete and

Masonry Research Group, UK ; eds by M. C. Limbachiya, J. J. Roberts. London, United Kingdom : Kingston University, School of Engineering, 2004. – P. 199–203.

Дата поступления: 17.02.2020

Решение о публикации: 24.02.2020

Контактная информация:

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

ЗАБОЛОЦКАЯ Ксения Алексеевна – аспирант-стажер; insight1986@inbox.ru

НОВИКОВА Ирина Дмитриевна – аспирант-стажер; insight1986@inbox.ru

Build-to-suit solution in the terminal and logistics service segment

O. D. Pokrovskaya, K. A. Zabolotskaya, I. D. Novikova

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

For citation: Pokrovskaya O. D., Zabolotskaya K. A., Novikova I. D. Build-to-suit solution in the terminal and logistics service segment. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 1, pp. 35–43. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-35-43

Summary

Objective: Consideration of a Build-to-suit logistics solution for a client of a railway station. **Methods:** Analytics, statistics, logistics, economics, and mathematical modeling. Technical, operational and economic calculations of the parameters of the terminal and warehouse complex project for a large customer-cargo owner of a railway station have been carried out. **Results:** The alternative development options have been analyzed; the complex plan has been developed. **Practical importance:** Taking into account the customer-focused and innovative logistics approach in the operation of a real railway station allows applying the study findings in practice.

Keywords: Build-to-suit, cargo terminal, customer-focused approach, terminal and warehouse infrastructure, designing, feasibility study.

References

1. *Digital Logistics*. Available at: <https://issek.hse.ru/trendletter/news/217282293.html> (accessed: 15.02.2020). (In Russian)

2. Loffredo A. & Tufo M. Digital work in the transport sector: In search of the employer. *Work Organisation,*

Labour and Globalisation, 2018, vol. 12 (2), pp. 23–37. DOI:10.13169/workorgalaboglob.12.2.0023

3. *Ekonomika Rossii: proshloye, nastoyashcheye, budushcheye*. Kollektivnaya monografiya [Russian economy: past, present, future. Collective Monograph]. Under

general editorship of N.A. Adamov. Moscow, Institute for the Study of Product Distribution and Wholesale Market Publ., 2014, 248 p. (In Russian)

4. *Transport Strategy of the Russian Federation through 2030*. Approved by Decree of the Government of the Russian Federation N 1734-r (1734-p) dated November 22, 2008. Available at: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?id=3771&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704 (accessed: 15.02.2020). (In Russian)

5. Schechter D. & Sander G. Delivering the goods: The art of managing your supply chain. Translated from German. Moscow, Pretext Publ., 2008, 230 p. (In Russian)

6. *Upravlenie tzepiami postavok [Gower handbook of supply chain management]*. Ed. by J. Gattorna (eds.: R. Ogulin, M. Reynolds). Translation from the 5th English edition under the scientific editorship of V.I. Sergeyev. Moscow, INFRA-M Publ., 2008, 670 p. (In Russian)

7. Malikov O.B. *Konteynernyye terminaly: ustroystvo, oborudovaniye, proyektirovaniye, issledovaniya [Container terminals: arrangement, equipment, design, research]*. Saarbrücken, Germany, Lambert Academic Publishing, 2014, 257 p. (In Russian)

8. Pokrovskaya O.D. Sostoyaniye transportno-logisticheskoy infrastruktury dlya ugol'nykh perevozok v Rossii [The state of transport and logistics infrastructure in Russian coal transportation industry]. *Innovatsionnyy transport [Innovative Transport]*, 2015, no. 1 (15), pp. 13–23. (In Russian)

9. Pokrovskaya O.D. & Samuylov V.M. Mezhdunarodnaya logistika Transsibirskoy magistrali: ispol'zovaniye tranzitnogo potentsiala Rossii [International logistics of the Trans-Siberian Railway: the use transit potential of Russia]. *Innovatsionnyy transport [Innovative Transport]*, 2016, no. 3 (21), pp. 3–7. (In Russian)

10. Pokrovskaya O.D. *Kompleksnaya otsenka transportno-skladskikh sistem zheleznodorozhnogo transporta [Comprehensive assessment of storage-retrieval systems of railway transport]*. Dis. ... d-ra tekhn. nauk, spetsialnost': 05.22.08 [Dissertation of D. Sci. in Engineering, specialty: 05.22.08]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, 377 p. (In Russian)

11. Pokrovskaya O.D. *Organizatsiya raboty skladskoy raspredelitel'noy sistemy*. Ucheb. posobiye [Organization of the operation of the warehouse distribution system. Training manual]. Novosibirsk, TsRNS [Scientific Co-

operation Development Center] Publ., 2015, 72 p. (In Russian)

12. Pokrovskaya O.D. *Organizatsiya mezhdunarodnoy dostavki gruzha cherez raspredelitel'nyy tsentr*. Ucheb. posobiye [Organization of international cargo delivery through a distribution center. Training manual]. Novosibirsk, Tsentr razvitiya nauchnogo sotrudnichestva [Scientific Cooperation Development Center] Publ., 2015, 102 p. (In Russian)

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

14. Pokrovskaya O.D. & Malikov O.B. Evolyutsionno-funktsional'nyy podkhod k klassifikatsii transportnykh uzlov [Evolutionary functional approach to transport nodes classification]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, vol. 14, iss. 3, pp. 406–419. (In Russian)

15. Pokrovskaya O.D. & Malikov O.B. Voprosy logisticheskoy iyerarkhii zheleznodorozhnykh ob'yektov [Concerning the logistics hierarchy of railway facilities]. *Proceedings of Petersburg Transport University*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, iss. 4 (49), pp. 521–531. (In Russian)

16. Pokrovskaya O.D. *Formirovaniye terminal'noy seti regiona dlya organizatsii perevozok gruzov [Developing a regional terminal network for the cargo transportation organization]*. Monograph. Moscow, TransLit Publ., 2012, 192 p. (In Russian)

17. Pokrovskaya O.D. Evolyutsionno-funktsional'nyy podkhod k razvitiyu transportnykh uzlov [Evolutionary functional approach to transport nodes development]. *Politransportnyye sistemy*. Materialy IX Mezhdunarodnoy nauch.-tekhnich. konferentsii [Politransport systems. Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference]. Novosibirsk, Siberian State Transport University Publ., 2017, pp. 233–238. (In Russian)

18. Samuylov V.M., Pokrovskaya O.D. & Cong Q. Kontseptsiya "Novii Shelkoviue Put" (Kitai, Rossia, Germaniya) ["New silk road" concept (China, Russia, Germany)]. *Innovatsionnyy transport [Innovative Transport]*, 2017, no. 4 (26), pp. 26–28. (In Russian)

19. Akhtyamov R.G. & Titova T.S. Proizvodstvennaya i promyshlennaya bezopasnost' pri obrashchenii s

otkhodami [Occupational and industrial safety in waste disposal]. Saarbrücken, 2016, 145 p. (In Russian)

20. Akhtyamov R. G. & Titova T. S. Geoekologicheskiye problemy obespecheniya bezopasnosti pri obrashchenii s otkhodami [Geoecological problems of ensuring safety in waste disposal]. Saarbrücken, Germany, Lambert Academic Publ., 2016, 109 p. (In Russian)

21. Titova T. S., Longobardi A., Akhtyamov R. G. & Nasyrova E. S. Lifetime of earth dams. *Magazine of Civil Engineering*, 2017, no. 1, pp. 34–43. (In Russian)

22. Pokrovskaya O. D. Opredeleniye parametrov terminal'noy seti regiona (na primere Kemerovskoy oblasti) [Determination of the regional terminal network parameters (exemplified by the Kemerovo region)]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2012, no. 1 (32), pp. 93–97. (In Russian)

23. Titova T. S. & Stepanova A. A. Ekologicheskiye problemy transportnogo stroitel'stva [Environmental problems of transport construction]. *Tekhnosferная i ekologicheskaya bezopasnost' na transporte* [Technosphere and environmental safety in transport] (TEBT-RANS–2014). Materialy IV Mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii [Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2014, pp. 202–204. (In Russian)

24. Svatovskaya L. B., Shershneva M. V., Baidarashvili M. M., Sychova A. M., Titova T. S., Yakimova N. I. & Khitrov A. V. Foam concrete construction demolished waste. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling: Construction Demolition Waste International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling*. Sponsors: Kingston University, Concrete and Masonry Research Group, UK. Eds. by M. C. Limbachiya, J. J. Roberts. London, United Kingdom, Kingston University, School of Engineering Publ., 2004, pp. 199–203.

Received: February 17, 2020

Accepted: February 24, 2020

Author's information:

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

Kseniya A. ZABOLOTSKAYA – Postgraduate Trainee Student; insight1986@inbox.ru

Irina D. NOVIKOVA – Postgraduate Trainee Student; insight1986@inbox.ru

УДК 621.313.33

Моделирование и экспериментальное исследование асинхронного тягового электродвигателя локомотивов при аварийных режимах работы

О. Р. Хамидов

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

Для цитирования: Хамидов О. Р. Моделирование и экспериментальное исследование асинхронного тягового электродвигателя локомотивов при аварийных режимах работы // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 44–54. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-44-54

Аннотация

Цель: Экспериментальное исследование и оценка технического состояния асинхронных тяговых электродвигателей (АТЭД) локомотивов с короткозамкнутым ротором. **Методы:** Используются программно-аппаратный комплекс и методы анализа данных для контроля и диагностики технического состояния АТЭД локомотивов. **Результаты:** Были исследованы неисправности ротора в АТЭД с короткозамкнутым ротором и асимметрии статора. Проведено снятие осциллограмм тока статора АТЭД при различных аварийных режимах работы. Анализ спектров осциллограмм показал имеющиеся отличия амплитуд нечетных гармоник спектра. Приведена классификация неисправностей АТЭД. Представлены спектры тока ротора АТЭД, которые показывают ряд гармонических составляющих, появляющихся из-за асимметрии статора на разных частотах. Разработана модель для оценки технического состояния АТЭД локомотивов, а также обоснована целесообразность упреждающей диагностики, которая дает возможность заблаговременно выявить дефекты на самой ранней стадии их развития. **Практическая значимость:** Результаты проведенных исследований могут быть использованы в системе диагностики состояния АТЭД локомотивов в реальном времени.

Ключевые слова: Диагностика, асинхронный тяговый электродвигатель, нейронные сети, неисправности локомотивов, обрыв стержней ротора, локомотив, экстремальные режимы, моделирование, ток статора, ток ротора, частота тока статора.

Введение

Основными задачами диагностики локомотивных асинхронных тяговых электродвигателей (АТЭД) являются определение текущего состояния и прогнозирование изменения технического состояния локомотивных АТЭД в зависимости от наработки. Локомотивные АТЭД на практике показывают свою выносливость и простоту по эксплуатации. Однако в процессе эксплуатации могут возникать повреждения элементов двигателя, что, в свою очередь, при-

водит к преждевременному выходу его из строя [1, 2]. Локомотивный АТЭД как восстанавливаемый сложный объект в течение срока службы постоянно нуждается в информационном мониторинге, от которого во многом зависит его техническое состояние и качество управления при эксплуатации. Анализ существующих зарубежных и отечественных подходов показывает, что современные системы мониторинга и управления эксплуатацией локомотивных АТЭД многоуровневые, причем нередко эти уровни мало связаны между собой [3–5].

В производстве внезапный выход из строя АТЭД может привести к непоправимым последствиям. Очень важно выявлять любой дефект на самой ранней стадии, исключающей риск возникновения серьезных повреждений АТЭД. Система технической диагностики должна включать в себя регулярный мониторинг технического состояния локомотивных АТЭД, а также поиск неисправностей, повреждений, определение степени опасности дефектов и оценку остаточного ресурса оборудования [6, 7]. Поэтому одной из актуальных задач для железной дороги является проведение диагностики технического состояния АТЭД и локомотива в целом. На рис. 1 приведена классификация неисправностей АТЭД.

Методы обнаружения неисправностей и количественная оценка этих неисправностей были разработаны для конкретного привода, используемого для тяги на железной дороге, а затем экспериментально подтверждены на масштабированном лабораторном прототипе. Неисправности ротора, действительно, не очень часты, однако их обнаружение на начальной стадии является ключевым моментом, поскольку последовательность их отказов медленная. На самом деле эволюция во времени от первопричин до реальных отказов (последовательность отказов) сильно отличается в зависимости от различных типов отказов. Если последовательность отказов быстрая, то эффективный мониторинг состояния невозможен, и это ситуация для электрических неисправностей, обнаруженных за-

щитой, где период действия может составлять только секунды или циклы переменных электрической машины. Однако, если последовательность отказов составляет дни, недели или месяцы, мониторинг состояния может обеспечить раннее предупреждение о надвигающемся сбое. Для неисправностей ротора последовательность неисправностей составляет дни и, если она не будет должным образом устранена, может перерасти в катастрофическую неисправность такую, как статорная или механическая. Следовательно, обнаружение неисправности ротора АТЭД на ранней стадии полезно для настройки работы после неисправности, которая должна безопасно доставить поезд на следующую станцию с соответствующим уровнем производительности.

Обозначим f частоту статора и s проскальзывание ротора; в статоре и роторе существуют только частоты f и sf соответственно. Наличие повреждения в обмотке ротора приводит к уравновешенным токам ротора, которые генерируют вращающееся в обратном направлении магнитное поле, связанное с обратной составляющей последовательности тока на частоте $-sf$. Такая обратная последовательность отражается на стороне статора, создавая частоту $(1-s)f$. Эти частотные компоненты генерируют электромагнитные и механические взаимодействия между статором и ротором. Таким образом, что касается асимметрии ротора, если электродвигатель питается с постоянной частотой ($f=50$ Гц) и учитывается эффект пульсации скорости [6–9],

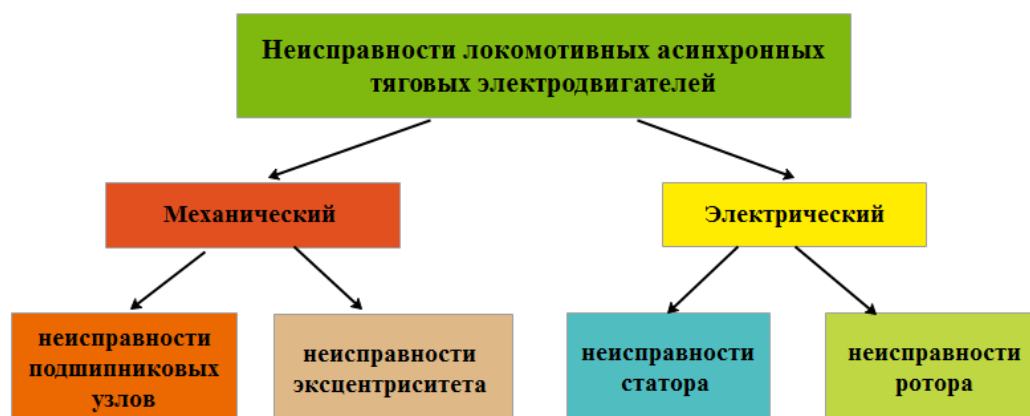


Рис. 1. Классификация неисправностей АТЭД локомотивов

в статоре будут присутствовать следующие цепочки гармоник, включая основную и переменные ротора соответственно [9–11]:

$$f_{krs} = (1 \pm ks)f, \quad (1)$$

$$f_{kr} = \pm (1 + ks)f, \quad (2)$$

где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$.

Таким образом, наличие неисправности в обмотке статора приводит к несбалансированным его токам, которые генерируют магнитное поле, вращающееся в обратном направлении, что связано с компонентом обратной последовательности тока на частоте $-f$. Обратная последовательность, отраженная на стороне ротора, дает частоту $(s - 2)f$ для величин ротора. Эти частотные компоненты генерируют электромагнитные и механические взаимодействия между статором и ротором на частоте $2f$, что, в свою очередь, приводит к распространению частот. Таким образом, отражение гармоник из-за оттока статора можно суммировать следующим образом [11–15]:

- первая гармоническая составляющая в спектре тока ротора равна $(s - 2)f$;
- частота ротора $(s - 2)f$ уступает крутящему моменту, а затем колебанию скорости на частоте $2f$;
- колебание скорости вызывает как ток реакции на частоте $(s - 2)f$ в роторе, так и новый компонент на частоте $(s + 2)f$;
- частота тока ротора $(s + 2)f$ взаимодействует с возникающим крутящим моментом и колебанием скорости на частоте $2f$ и индуцирует электродвижущую силу (ЭДС) статора на частоте $3f$, вызывая новые гармоники тока статора на частотах $\pm 3f$.

Последние гармоники вызывают реакцию на части ротора и генерируют новую частотную составляющую в точке $(4 - s)f$ на стороне ротора и т. д. Это обсуждение показывает, что дисимметрия ротора или статора непосредственно отражается на спектрах токов статора и ротора. Метод диагностики с использованием анализа текущей сигнатуры основан на мониторин-

ге конкретных частот тока статора или ротора, связанных с их неисправностями. В частности, для повреждения ротора наиболее подходящие частоты – это $(1 - 2s)f$ в токах статора и $-sf$ в токах ротора (т. е. гармоники повреждения первого порядка, поступающие из (1) и (2) соответственно). В случае короткого замыкания статора наиболее релевантными частотами являются $-f$ в токах статора и $(s - 2)f$ в токах ротора (т. е. гармоники короткого замыкания первого порядка, поступающие из (1) и (2) соответственно).

Было проведено моделирование асимметрии роторов, чтобы точно предсказать поведение АТЭД в неисправных условиях [5–11]. Неисправности ротора АТЭД, т. е. обрыв стержней, были смоделированы простым увеличением сопротивления одного стержня ротора короткозамкнутого ротора, в результате чего ток, протекающий в нем, практически равен нулю. Для моделирования асинхронного тягового привода локомотива значительная часть системы управления, применяемой в имитационной модели, были использованы данные и параметры моделируемого двигателя. Исходными параметрами служили характеристики АТЭД локомотива [1, 9, 14], которые приведены в таблице.

Такие тесты были выполнены, для того чтобы оценить чувствительность токов статора к повреждениям ротора и выяснить, можно ли считать их спектр или спектр их пространственного вектора надежным диагностическим показателем. Для этого моделирование сначала выполнялось с двигателем, работающим в установленном режиме. На рис. 2 показаны токи статора для двигателя, работающего с постоянной скоростью, соответствующей скорости 100 км/ч для всего поезда, и при 20 % от номинального крутящего момента. Данная цифра относится к электродвигателю, работающему с двумя оборванными стержнями, четко показывающими наличие гармоник боковой полосы неисправности, амплитуду которых можно отслеживать, чтобы обеспечить эффективное обнаружение неисправности ротора АТЭД локомотива.

В этом анализе только две первые гармоники боковой полосы были приняты во внимание,

Технические параметры АТЭД

Параметры	Значение
Номинальная мощность, кВт	400
Номинальное напряжение статора, В	1400
Номинальный ток статора, А	185
Номинальная частота, Гц	66
Активное сопротивление статора R_s , Ом	0,04
Активное сопротивление ротора R_r , Ом	0,065
Индуктивности фазы статора L_s , Ом	0,598
Индуктивности фазы ротора L_r , Ом	0,327
Взаимные индуктивности L_m , Ом	21,63
Инерция, кгм ²	5,63
Количество пар полюсов	2
Количество стержней ротора	38

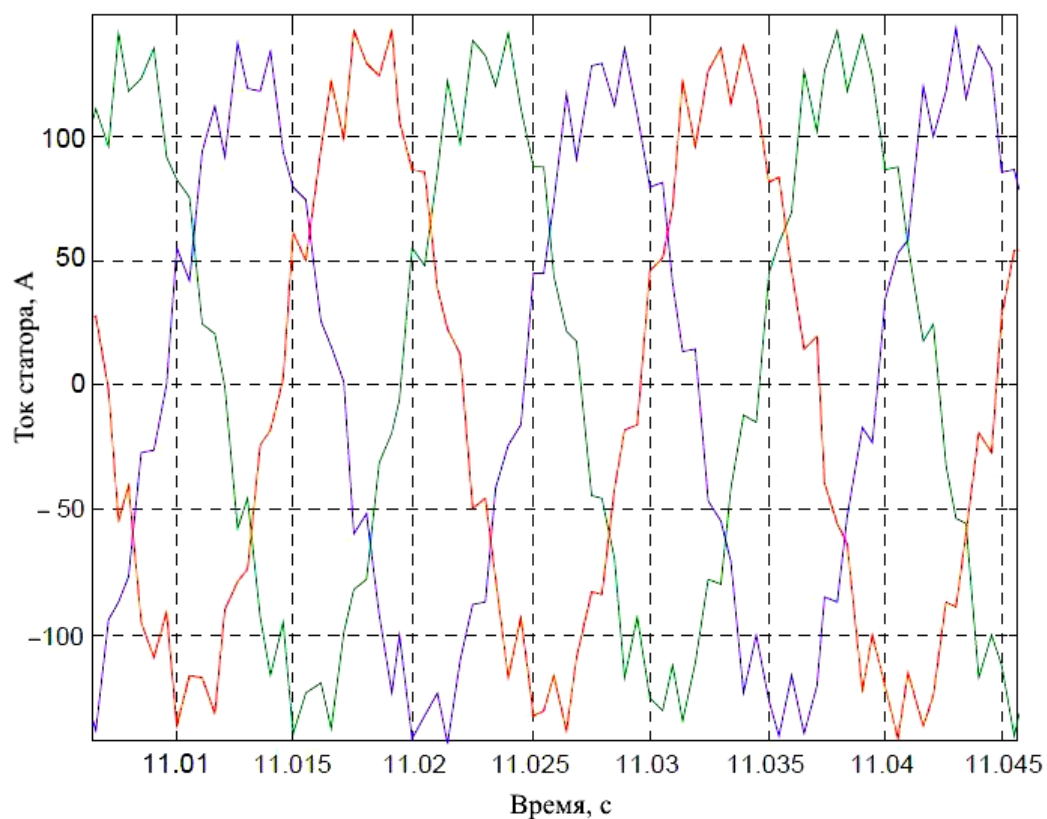


Рис. 2. Результаты моделирования для неисправного асинхронного тягового привода с оборванными стержнями (токи статора)

т. е. $(1 \pm 2sf)$, для вычисления надежного диагностического индекса. Последующие гармоники из-за механизма распространения частоты повреждения ротора игнорировались (а именно $(1 - 4sf)$ гармонические составляющие). Как только выяснилось, что токи статора достаточно чувствительны к повреждениям ротора, переходные процессы двигателя были смоделированы и изучены с целью проверки эффективности предложенного метода демодуляции [6–8]. На рис. 3 представлены спектры тока АТЭД локомотивов в установившемся режиме работы с двумя оборванными стержнями.

В начале переходного процесса задание крутящего момента увеличивается с максимальным уклоном, ограниченным системой управления, затем примерно через 3–4 с задание крутящего момента ограничивается, поскольку достигается максимальный доступный крутящий момент, включая перегрузку. В режиме постоянного крутящего момента двигатель может быть перегружен до двукратного номинального крутящего

момента. После этого предел крутящего момента, определяемый допустимой перегрузкой, снижается со скоростью из-за обратной ЭДС, которая уменьшает доступное напряжение. Форма волны крутящего момента и составляющих тока статора во время этого переходного процесса представлена на рис. 4 для неисправного АТЭД. Колебания на частоте $2sf$ хорошо видны на токах в синхронной системе отсчета. Эти колебания являются следствием асимметрии ротора, вызванной двумя смоделированными прерывистыми стержнями, и соответствует двум гармоникам боковых полос на токах статора в системе отсчета статора.

На рис. 5 показаны формы импульса тока статора АТЭД локомотивов, соответственно в исправном (а) и неисправном (б) состояниях во время описанного выше переходного процесса. Спектры показывают, что анализ сигнатур в таких случаях невозможен из-за большого разброса частоты и скорости. Следовательно, компоненты боковой полосы, связанные с неис-

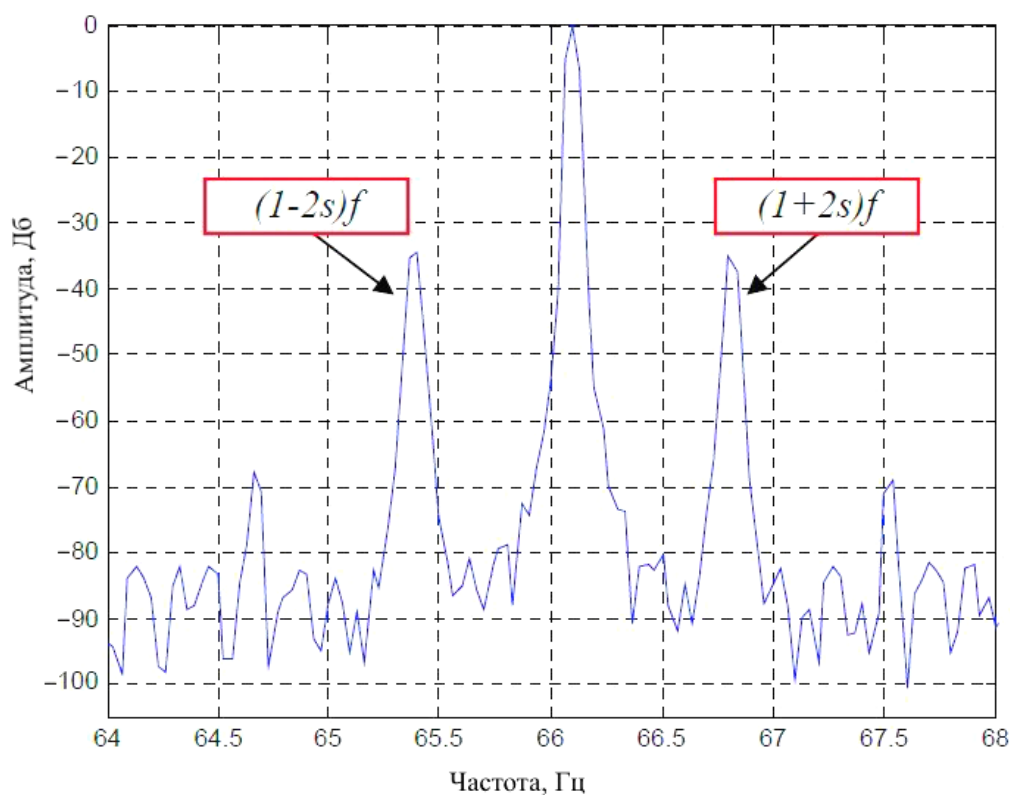


Рис. 3. Спектры тока АТЭД локомотивов в установившемся режиме работы с двумя оборванными стержнями

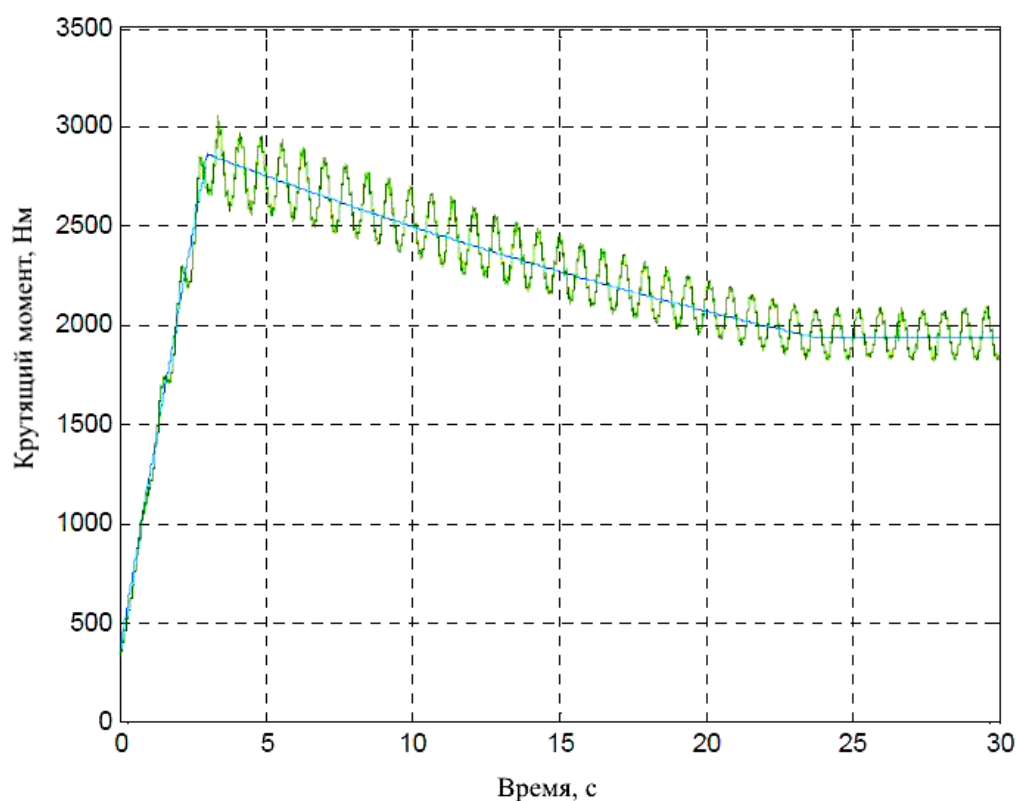


Рис. 4. Результаты моделирования для неисправного АТЭД

правностями, распространяются в широком частотном диапазоне.

На рис. 6 представлены результаты моделирования для неисправного АТЭД.

Программно-аппаратный комплекс для диагностирования АТЭД

Наиболее удачным методом является использование программно-аппаратного комплекса, который изображен на рис. 7, состоящего из компьютера и цифрового устройства-посредника, производящего необходимые измерения и передаваемого их в компьютер. Программа, выполняемая на компьютере, должна, в свою очередь, определенным образом обработать входную информацию и определить наиболее вероятный вид повреждения работающего электродвигателя или установить его исправность. Этот метод наиболее эффективен, так как позволяет хранить на компьютере большие базы данных с информацией об отслеживаемой динамике

повреждений электродвигателя с последующим прогнозированием выхода его из строя [4,9,12].

В настоящее время широкое распространение получило использование искусственных нейронных сетей (ИНС) для построения математических моделей сложных нелинейных процессов, распознавания образов и прогнозирования сигналов. Результаты экспериментального исследования, а также моделирования неисправностей АТЭД в среде MATLAB/Simulink в дальнейшем будут применены при создании обучающей выборки в технологии ИНС для диагностики АТЭД локомотивов.

Заключение

Полученные результаты моделирования и экспериментального исследования, аналогичного тому, которое обычно используется в асинхронных тяговых приводах локомотива, демонстрируют эффективность предложенного метода

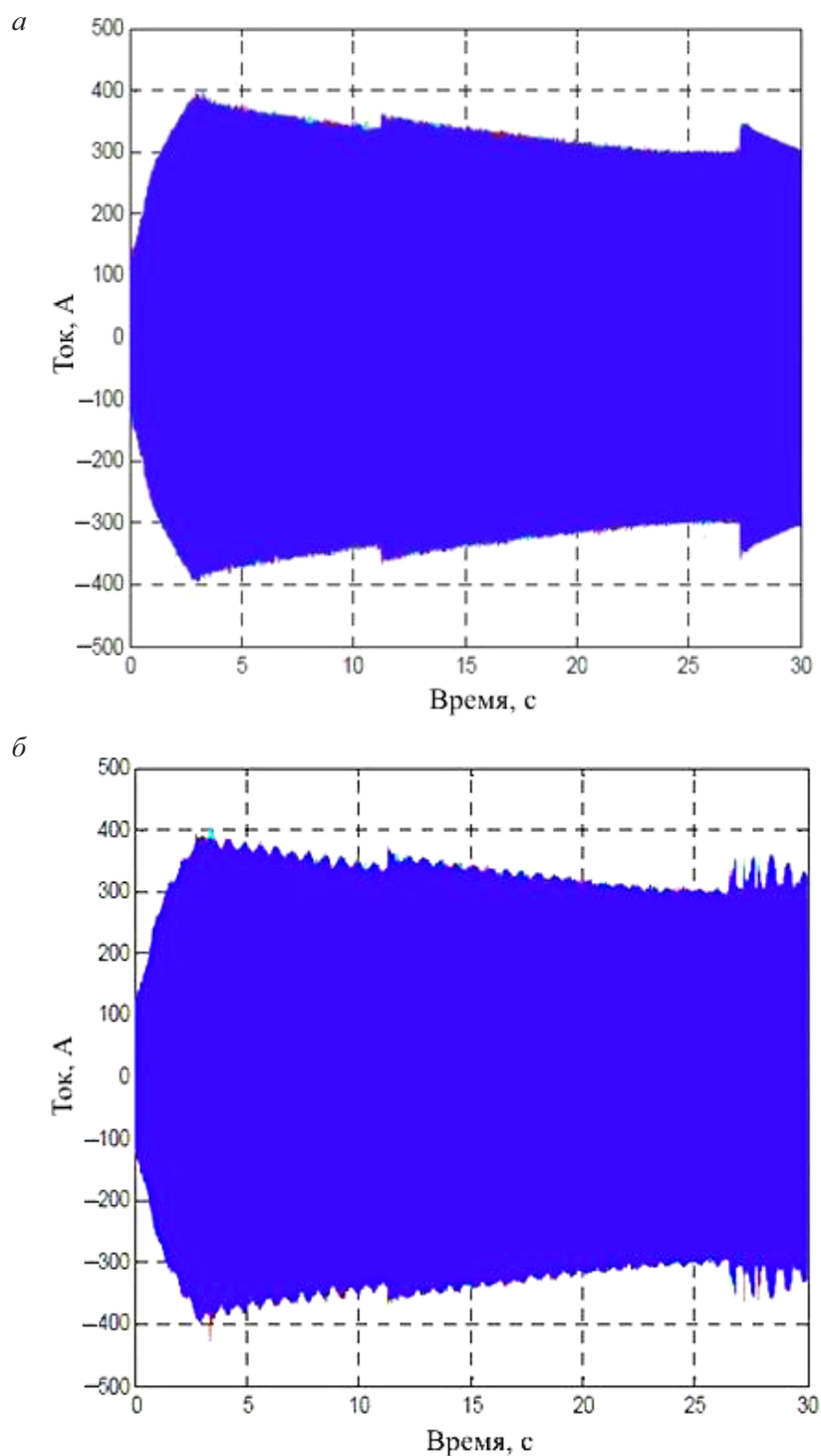


Рис. 5. Результаты моделирования исправного (а) и неисправного (б) АТЭД: формы тока статора в течение рассматриваемого переходного процесса ускорения с двумя оборванными стержнями ротора

в качестве инструмента для диагностики ротора. Разработанная экспериментальная установка является работоспособной и дает возможность

измерять осциллограмму тока двигателя. Анализ построенных спектров показал различия между режимами работы АТЭД, что позволяет

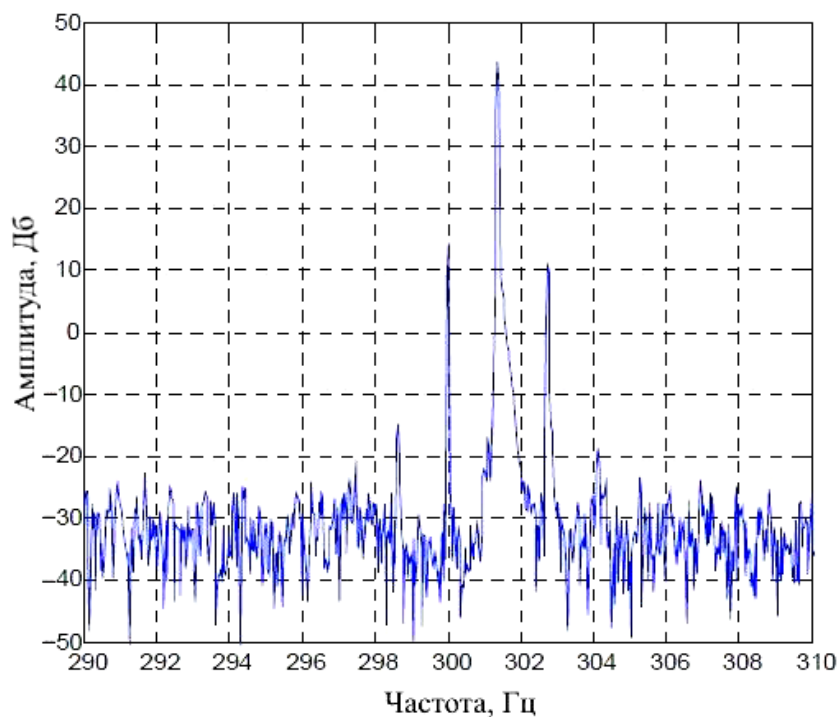


Рис. 6. Результаты моделирования неисправности АТЭД с одним обрывом стержней ротора

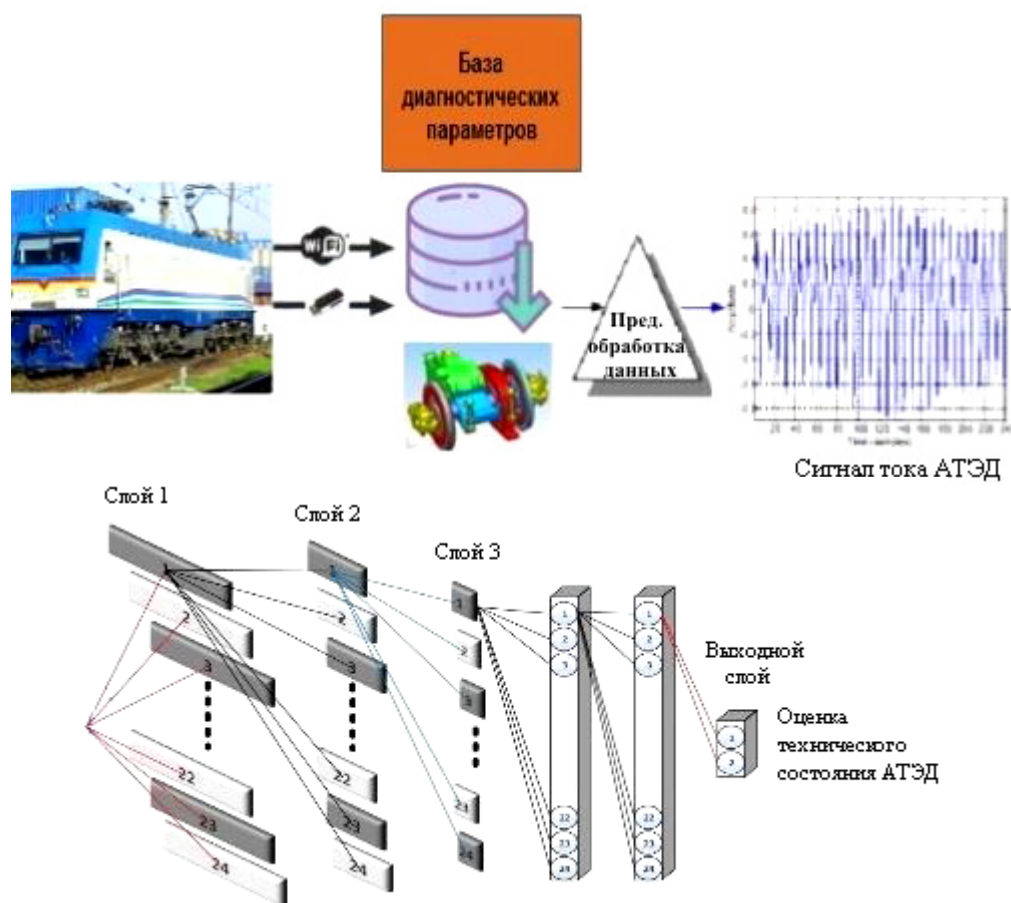


Рис. 7. Программно-аппаратный комплекс для диагностирования АТЭД локомотивов

идентифицировать аварийные режимы работы двигателя. По нашему мнению, следует внести данные в нейронную сеть с целью идентификации вида режима работы АТЭД локомотивов.

Библиографический список

1. Хамидов О. Р. Разработка методики комплексного диагностирования асинхронного тягового электродвигателя подвижного состава железнодорожного транспорта / О. Р. Хамидов, О. Т. Касымов // Материалы конференций ГНИИ «Нацразвитие» : сб. избр. статей. – СПб. : ГНИИ «Нацразвитие», 2017. – С. 32–39.
2. Грачев В. В. О достоверности прямых способов оперативного контроля энергоэффективности тепловозов в эксплуатации / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский // Вестн. Ин-та проблем естественных монополий : Техника железных дорог. – 2018. – № 2 (42). – С. 40–48.
3. Грищенко А. В. Новые электрические машины локомотивов : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / А. В. Грищенко, Е. В. Козаченко. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2008. – 271 с.
4. Хамидов О. Р. Оценка технического состояния асинхронных тяговых электродвигателей электровозов серии «UZ-EL» средствами вибродиагностики / О. Р. Хамидов, О. Т. Касымов // Материалы конференций ГНИИ «Нацразвитие» : сб. избр. статей. – СПб. : ГНИИ «Нацразвитие», 2017. – С. 13–19.
5. Bellini A. Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis / A. Bellini, F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, G. B. Kliman // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2001. – Vol. 37. – P. 1248–1255.
6. Грачев В. В. Влияние параметрических отказов оборудования тепловоза на его энергоэффективность в эксплуатации / В. В. Грачев, Ю. И. Клименко, В. А. Перминов, Д. Н. Курилкин, А. В. Фролов // Локомотив. – 2017. – № 4. – С. 40–45.
7. Хамидов О. Р. Математическая модель вибро-возмущающих сил локомотивного асинхронного электродвигателя / О. Р. Хамидов, М. Н. Панченко // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2013. – Вып. 4 (37). – С. 60–67.
8. Henaio H. Analytical approach of the stator current frequency harmonics computation for detection of induction machine rotor faults / H. Henaio, H. Razik, G. A. Capolino // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2005. – Vol. 41. – P. 801–807.
9. Брынский Е. А. Неисправности асинхронных электродвигателей и их диагностика : учеб. пособие / Е. А. Брынский, Ю. Л. Преснов. – СПб. : СПбГТУ, 1999. – 68 с.
10. Bellini A. Advances in diagnostic techniques for induction machines / A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, G. A. Capolino // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55. – P. 4109–4126.
11. Михайлов А. С. Проблемы и перспективы использования искусственных нейронных сетей для идентификации и диагностики технических объектов / А. С. Михайлов, Б. А. Староверов // Вестн. ИГЭУ. – Ивановск : ИГЭУ, 2013. – Вып. 3. – С. 64–66.
12. Бабков Ю. В. Модернизация электропривода тепловозов и электровозов с тяговыми электродвигателями постоянного тока / Ю. В. Бабков, К. С. Перфильев, В. Ю. Евсеев, В. В. Грачев, Д. Н. Курилкин // Труды третьей Междунар. науч.-практич. конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов». – М. : МИИТ, 2018. – С. 114–120.
13. Henaio H. An equivalent internal circuit of the induction machine for advanced spectral analysis / H. Henaio, C. Martis, G. A. Capolino // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2004. – Vol. 40. – P. 726–734.
14. Briz F. Broken rotor bar detection in line-fed induction machines using complex wavelet analysis of startup transients / F. Briz, M. Degner, P. Garcia, D. Bragado // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2008. – Vol. 44. – P. 760–768.
15. Jung J. H. Online diagnosis of induction motors using MCSA / J. H. Jung, J. J. Lee, B. H. Kwon // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2006. – Vol. 53. – P. 1842–1852.

Дата поступления: 24.01.2020

Решение о публикации: 12.02.2020

Контактная информация:

ХАМИДОВ Отабек Рустамович –
канд. техн. наук, доцент, докторант;
otabek.rustamovich@yandex.ru

Simulation and experimental research of asynchronous traction motor of the locomotive in case of emergency operation mode

O. R. Khamidov

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

For citation: Khamidov O. R. Simulation and experimental research of asynchronous traction motor of the locomotive in case of emergency operation mode. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 1, pp. 44–54. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-44-54

Summary

Objective: Experimental research and Health assessment of asynchronous traction motors (ATED) for locomotives with a square-cage rotor. **Methods:** Hardware and software package as well as data analysis methods were applied for health monitoring and diagnostics of technical condition of ATED locomotives. **Results:** Rotor failures were studied in ATED with square-cage rotor and stator asymmetry. Oscillogram recording of ATED stator current was carried out under different emergency operation modes. Spectrum analysis of oscillograms showed variations of odd harmonic amplitudes. ATED rotor current spectra were presented demonstrated by a range of harmonic components which occur due to stator asymmetry at different frequencies. A model for evaluation of technical condition of ATED locomotives was designed. The feasibility of anticipatory diagnostics was justified as it allows for the detection of defects at the earliest stage of their development. **Practical importance:** The results of the conducted research may be used in the diagnostic system of ATED locomotives on a real time basis.

Keywords: Diagnostics, asynchronous traction motor, neural network, locomotive fault condition, rotor bar interruption, locomotive, extreme modes, simulation, stator current, rotor current, stator current frequency

References

1. Khamidov O. R. & Kasymov O. T. Razrabotka metodiky kompleksnogo diagnostirovaniya asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta [Development of a complex diagnostics technique for asynchronous traction motor of the railway rolling stock]. *Materialy konferentsii GNII "Natsrazvitiye"*. Sbornik izbrannykh statey [Proceedings of GNII "Natsrazvitiye" conference. Collection of selected research papers]. Saint Petersburg, GNII "Natsrazvitiye" [National Research Institute] Publ., 2017, pp. 32–39. (In Russian)

2. Grachev V. V., Grishchenko A. V. & Bazilevskiy F. Yu. O dostovernosti pryamykh sposobov operativnogo kontrolya energoeffektivnosti teplovozov v ekspluatatsii [Accuracy of direct operation monitoring processes for energy efficiency of diesel locomotives in service]. *Vestnik instituta problem estestvennykh monopolii*

liy: Tekhnika zheleznykh dorog [Bulletin of the Institute of Natural Monopolies Research: Railway engineering], 2018, no. 2 (42), pp. 40–48. (In Russian)

3. Grishchenko A. V. & Kozachenko E. V. *Noviye elektricheskiye mashiny lokomotivov* [New electrical machinery of the locomotive]. Uchebnoye posobiye dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta [Teaching aid for higher educational institutions of railway transport]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 2008, 271 p. (In Russian)

4. Khamidov O. R. & Kasymov O. T. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnykh tyagovykh elektrodvigatelye elektrovozov serii "UZ-EL" sredstvami vibrodiagnostiki [Health assessment of asynchronous traction motors for "UZ-EL"-series electric locomotives by means of vibration-based diagnostics]. *Materialy konferentsii GNII "Natsrazvitiye"*. Sbornik izbrannykh statey

[*Proceedings of GNII "Natsrazvitiye" conference. Collection of selected research papers*]. Saint Petersburg, GNII "Natsrazvitiye" [National Research Institute] Publ., 2017, pp. 13–19. (In Russian)

5. Bellini A., Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C. & Kliman G. B. Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2001, vol. 37, pp. 1248–1255.

6. Grachev V. V., Klimenko Yu. I., Perminov V. A., Kurilkin D. N. & Frolov A. V. Vliyaniye parametricheskikh otkazov oborudovaniya teplovoza na ego energoeffektivnost v ekspluatatsii [The influence of the diesel locomotive parametric failures on its energy efficiency in service]. *Lokomotiv [Locomotive]*, 2017, no. 4, pp. 40–45. (In Russian)

7. Khamidov O. R. & Panchenko M. N. Matematicheskaya model vibrovozmushchayushchikh sil lokomotivnogo asinkhronnogo elektrodvigatelya [Simulation model of disturbance forces of the locomotive induction motor]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2013, iss. 4 (37), pp. 60–67. (In Russian)

8. Henao H., Razik H. & Capolino G. A. Analytical approach of the stator current frequency harmonics computation for detection of induction machine rotor faults. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2005, vol. 41, pp. 801–807.

9. Brynskiy E. A. & Presnov Yu. L. Neispravnosti asinkhronnykh elektrodvigateley i ikh diagnostika [Induction motors: faults and diagnostics]. Uchebnoye posobiye [Teaching aid]. Saint Petersburg, SPbGTU [Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University] Publ., 1999, 68 p. (In Russian)

10. Bellini A., Filippetti F., Tassoni C. & Capolino G. A. Advances in diagnostic techniques for induction machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, pp. 4109–4126.

11. Mikhailov A. S. & Staroverov B. A. Problemy i perspektivy ispolzovaniya iskusstvennykh neironnykh

setey dlya identifikatsii i diagnostiki tekhnicheskikh obyekтов [Problems and prospects of using artificial neural networks for identification and diagnostics of technical objects]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Bulletin of IGEU [Ivanovo Power Engineering University]]*. Ivanovsk, IGEU [Ivanovo Power Engineering Institute] Publ., 2013, iss. 3, pp. 64–66. (In Russian)

12. Babkov Yu. V., Perfiliev K. S., Evseyev V. Yu., Grachev V. V. & Kurilkin D. N. Modernizatsiya elektropivoda teplovozov i elektrovovozov s tyagovymy elektrodvigatelyamy postoyannogo toka [Modernization of the electric motor drive for diesel locomotives and electric locomotives with direct-current traction motors]. *Trudy tretyey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Perspektivy razvitiya servisnogo obsluzhivaniya lokomotivov" [Proceedings of the Third International research and training conference "Development prospects of locomotive maintenance service"]*. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., 2018, pp. 114–120. (In Russian)

13. Henao H., Martis C. & Capolino G. A. An equivalent internal circuit of the induction machine for advanced spectral analysis. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2004, vol. 40, pp. 726–734.

14. Briz F., Degner M., Garcia P. & Bragado D. Broken rotor bar detection in line-fed induction machines using complex wavelet analysis of startup transients. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2008, vol. 44, pp. 760–768.

15. Jung J. H., Lee J. J. & Kwon B. H. Online diagnosis of induction motors using MCSA. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, vol. 53, p. 1842–1852.

Received: January 24, 2020

Accepted: February 12, 2020

Author's information:

Otabek R. KHAMIDOV – PhD in Engineering, Associate Professor, Doctoral Candidate; otobek.rustamovich@yandex.ru



УДК 625.12

Методическое сопровождение штамповых испытаний армогрунтовых конструкций

Н. Н. Богомолова, И. Н. Журавлев

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

Для цитирования: Богомолова Н. Н., Журавлев И. Н. Методическое сопровождение штамповых испытаний армогрунтовых конструкций // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 55–61. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-55-61

Аннотация

Цель: Разработка основных положений методического сопровождения лабораторных штамповых испытаний армогрунтовых конструкций. **Методы:** В современных условиях проектирования, строительства и эксплуатации железных и автомобильных дорог повышенное внимание уделяется вопросам применения инновационных геотехнологий, позволяющих разрабатывать и использовать на практике инженерные решения, существенно улучшающие показатели работы сооружений при соблюдении экономических требований. Примером такой перспективной геотехнологии является использование армогрунтовых конструкций. Улучшение деформативных характеристик исходного грунта становится возможным благодаря наличию геоматериалов, несущих армирующую функцию. Теоретические наработки, методика расчета напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов дают возможность производить обоснованный выбор параметров армогрунтовых конструкций и рекомендовать их применение в конкретных условиях для решения ряда практических задач. Способ учета армирующих свойств геоматериалов, предполагающий введение в расчет условно однородного эквивалентного слоя, а также разработанная на его основе методика расчета напряженно-деформированного состояния армогрунтовых конструкций обуславливают необходимость проведения лабораторных штамповых испытаний. **Результаты:** Рассмотрены основные требования к конструкции лабораторного оборудования, учитывающие специфику испытаний; изложен порядок проведения лабораторных штамповых испытаний армогрунтовых конструкций; указаны основные требования, которые должны быть учтены при подготовке и проведении штамповых испытаний армогрунтовых конструкций; приведены данные относительно обработки результатов штамповых испытаний армогрунтовых конструкций. **Практическая значимость:** Рассмотренные основные положения методического сопровождения лабораторных штамповых испытаний армогрунтовых конструкций могут быть использованы при разработке полноценного методического обеспечения исследования деформативности конструкций из армированного грунта. Обоснованный выбор технических параметров армогрунтовых конструкций существенно расширит возможности по их применению в сфере транспортного строительства, что позволит более эффективно решать ряд практических инженерных задач на современном уровне.

Ключевые слова: Армогрунтовая конструкция, железная дорога, автомобильная дорога, геоматериал, геотехнологии, деформативность, напряженно-деформированное состояние, транспортное

строительство, лабораторные испытания, лабораторное оборудование, штамповые испытания, статическая нагрузка, вибродинамическая нагрузка, конструктивные параметры, технические параметры, эквивалентный слой, методика расчета, методология.

Введение

В современных условиях проектирования, строительства и эксплуатации железных и автомобильных дорог повышенное внимание уделяется вопросам инновационных геотехнологий, позволяющих разрабатывать и использовать на практике инженерные решения, существенно улучшающие показатели работы сооружений при соблюдении экономических требований. Примером такой перспективной геотехнологии является применение армогрунтовых конструкций для целей как железнодорожного, так и автодорожного строительства.

Армогрунтовая конструкция представляет собой двухкомпонентную среду, включающую, помимо грунта, дополнительные армирующие слои геосинтетических материалов. Улучшение деформативных характеристик исходного грунта становится возможным как раз благодаря наличию таких дополнительных элементов, несущих армирующую функцию и воспринимающих растягивающие напряжения, подобно арматурным стержням в железобетоне. Положительные результаты лабораторных и натурных испытаний, а также многолетний опыт внедрения на отдельных участках железных и автомобильных дорог доказали эффективность применения геоматериалов в конструкции железнодорожного пути и в конструкции основания автодорожной одежды [1–8]. Теоретические наработки, в том числе методика расчета напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов [9], дают возможность производить обоснованный выбор параметров армогрунтовых конструкций и рекомендовать использование в конкретных условиях для решения практических задач по снижению деформативности земляного полотна и балластного слоя, основания дорожной одежды и в целом по повышению стабильности и надежности, улучшению эксплуатационных качеств железных и

автомобильных дорог. Вместе с тем предложенный способ учета армирующих свойств геоматериалов, предполагающий введение в расчет условно однородного эквивалентного слоя [10], а также созданная на его основе методика расчета напряженно-деформированного состояния армогрунтовых конструкций [9], обуславливают необходимость определения исходных параметров и показателей, которые могут быть получены в условиях лабораторных штамповых испытаний. В связи с этим разработка основных положений методического сопровождения лабораторных штамповых испытаний армогрунтовых конструкций – одна из актуальных задач работы.

Лабораторное оборудование для штамповых испытаний армогрунтовых конструкций

При проведении штамповых испытаний конструкция лабораторного оборудования должна отвечать ряду требований, учитывающих специфику испытаний [10–12]. К ним относятся следующие:

- размеры лабораторного лотка должны быть такими, чтобы не возникало дополнительного влияния стенок на результаты испытаний;
- конструкция лабораторного лотка должна быть рассчитана на реализацию нагрузок, приближенных к эксплуатационным нагрузкам в реальных условиях;
- нагружение штампа осуществляется гидравлическим домкратом или тарированным грузом. Должна быть предусмотрена возможность нагружения армогрунтовых конструкций ступенями по 0,01–0,1 МПа (0,1–1,0 кгс/см²). Нагрузка измеряется с погрешностью не более 5 % ступени давления;
- конструкция лабораторной установки должна обеспечивать постоянство давления

на каждой ступени нагрузки, центрированную вертикальную передачу нагрузки на штамп;

- конструкция лабораторной установки должна иметь техническую возможность для создания не только статической, но и вибродинамической нагрузки на штамп;

- устройство для измерения осадок штампа должно обеспечивать измерение их с точностью не менее 0,1 мм. Система из нескольких струнных прогибомеров, закрепленных на реперной системе и соединенных со штампом стальной проволокой диаметром не менее 0,3 мм, позволяет осуществлять измерения с требуемой точностью [12];

- дополнительно в лабораторной установке должна быть предусмотрена возможность измерения как свободного перемещения геоматериала в горизонтальной плоскости, так и деформации геоматериала в условиях его фиксации к стенкам лотка. Принимая во внимание высокую жесткость некоторых видов геоматериалов, измерительная система должна обеспечивать возможность снятия показаний с точностью не менее 0,01 мм.

Подготовка и проведение штамповых испытаний армогрунтовых конструкций

Порядок проведения лабораторных штамповых испытаний армогрунтовых конструкций установлен в [12] и включает: реализацию конструктивного решения армирования, которое происходит в условиях варьирования общей толщины слоя грунта, типа, глубины укладки, количества слоев и расстояния между слоями армирующего геоматериала; установку штампа, монтаж нагрузочной и измерительной систем; сами испытания; демонтаж нагрузочной и измерительной систем, снятие штампа; разборку армогрунтовой конструкции; изъятие и осмотр образцов геоматериалов.

Основные требования, которые должны быть учтены при подготовке и проведении штамповых испытаний:

- после реализации конструктивного решения армирования необходимо выполнить плани-

ровку поверхности грунтового слоя в пределах площади установки штампа, проверку общей высоты конструкции;

- после установки штампа, до начала нагружения, следует выполнить контроль горизонтальности поверхности штампа, а также его центрирование относительно устройства нагружения;

- загрузка штампа производится степенями различной величины, в первую степень необходимо включить вес деталей установки, влияющих на загрузку штампа;

- максимальная величина нагрузки устанавливается исходя из реализуемого конструктивного решения армирования и поставленных задач;

- снятие показаний по измерительным приборам производится после стабилизации деформаций армогрунтовой конструкции. За критерий условной стабилизации деформаций принимается скорость осадки штампа, составляющая не более 0,1 мм за 30 мин. Время выдерживания последующей ступени нагрузки не должно быть меньше, чем время выдерживания предыдущей;

- величина деформаций определяется как среднее арифметическое из показаний всех измерительных приборов;

- для соблюдения достоверности результатов необходимо проведение экспериментальной серии, состоящей из нескольких опытов, одинаковых по конструктивному решению армирования и режиму нагружения. Минимальное число опытов в серии может быть определено с использованием критерия Стьюдента.

Обработка результатов штамповых испытаний армогрунтовых конструкций

По результатам проведенных лабораторных штамповых испытаний выполняется статистическая обработка результатов, строятся графики зависимости величины осадки штампа от вертикальной, возрастающей нагрузки; для выявления доли упругой деформации в общей

деформации грунтового массива строится также ветвь разгрузки [12]. Для линейных участков графиков определяются величины модуля общей деформации армогрунтовых конструкций, диапазон нагрузок для эффективной работы геоматериала, параметры эквивалентного слоя и исходные данные для расчета изучаемой армогрунтовой конструкции по предложенной методике [9, 10, 12].

Заключение

Основные положения методического сопровождения лабораторных штамповых испытаний армогрунтовых конструкций могут быть использованы при разработке полноценного методического обеспечения исследования деформативности конструкций из армированного грунта. Обоснованный выбор технических параметров армогрунтовых конструкций существенно расширит возможности по их применению в сфере транспортного строительства, что позволит более эффективно решать ряд практических инженерных задач на современном уровне.

Библиографический список

1. Блажко Л. С. Испытания модели балластного слоя, армированного геоматериалами / Л. С. Блажко, Е. С. Свинцов, А. В. Петряев // Путь и путевое хозяйство. – 2000. – № 6. – С. 29–30.
2. Петряев А. В. Исследования эффективности применения современных геоматериалов в конструкции железнодорожного пути / А. В. Петряев, И. Н. Журавлев // Исследования и разработки ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте : межвуз. сб. науч. трудов с международным участием. – Самара : СамИИТ, 2001. – Вып. 21. – С. 319–320.
3. Ашпиз Е. С. Опыт применения геосинтетических материалов при усилении и реконструкции земляного полотна железных дорог / Е. С. Ашпиз // Применение геоматериалов при строительстве и реконструкции транспортных объектов : материалы II Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2002. – С. 7–14.
4. Блажко Л. С. Перспектива применения геоматериалов в конструкции верхнего строения пути на участках обращения подвижного состава с осевыми нагрузками до 30 т/ось / Л. С. Блажко // Применение геоматериалов при строительстве и реконструкции транспортных объектов : материалы II Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2002. – С. 66–68.
5. Блажко Л. С. Анализ способов повышения несущей способности грунтов основной площадки земляного полотна / Л. С. Блажко, С. Н. Чуян, В. Б. Захаров, Е. В. Черняев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2016. – Т. 13. – Вып. 3 (48). – С. 328–336.
6. Петряев А. В. Моделирование поведения геосинтетического материала в железнодорожном земляном полотне / А. В. Петряев // Транспорт Урала. – 2017. – № 1 (52). – С. 61–66.
7. Петряев А. В. Армирование подбалластного слоя георешетками как альтернатива защитным слоям из смесей специального подобранного грансостава / А. В. Петряев, В. В. Ганчиц // Актуальные проблемы развития транспортной инфраструктуры : сб. науч. трудов / под ред. А. Ф. Колоса, А. В. Кабанова. – СПб. : ПГУПС, 2018. – С. 255–266.
8. Петряев А. В. Несущая способность железнодорожного земляного полотна, армированного геосинтетическими материалами / А. В. Петряев // Транспорт Урала. – 2019. – № 1 (60). – С. 71–75.
9. Журавлев И. Н. Разработка методики расчета напряженно-деформированного состояния земляного полотна, усиленного геоматериалами / И. Н. Журавлев // Железнодорожный транспорт : проблемы и решения : Междунар. сб. трудов молодых ученых, аспирантов и докторантов. – СПб. : ПГУПС, 2004. – Вып. 7. – С. 38–42.
10. Журавлев И. Н. Оценка влияния геоматериалов на деформативность грунтовых массивов и разработка способа моделирования армирующих свойств геоматериалов / И. Н. Журавлев // Проблемы развития сети железных дорог : межвуз. сб. науч. трудов / под ред. В. С. Шварцфельда. – Хабаровск : ДВГУПС, 2006. – С. 102–105.
11. Петряев А. В. Современные геоматериалы, модельные испытания в лабораторных условиях / А. В. Петряев, И. Н. Журавлев // Современные проб-

лемы и прогрессивные технологии в путевом хозяйстве Октябрьской железной дороги : тез. докл. 43-й науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2001. – С. 119–122.

12. Журавлев И. Н. Лабораторные испытания армогрунтовых конструкций / И. Н. Журавлев // Бюл. результатов науч. исследований. – 2012. – Вып. 4 (3). – С. 57–62.

Дата поступления: 19.12.2019

Решение о публикации: 27.12.2019

Контактная информация:

БОГОМОЛОВА Наталья Николаевна – канд.

техн. наук, доцент; bogomolova.n.n@yandex.ru

ЖУРАВЛЕВ Игорь Николаевич – канд. техн.

наук, доцент; oldmasterplus@mail.ru

Methodology of plate-bearing tests of reinforced ground structures

N. N. Bogomolova, I. N. Zhuravlev

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

For citation: Bogomolova N. N., Zhuravlev I. N. Methodology of plate-bearing tests of reinforced ground structures. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol.17, iss. 1, pp. 55–61. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-55-61

Summary

Objective: Development of the basic methodological provisions of laboratory plate-bearing tests of reinforced ground structures. **Methods:** In the current situation in design, construction and operation of railways and highways, increased attention is paid to the use of innovative geotechnologies, which allow developing and applying engineering solutions that significantly improve the performance of structures while complying with economic requirements. An example of such a promising geotechnology is the use of reinforced ground structures. Improving the deformation characteristics of the base soil becomes possible due to reinforcing geomaterials. Theoretical insights, methods for calculating the stress-strain state of soil masses make it possible to select a reasonable set of parameters of reinforced ground structures and recommend their use in specific conditions to solve a number of practical problems. The method of accounting for the reinforcing properties of geomaterials, which involves the introduction of a conditionally uniform equivalent layer into the calculation, as well as the procedure developed on its basis for calculating the stress-strain state of reinforced ground structures, necessitate laboratory plate-bearing tests. **Results:** The basic requirements for the design of laboratory equipment, taking into account the specifics of the tests have been discussed; the procedure for conducting laboratory plate-bearing tests of reinforced ground structures have been set out; the main requirements have been indicated that should be taken into account when preparing and conducting plate-bearing tests of reinforced ground structures; the data on processing the results of plate-bearing tests of reinforced ground structures have been provided. **Practical importance:** The reviewed basic methodological provisions of laboratory plate-bearing tests of reinforced ground structures can be used in the development of full-fledged methodology for the study of the deformability of reinforced ground structures made. An appropriate choice of the technical parameters of reinforced ground structures will significantly expand the range of their application in the transport construction, which will allow more efficiently solving a number of practical engineering problems up to the latest standards.

Keywords: Reinforced ground structure, railway, highway, geomaterial, geotechnology, deformability, stress-strain state, transport construction, laboratory tests, laboratory equipment, plate-bearing tests, static load, vibrodynamic load, design parameters, technical parameters, equivalent layer, calculation procedure, methodology.

References

1. Blazhko L. S., Svintsov E. S. & Petryayev A. V. Ispytaniya modeli ballastnogo sloya, armirovannogo geomaterialami [Testing a model of a stone bed reinforced with geomaterials]. *Put' i putevoye khozyaystvo [Railway Track and Facilities]*, 2000, no. 6, pp. 29–30. (In Russian)
2. Petryayev A. V. & Zhuravlev I. N. Issledovaniya effektivnosti primeneniya sovremennykh geomaterialov v konstruktsii zheleznodorozhnogo puti [Studies of the effectiveness of modern geomaterials in the construction of a railway track]. *Issledovaniya i razrabotki resursosberegayushchikh tekhnologiy na zheleznodorozhnom transporte. Mezhdunar. sb. nauch. trudov s mezhdunarodnym uchastiyem [Research and development of resource-saving technologies in railway transport. Interuniversity collection of scientific proceedings with international participation]*. Samara, SamIIT [Samara State Transport University] Publ., 2001, iss. 21, pp. 319–320. (In Russian)
3. Ashpiz E. S. Opyt primeneniya geosinteticheskikh materialov pri usilenii i rekonstruktsii zemlyanogo polotna zheleznykh dorog [Experience in the use of geosynthetic materials in the reinforcement and reconstruction of the railway roadbed]. *Primeneniye geomaterialov pri stroitel'stve i rekonstruktsii transportnykh ob'yektov [The use of geomaterials in the construction and reconstruction of transport facilities]*. Materialy II Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konferentsii [Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2002, pp. 7–14. (In Russian)
4. Blazhko L. S. Perspektiva primeneniya geomaterialov v konstruktsii verkhnego stroyeniya puti na uchastkakh obrashcheniya podvizhnogo sostava s osevyimi nagruzkami do 30 t/os' [The prospect of using geomaterials in the construction of the track's superstructures in the areas of rolling stock circulation with axle loads up to 30 t/axle]. *Primeneniye geomaterialov pri stroitel'stve i rekonstruktsii transportnykh ob'yektov [The use of geomaterials in the construction and reconstruction of transport facilities]*. Materialy II Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konferentsii [Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2002, pp. 66–68. (In Russian)
5. Blazhko L. S., Chuyan S. N., Zakharov V. B. & Chernyayev E. V. Analiz sposobov povysheniya nesushchey sposobnosti gruntov osnovnoy ploshchadki zemlyanogo polotna [Analysis of methods of increasing the soil bearing capacity of the top of subgrade]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2016, vol. 13, iss. 3 (48), pp. 328–336. (In Russian)
6. Petryayev A. V. Modelirovaniye povedeniya geosinteticheskogo materiala v zheleznodorozhnom zemlyanom polotne [Modeling the behavior of geosynthetic material in a railway roadbed]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2017, no. 1 (52), pp. 61–66. (In Russian)
7. Petryayev A. V. & Ganchits V. V. Armirovaniye podballastnogo sloya georeshetkami kak al'ternativa zashchitnym sloyam iz smesey spetsial'nogo podobrannogo gransostava [Reinforcement of the sub-ballast bed with geogrids as an alternative to protective layers made of specially selected granular mixtures]. *Aktual'nyye problemy razvitiya transportnoy infrastruktury [Urgent matters of the development of transport infrastructure]*. Sb. nauch. trudov [Scientific proceedings], edited by A. F. Kolos, A. V. Kabanov. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, pp. 255–266. (In Russian)
8. Petryayev A. V. Nesushchaya sposobnost' zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna, armirovannogo geosinteticheskimi materialami [Bearing capacity of the railway roadbed reinforced with geosynthetic materials]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2019, no. 1 (60), pp. 71–75. (In Russian)
9. Zhuravlev I. N. Razrabotka metodiki rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zemlyanogo polotna, usilennogo geomaterialami [Development of a methodology for calculating the stress-strain state of the stress-strain state of the roadbed reinforced with geomaterials]. *Zheleznodorozhnyy transport: problemy i*

resheniya. Mezhdunar. sb. trudov molodykh uchenykh, aspirantov i doktorantov [*Railway Transport: Problems and Solutions*. International proceedings of young scientists, graduate students and doctoral students]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2004, iss. 7, pp. 38–42. (In Russian)

10. Zhuravlev I. N. Otsenka vliyaniya geomaterialov na deformativnost' gruntovykh massivov i razrabotka sposoba modelirovaniya armiruyushchikh svoystv geomaterialov [Assessing the impact of geomaterials on the deformability of soil masses and developing a method for modeling the reinforcing properties of geomaterials]. *Problemy razvitiya seti zheleznnykh dorog* [Problems of the railway network development]. Mezhevuz. sb. nauch. trudov [Interuniversity collection of scientific proceedings], ed. by V. S. Shvartsfel'd. Khabarovsk, DVGUPS [Far Eastern State Transport University] Publ., 2006, pp. 102–105. (In Russian)

11. Petryayev A. V. & Zhuravlev I. N. Sovremennyye geomaterialy, model'nyye ispytaniya v laboratornykh usloviyakh [Modern geomaterials, model laboratory tests].

Sovremennyye problemy i progressivnyye tekhnologii v putevom khozyaystve Oktyabr'skoy zheleznoy dorogi [Current issues and advanced technologies in the railway facilities of the October Railway]. Tez. dokl. 43y nauch.-tekhnich. konferentsii [Abstracts of the 43rd Scientific and Technical Conference]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2001, pp. 119–122. (In Russian)

12. Zhuravlev I. N. Laboratornyye ispytaniya armogruntovykh konstruktsiy [Laboratory tests of reinforced ground structures]. *Bulletin of scientific research results*, 2012, iss. 4, pp. 57–62. (In Russian)

Received: December 19, 2019

Accepted: December 27, 2019

Author's information:

Natal'ya N. BOGOMOLOVA – PhD in Engineering, Associate Professor; bogomolova.n.n@yandex.ru
Igor' N. ZHURAVLEV – PhD in Engineering, Associate Professor; oldmasterplus@mail.ru

УДК 629.433

Эволюция конструкции подвижного состава легкорельсового транспорта в Санкт-Петербурге

А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко, Д. Д. угли Каримов

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

Для цитирования: Воробьев А. А., Будюкин А. М., Кондратенко В. Г., Каримов Д. Д. угли. Эволюция конструкции подвижного состава легкорельсового транспорта в Санкт-Петербурге // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 62–70. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-62-70

Аннотация

Цель: Установить тенденции развития подвижного состава общественного (рельсового) транспорта в Санкт-Петербурге с начала основания города по настоящее время. Определить наиболее оптимальный перспективный вид городского рельсового транспорта в начале XXI в., наиболее перспективный тип и конструктивные особенности подвижного состава легкорельсового транспорта (трамвая), приспособленного для эксплуатации на маршрутах в Санкт-Петербурге. **Методы:** Проводилось изучение отчетов, исторических документов по работе транспорта с начала основания города, нормативно-технической документации по проектированию и строительству трамвайных вагонов, технических данных отечественного и зарубежного исторического и современного подвижного состава легкорельсового транспорта. **Результаты:** Обострившиеся в последние десятилетия транспортные проблемы Санкт-Петербурга можно решить только путем приоритетного развития общественного транспорта, в первую очередь рельсового, который обладает большей провозной способностью. Была рассмотрена целесообразность развития в городе метрополитена, городской железной дороги и легкорельсового транспорта. Самым предпочтительным оказалось развитие легкорельсового транспорта на выделенном (обособленном) полотне с развязками в разных уровнях. Строительство и эксплуатация наиболее целесообразны для связи конечных станций метро с городами Всеволожск, Пушкин, Колпино и др. **Практическая значимость:** Полученные результаты исследований могут быть применены обучающимися и специалистами при изучении истории транспорта Санкт-Петербурга. Рекомендации по предлагаемому перспективному типу подвижного состава могут быть использованы специалистами Комитета по транспорту Санкт-Петербурга или ГУП «Горэлектротранса» при приобретении по конкурсам нового подвижного состава для трамвайных парков города.

Ключевые слова: Легковые извозчики, омнибус, конно-железная дорога, паровой трамвай, электрический трамвай, легкорельсовый транспорт, конструкция вагона.

В связи с ростом населения в столице Российской Империи Санкт-Петербурге в начале XIX в., который был связан с развитием промышленного производства в городе, появилась потребность в общественных перевозках. Этапы становления общественного транспорта в Санкт-Петербурге [1–4] представлены в табл. 1.

Существовавший примерно с 1705 г. способ передвижения с помощью легковых извозчиков был доступен лишь наиболее состоятельной части населения города.

В 1847 г. в Санкт-Петербурге появились маршрутные омнибусы (общественные кареты). Омнибус представлял собой деревянную

ТАБЛИЦА 1. Этапы развития городского общественного транспорта в Санкт-Петербурге

Номер этапа	Вид транспорта	Годы эксплуатации	Достоинства	Недостатки
I	Легковые извозчики	1705–до конца 1930-х	Скорость, индивидуальный транспорт	Высокая стоимость проезда
II	Омнибус	1847–1914	Первый маршрутный общественный транспорт	Низкая скорость и вместимость, лошади
III	Конка	1863–1907	Незначительное увеличение скорости и вместимости	Недостаточная вместимость, лошади
IV	Паровой трамвай	1882–1922	Увеличение скорости и вместимости, без лошадей	Дым, копоть, шум, неэкономичность
V	Электрический трамвай	1907 – настоящее время	Скорость, вместимость, удобства	Сбои в движении из-за непредвиденных ситуаций при движении в общем потоке

карету вместимостью 6–10 человек с деревянными спицевыми колесами большого диаметра с железным ободом. Стоимость проезда на них была ниже, чем у извозчиков. Кареты первоначально были одноэтажными, а позднее и с империалом. Однако даже двухэтажный омнибус не справлялся с возрастающим пассажиропотоком.

В 1863 г. в городе были открыты линии конно-железных дорог. Вагоны конки тянулись двумя лошадьми, имели деревянный кузов и открытые площадки, на которых размещался механический ручной тормоз. В 1875 г. появились двухэтажные вагоны с империалами, длина кузова – до 8 м. Увеличилась вместимость до 50 человек и возросла скорость передвижения до 8–12 км/ч. Салон в темное время освещался керосиновыми фонарями. Лошади часто болели, существовали проблемы с кормами. Они могли тянуть только один вагон, назрела потребность в применении механической тяги.

Линии парового трамвая начали перевозить пассажиров с 1882 г. Паровой трамвай представлял собой маленький локомотив на коксе, с конденсацией пара, колесной формулой 0-2-0, тащивший за собой 3–4 коночных вагона с империалом. Его недостатки: дым от работы локомотива отрицательно влиял как на пассажи-

ров, так на жителей города, невысокие скорости, загрязнение воздуха, опасность пожаров; неэкономичность работы паровоза при частых пусках и остановках; паровая тяга требовала выравнивания профиля улиц, так как паровозы не могли преодолевать более или менее крутые подъемы. К достоинствам относятся: увеличение вместимости и стали не нужны лошади.

Электрический трамвай в Санкт-Петербурге был открыт 29 сентября 1907 г. (по новому стилю) и работает по настоящее время. В результате проведенных исследований все эксплуатируемые в Санкт-Петербурге модели трамвайных вагонов в соответствии с их конструктивными особенностями поделены на семь поколений (табл. 2) [5–11].

Рассмотрим конструктивные особенности вагонов седьмого поколения (полностью низкопольных), эксплуатируемых в настоящее время в Санкт-Петербурге, как наиболее прогрессивных и удобных для пассажиров.

Особенности конструкции полностью низкопольных шестиосных односторонних вагонов модели 71-931 «Витязь» (2015–2017 гг.), 71-931М «Витязь М» (2017–2019 гг.) (рис. 1) и четырехосных сочлененных модели 71-923 «Богатырь» (2017 г., конструктивно – 2/3 от

ТАБЛИЦА 2. Поколения конструкций вагонов электрического трамвая в Санкт-Петербурге

Поколение вагонов	Тип подвижного состава	Годы постройки	Производитель: завод/фирма
1	Двухосные моторные вагоны с непосредственной системой управления и двухосные прицепные вагоны	1907–1933	Brush Electrical Engineering Company (Англия), Путиловский завод (Ленинград) и др.
2	Четырехосные моторные вагоны с непосредственной системой управления и четырехосные прицепные вагоны	1933–1969	ВАРЗ (Ленинград)
3	Четырехосные моторные вагоны с косвенной системой управления (РКСУ)	1968–2004	ВАРЗ (ЗРГЭТ, ПТМЗ), УКВЗ
4	Шестиосные сочлененные вагоны с косвенной системой управления (РКСУ, ТИСУ)	1987–2004	ЗРГЭТ (ПТМЗ)
5	Четырех- и шестиосные сочлененные вагоны с переменным уровнем пола и транзисторной системой управления	2005–2012	ПТМЗ
6	Четырех-, шести- и восьмиосные сочлененные вагоны с переменным уровнем пола и транзисторной системой управления	2013–2019	УКВЗ, «Белкоммунмаш», АО «Уралтрансмаш»
7	Четырех-, шести- и восьмиосные сочлененные вагоны с 100%-ным низким полом с транзисторной системой управления	2017–2019	ООО «ПК Транспортные системы», «Штадлер-Минск»

Примечание: ВАРЗ, ЗРГЭТ, ПТМЗ – это все разные названия одного и того же завода (закрыт в 2013 г.); УКВЗ – Усть-Катавский вагоностроительный завод им. С. М. Кирова; РКСУ – реостатно-контакторная система управления; ТИСУ – тиристорно-импульсная система управления. Исключены из анализа все экспериментальные и опытные вагоны; рассмотрены конструкции только серийно выпускавшихся вагонов, в разные годы работавшие в городе. Не описываются вагоны серии ЛМ-99 (годы постройки 1999–2007 гг.), которые имели устаревшие тележки мостового типа, и их конструкция постоянно менялась.

вагона «Витязь») производства ООО «ПК Транспортные системы» и восьмиосных двухсторонних вагонов модели «Stadler B85600M» (рис. 2) приведены в табл. 3.

Вагоны с низким полом позволяют существенно ускорить посадку–высадку пассажиров на остановках, имеют систему климат-контроль салона и кабины водителя, но их цена на 30–40% выше, чем у вагонов с переменным уровнем пола. К недостаткам полностью низкополь-

ных вагонов можно отнести наличие подиумов в салоне, обусловленное необходимостью расположения там части оборудования и где ставятся сидения, и как следствие, вагоны имеют узкие проходы для пассажиров.

Проведенный в работе анализ подвижного состава выпуска 1863–2019 гг. показал, что совершенствуются конструкции кузовов, тележек, ходовых частей, систем управления, токоприемников и другого оборудования [12–18].



Рис. 1. Трамвайный вагон модели 71-931 М «Витязь М» (2017–2019 гг.)

ТАБЛИЦА 3. Технические особенности конструкции полностью низкопольных сочлененных вагонов, производившихся с 2015 по 2019 г.

Узел вагона	Особенность конструкции
Кузов	Сварной из низколегированной стали и обшит деталями из композита, стеклопластика или алюминиевыми панелями, низкий пол 100 %, в кузове нет ступенек
Двери	Прислонно-сдвижные
Тормоз	Электродинамический, механический дисковый с электрическим приводом, магниторельсовый
Тип двигателя, количество и мощность, кВт	Переменного тока – асинхронные двигатели: 4×72; 6×72; 8×70
Ходовая часть	Двухосные моторные низкопольные тележки с двойным подвешиванием, под средней секцией – моторная неповоротная тележка. Все тележки моторные поворотные, редуктор наружный. Тележки не имеют в приводе карданных валов
Токоприемник	Полупантограф
Система управления	Асинхронный тяговый частотно-управляемый привод на IGBT-транзисторах
Максимальная скорость, км/ч	75
Максимальная вместимость, чел. (8 чел./м ²)	265 (шестиосный)/376 (восьмиосный)

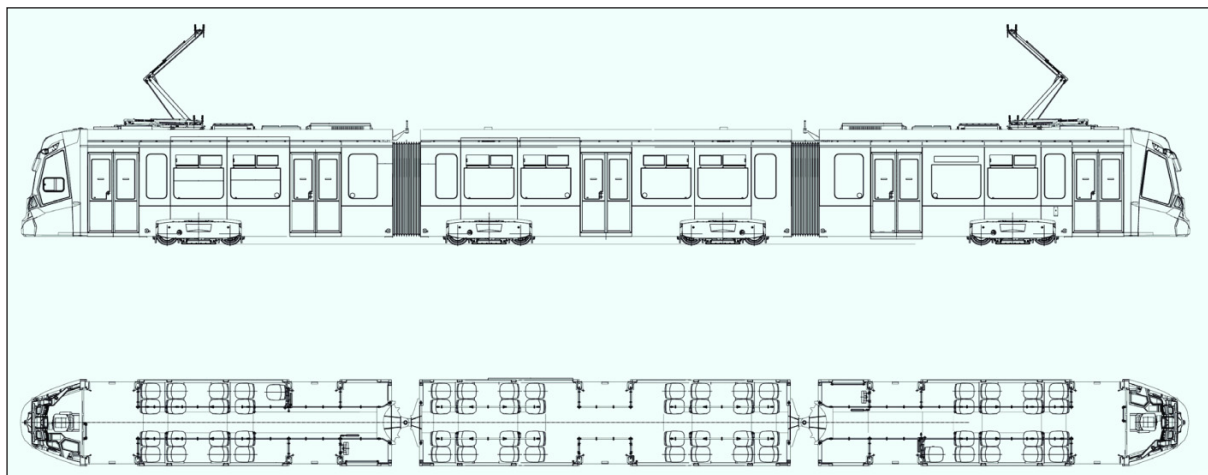


Рис. 2. Вагон «Stadler B85600M» (2017–2018 гг.)

Современные вагоны должны иметь 100%-ный низкий пол, быть оборудованы поворотными тележками с двойным рессорным подвешиванием (не исключая пневматическое); с асинхронными тяговыми электродвигателями с транзисторной системой управления; с электродинамическим, дисковым механическим и магниторельсовым тормозами. Кузова могут быть многозвенными – до пяти секций (и более), иметь широкие входные двери, достаточные размеры проходов в салоне вагона, вместительные накопительные площадки, мягкие места для сидения, систему климат-контроль, электронные информационные системы; зачастую такие вагоны могут выполняться двухсторонними.

Ход современных вагонов должен быть плавным и бесшумным, они должны обладать современной динамичностью (быстро разгоняться и иметь эффективные тормоза) и минимальным автономным ходом не менее 1000 м.

В результате рекомендуется следующий наиболее актуальный типаж рельсового подвижного состава для Санкт-Петербурга на ближайшую перспективу:

- четырехосные сочлененные двухзвенные низкопольные односторонние вагоны на поворотных двухосных тележках длиной примерно 20 м (вместо приобретаемых четырехосных одиночных вагонов);

- шестиосные сочлененные двухзвенные низкопольные односторонние вагоны на пово-

ротных тележках (с поддерживающей тележкой как под сочленением, так и не под сочленением) длиной 22,5 м, способные работать по системе многих единиц;

- восьмиосные сочлененные трехзвенные низкопольные вагоны на поворотных моторных тележках длиной 30 м.

В силу применения колес небольшого диаметра (не более 620 мм), новые вагоны очень чувствительны к техническому состоянию рельсового пути, что приводит к необходимости проводить их регулярную шлифовку для устранения волнообразного износа рельса. Помимо этого, в некоторых моделях вагонов стали необоснованно применять неповоротные тележки, которые плохо воздействуют на путь, тем самым ускоряя их износ. Поэтому целесообразно отказаться от их приобретения.

Необходимо оборудовать эксплуатируемые в городе трамвайные вагоны старого типа устройствами автономного хода, что позволит существенно повысить регулярность движения.

Библиографический список

1. Киселев И. П. История скоростных сухопутных нетрадиционных видов пассажирского транспорта / И. П. Киселев // История науки и техники. – 2006. – № 8. – С. 2–12.

2. Киселев И. П. Развитие классификаций транспортных систем в СССР и России. Специфика колесного (направляемого) транспорта / И. П. Киселев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2010. – Вып. 4 (25). – С. 168–178.
3. Фортунатов В. В. История мировых цивилизаций / В. В. Фортунатов. – СПб. : Питер, 2012. – 560 с.
4. Голубев А. А. История транспорта : учеб. пособие / А. А. Голубев, И. П. Киселев, В. И. Голубев, В. В. Фортунатов, В. В. Яробков ; под ред. В. В. Фортунатова. – СПб. : ПГУПС, 2013. – 134 с.
5. Резник М. Я. Трамвайный вагон ЛМ-68М / М. Я. Резник, Б. М. Кулаков. – М. : Транспорт, 1977. – 192 с.
6. Иванов М. Д. Устройство и эксплуатация трамвая / М. Д. Иванов, А. П. Алапкин, Б. К. Иеропольский. – 2-е изд. – М. : Высшая школа, 1977. – 272 с.
7. Хиценко В. В. Высокоскоростной трамвай / В. В. Хиценко. – Л. : Стройиздат, 1976. – 180 с.
8. Корягина Е. Е. Электрооборудование трамваев и троллейбусов / Е. Е. Корягина, О. А. Коськин. – М. : Транспорт, 1982. – 296 с.
9. Годес Я. Г. Этот новый старый трамвай / Я. Г. Годес. – Л. : Лениздат, 1982. – 166 с.
10. Шредер Б. Л. Цельнометаллические четырехосные трамвайные вагоны ЛМ-49 и ЛП-49 / Б. Л. Шредер, З. Н. Когтева, М. Я. Резник, Г. И. Романов и др. – Л. : Лениздат, 1954. – 268 с.
11. Волочнев В. Н. Технический справочник по городскому электротранспорту / В. Н. Волочнев, А. Н. Трофимов, М. Н. Шполянский. – М. : Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1963. – 724 с.
12. Космачевский А. А. Современные технологии ремонта кузовов и тележек трамвайных вагонов модели ЛВС-86 / А. А. Космачевский, А. А. Воробьев, В. Г. Кондратенко // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте железнодорожного подвижного состава : сб. трудов Нац. науч.-технич. конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : ПГУПС, 2019. – С. 155–162.
13. Жуков Е. Р. Современные материалы и конструкции, применяемые для отечественных железнодорожных вагонов / Е. Р. Жуков, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД : сб. трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : ПГУПС, 2017. – С. 95–98.
14. Кондратенко В. Г. Совершенствование технологии сборки кузовов железнодорожных вагонов / В. Г. Кондратенко, А. М. Будюкин, Е. Р. Жуков // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД : сб. трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : ПГУПС, 2017. – С. 98–101.
15. Старостин А. А. Анализ эффективности применения современных конструкционных материалов и сплавов при производстве железнодорожных вагонов и локомотивов / А. А. Старостин, А. М. Будюкин // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте железнодорожного подвижного состава : сб. трудов Нац. науч.-техн. конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : ПГУПС, 2019. – С. 133–136.
16. Воробьев А. А. Моделирование динамики подвижного состава / А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко, К. А. Мерочник // Новые материалы и технологии в машиностроении. – Брянск : БГИТА, 2015. – № 21. – С. 24–30.
17. Будюкин А. М. Теоретические основы формирования системы обеспечения работоспособности машин. Ч. 1 : учеб. пособие / А. М. Будюкин, А. А. Воробьев, В. Г. Кондратенко, А. А. Соболев ; под ред. С. А. Зинченко. – СПб. : ПГУПС, 2016. – 46 с.
18. Воробьев А. А. Надежность подвижного состава : учебник для образовательных учреждений, реализующих программы ВО по специальности 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог» / А. А. Воробьев, А. В. Горский, А. Д. Пузанков, А. В. Скребков, В. А. Четвергов, С. В. Швецов. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2017. – 301 с.

Дата поступления: 25.02.2020

Решение о публикации: 28.02.2020

Контактная информация:

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич – д-р техн. наук, доцент; 79219751198@yandex.ru

БУДЮКИН Алексей Митрофанович – канд. техн. наук, доцент; ktexmet@yandex.ru

КОНДРАТЕНКО Владимир Григорьевич – канд. техн. наук, доцент; ktexmet@yandex.ru

КАРИМОВ Дастонбек Давронбой угли – аспирант; dostonkarimov325@gmail.com

Evolution of design of light-rail transport rolling stock in Saint Petersburg

A. A. Vorob'ev, A. M. Budiukin, V. G. Kondratenko, D. D. ugli Karimov

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

For citation: Vorob'ev A.A., Budiukin A.M., Kondratenko V.G., Karimov D.D. ugli. Evolution of design of light-rail transport rolling stock in Saint Petersburg. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 1, pp. 62–70. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-62-70

Summary

Objective: Establish the trends in development of rolling stock of public (rail) transport in St Petersburg from the founding of the city through to now. Determine the most optimal prospective type of urban rail transport for early 21st century, and most attractive type and specific design features of light-rail transport (tram) rolling stock adjusted for operation on routes in Saint Petersburg. **Methods:** Study of reports, historical documents on operation of transport since the founding of the city, normative and technical documentation for designing and construction of tram cars, technical data of Russian and international historical and modern rolling stock of light rail transport. **Results:** Saint Petersburg's transport problems which became more acute over the last few dozen years can be solved only by priority development of public transport, primarily rail transport, which has higher carrying capacity. Feasibility of developing underground rail (metro), urban railway and light rail transport in the city was considered. The most preferable option was found to be development of light rail transport using designated (separated) roadbed with junctions at different levels. Construction and operation is most practicable to connect final metro stations to the towns of Vsevolozhsk, Pushkin, Kolpino and others. **Practical importance:** The obtained results of study can be used by students and specialists in the study of history of Saint Petersburg's transport. Recommendations for proposed prospective types of rolling stock can be used by specialists of the Saint Petersburg Transport Committee or State Unitary Enterprise Gorelektrotrans when conducting competitive tenders for new rolling stock for the city's tram parks.

Keywords: Cab, omnibus, horse-drawn railway, steam tram, electrical tram, light rail transport, car design.

References

1. Kiselev I. P. Istoriia skorostnykh sukhoputnykh netraditsionnykh vidov passazhirskogo transporta [History of high-speed terrestrial non-traditional types of passenger transport]. *Istoriia nauki i tekhniki [Science and technology history]*, 2006, no. 8, pp. 2–12. (In Russian)
2. Kiselev I. P. Razvitie klassifikatsii transportnykh sistem v SSSR i Rossii. Spetsifika koleinogo (napravliaemogo) transporta [Development of classification of transport systems in the USSR and Russia. Specific features of tracked (guided) transport]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia [Proceedings of Petersburg Transport University]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2010, iss. 4 (25), pp. 168–178. (In Russian)
3. Fortunatov V. V. Istoriia mirovykh tsivilizatsii [History of world civilizations]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2012, 560 p. (In Russian)
4. Golubev A. A., Kiselev I. P., Golubev V. I., Fortunatov V. V. & Iarobkov V. V. *Istoriia transporta [History of transport]*. Study guide ed. by V. V. Fortunatov. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2013, 134 p. (In Russian)

5. Reznik M. Ia. & Kulakov B. M. *Tramvainyi vagon LM-68M* [Tram car LM-68M]. Moscow, Transport Publ., 1977, 192 p. (In Russian)
6. Ivanov M. D., Alapkin A. P. & Ieropol'skii B. K. *Ustroistvo i ekspluatatsiia tramvaia* [Design and operation of a tram]. 2nd ed. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 1977, 272 p. (In Russian)
7. Khitsenko V. V. *Vysokoskorostnoi tramvai* [High-speed tram]. Leningrad, Stroiizdat Publ., 1976, 180 p. (In Russian)
8. Koriagina E. E. & Kos'kin O. A. *Elektrooborudovanie tramvaev i trolleybusov* [Electrical equipment of trams and trolleybuses]. Moscow, Transport Publ., 1982, 296 p. (In Russian)
9. Godes Ia. G. *Etot staryi novyi tramvai* [This old new tram]. Leningrad, Lenizdat Publ., 1982, 166 p. (In Russian)
10. Shreder B. L., Kogteva Z. N., Reznik M. Ia., Romanov G. I. et al. *Tsel'nometallicheskie chetyrekhosnye tramvainye vagony LM-49 and LP-49* [Full-metal four-axle tram cars LM-49 and LP-49]. Leningrad, Lenizdat Publ., 1954, 268 p. (In Russian)
11. Volochnev V. N., Trofimov A. N. & Shpolianskii M. N. *Tekhnicheskii spravochnik po gorodskomu elektrotransportu* [Technical reference book for urban electrical transport]. Moscow, Izdatel'stvo Ministerstva kommunal'nogo khoziaistva RSFSR Publ., 1963, 724 p. (In Russian)
12. Kosmachevskii A. A., Vorob'ev A. A. & Kondratenko V. G. *Sovremennye tekhnologii remonta kuzovov i telezhok tramvainykh vagonov modeli LVS-86* [Modern technologies for repair of model LVS-86 tram car bodies and bogies]. *Progressivnye tekhnologii, primeniaemye pri remonte zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava*. Sb. trudov nats. nauch.-tekhnich. konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh [Progressive technologies used in repairing railway rolling stock. Coll. papers of national scientific and technical conference of students, master students, PhD students and young researchers]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, pp. 155–162. (In Russian)
13. Zhukov E. R., Budiukin A. M. & Kondratenko V. G. *Sovremennye materialy i konstruktsii, primeniaemye dlia otechestvennykh zheleznodorozhnykh vagonov* [Modern materials and constructions used for domestic rail wagons]. *Progressivnye tekhnologii, primeniaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD*. Sb. trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Progressive technologies used in repairs of Russian Railways' rolling stock. Coll. papers of conference for students, PhD students and young researchers]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, pp. 95–98. (In Russian)
14. Kondratenko V. G., Budiukin A. M. & Zhukov E. R. *Sovershenstvovanie tekhnologii sborki kuzovov zheleznodorozhnykh vagonov* [Perfecting the technology for assembly of railway wagon bodies]. *Progressivnye tekhnologii, primeniaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD*. Sb. trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Progressive technologies used in repairs of Russian Railways' rolling stock. Coll. papers of conference for students, PhD students and young researchers]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, pp. 98–101. (In Russian)
15. Starostin A. A. & Budiukin A. M. *Analiz effektivnosti primeneniia sovremennykh konstruktsionnykh materialov i splavov pri proizvodstve zheleznodorozhnykh vagonov i lokomotivov* [Analysis of efficiency of applying modern construction materials and alloys in production of railway wagons and locomotives]. *Progressivnye tekhnologii, primeniaemye pri remonte zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava*. Sb. trudov nats. nauch.-tekhnich. konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh [Progressive technologies used in repairing railway rolling stock. Coll. papers of national scientific and technical conference of students, master students, PhD students and young researchers]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, pp. 133–136. (In Russian)
16. Vorob'ev A. A., Budiukin A. M., Kondratenko V. G. & Merochnik K. A. *Modelirovanie dinamiki podvizhnogo sostava* [Modelling of rolling stock dynamics]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii* [New materials and technologies in machine engineering]. Briansk, BGITU [Briansk State Engineering and Technology University] Publ., 2015, no. 21, pp. 24–30. (In Russian)
17. Budiukin A. M., Vorob'ev A. A. & Kondratenko V. G. *Teoreticheskie osnovy formirovaniia sistemy obespecheniia rabotosposobnosti mashin. Ch. 1* [Theoretical foundations for forming a system for maintaining working capacity of machines. Pt 1]. Saint Petersburg,

PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, 46 p. (In Russian)

18. Vorob'ev A.A., Gorskii A.V., Puzankov A.D., Skrebkov A.V., Chetvergov V.A. & Shvetsov S.V. *Nadezhnost' podvizhnogo sostava*. Uchebnik [*Reliability of rolling stock*. Study guide]. Moscow, Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte Publ., 2017, 301 p. (In Russian)

Received: February 25, 2020

Accepted: February 28, 2020

Author's information:

Aleksandr A. VOROB'EV – D. Sci. in Engineering, Associate Professor;
79219751198@yandex.ru

Aleksei M. BUDIUKIN – PhD in Engineering, Associate Professor; ktexmet@yandex.ru

Vladimir G. KONDRATENKO – PhD in Engineering, Associate Professor;
ktexmet@yandex.ru

Dostonbek D. ugli KARIMOV – Postgraduate Student; dostonkarimov325@gmail.com

УДК 625.12

Методологические аспекты исследования деформативности армогрунтовых конструкций

И. Н. Журавлев

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

Для цитирования: Журавлев И. Н. Методологические аспекты исследования деформативности армогрунтовых конструкций // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 71–76. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-71-76

Аннотация

Цель: Представление методологических основ исследования деформативности армогрунтовых конструкций, включающих в себя методики, обоснования, алгоритмы выбора технических параметров конструкций из армированного грунта для дорожного строительства. **Методы:** Инновационные разработки находят широкое применение при проектировании и строительстве такой важной составляющей дорожной инфраструктуры как земляное полотно. Применение современных геоматериалов позволяет решать задачи по улучшению прочностных и деформативных характеристик грунтов земляного полотна и основания. Спектр геоматериалов, а также широкий круг задач, стоящих перед инженерами-проектировщиками, диктует необходимость полного изучения этих прогрессивных технологий. Проводилось комплексное определение и оценка степени изменения деформативных свойств армогрунтовых конструкций в зависимости от сочетания параметров конструктивного, эксплуатационного и технологического характера. **Результаты:** Рассмотрены виды, цели, задачи, особенности различных исследований армогрунтовых конструкций, являющихся частью комплексного анализа. **Практическая значимость:** Методологические аспекты исследования деформативности армогрунтовых конструкций могут быть использованы: при разработке практических рекомендаций по определению рациональных сфер применения армированного грунта в конструкции земляного полотна железных и автомобильных дорог, при определении оптимальных конструктивных, эксплуатационных, технологических параметров работы армогрунтовых конструкций, при изучении возможности внедрения новых видов геоматериалов для армирования грунтовых массивов и при разработке нормативной документации по вопросам применения армогрунтовых конструкций на объектах транспортного строительства.

Ключевые слова: Армогрунтовая конструкция, земляное полотно, геоматериал, геотехнологии, деформативность, напряженно-деформированное состояние, транспортное строительство, лабораторные испытания, штамповые испытания, натурные испытания, конструктивные параметры, эксплуатационные параметры, технологические параметры, методика, методология.

Введение

В условиях постоянно повышающихся требований к надежности, стабильности, долговечности, экономичности, экологичности объектов транспортного строительства, обусловленных современными запросами на получение наилуч-

ших инженерных решений при минимальных затратах, пристальное внимание должно уделяться новейшим технологиям, которые способны данные запросы удовлетворить. Инновационные разработки, реализуемые в условиях политики ресурсосбережения, широко применяются в сфере железнодорожного и автодо-

рожного строительства, в частности при проектировании и строительстве такой важной составляющей дорожной инфраструктуры как земляное полотно. Например, использование в конструкции земляного полотна современных геоматериалов позволяет решать задачи по улучшению прочностных и деформативных характеристик грунтов земляного полотна и основания, увеличению погонных и осевых нагрузок, уменьшению строительной стоимости, снижению затрат по текущему содержанию, увеличению межремонтных сроков [1–5]. Вместе с тем значительный спектр выпускаемых производителями геоматериалов, а также не менее широкий круг задач, стоящих перед инженерами-проектировщиками, диктует необходимость всецелостного понимания возможностей этих прогрессивных технологий. Потому разработка методологических основ исследования деформативности армогрунтовых конструкций, включающих в себя методики, обоснования, алгоритмы выбора технических параметров конструкций из армированного грунта для дорожного строительства, является актуальной задачей.

Теоретические и практические основы исследования деформативности армогрунтовых конструкций

Армогрунтовая конструкция представляет собой двухкомпонентную среду, состоящую из грунтового материала и армирующих элементов в виде одного или нескольких слоев геоматериалов. Упрочняющие слои геоматериала, при условии включения их в работу, воспринимают растягивающие усилия, подобно арматуре в железобетоне, что позволяет добиться более низкой деформативности армогрунтовой конструкции по сравнению с массивом неармированного грунта, имеющего, как известно, невысокую прочность на растяжение. В качестве армирующих элементов чаще всего выступают георешетки, геосетки, геосоты, геокомпозиты различных типов. Армогрунтовый материал может быть с успехом использован в конструкции автомобильного и железнодорож-

ного земляного полотна. Первостепенная задача при этом – определение и оценка степени изменения деформативных свойств армогрунтовых конструкций в зависимости от сочетания параметров конструктивного, эксплуатационного и технологического характера: вида исходного грунта и армирующего геоматериала, качества уплотнения грунта, глубины укладки геоматериала от поверхности конструкции, количества слоев и расстояния между слоями геоматериала, диапазона и характера действующих нагрузок и т. д. Для решения указанной задачи необходимо проведение комплексных исследований, включающих:

- лабораторные испытания армогрунтовых конструкций;
- натурные испытания армогрунтовых конструкций;
- теоретическое обоснование выбора параметров армогрунтовых конструкций;
- разработку методики расчета армогрунтовых конструкций, сопоставление с результатами экспериментов;
- испытания армогрунтовых конструкций в реальных условиях на опытных участках;
- внедрение инженерного решения в производство, последующий мониторинг армогрунтовых конструкций на объектах внедрения.

При армировании грунта геоматериалом происходит увеличение модуля общей деформации, зависящее от варианта конструктивного решения [6]. Лабораторные штамповые испытания, проводимые в испытательных лотках, позволяют выявить закономерности изменения деформативных свойств армогрунтовых конструкций при варьировании параметров и в широком диапазоне нагрузок, как статических, так и вибродинамических. В первом приближении могут быть решены задачи по подбору вида геоматериала, количества слоев, глубины укладки и т. п.; определены нагрузки, при которых геоматериал включается в работу; получены значения модулей общей деформации; сделаны прогнозы об эффективности работы армогрунтовых конструкций в реальных условиях. Кроме того, в лабораторных условиях возможно проведение испытаний на моделях малого масштаба, при этом

на достоверность их результатов существенное влияние оказывают такие факторы как выбор масштаба модели земляного полотна, степень подобия реальному сооружению, подбор действующих нагрузок, правильная интерпретация полученных результатов. К ключевым вопросам относится использование в конструкции маломасштабной модели образцов реальных геоматериалов, не подвергнутых масштабированию. Исследования деформативности модели насыпи, армированной геоматериалами, в условиях статического и вибродинамического нагружения были выполнены, в частности, в ходе опытных работ; результаты модельных испытаний выявили уменьшение осадки модели насыпи в 1,8–2 раза (в зависимости от конструктивных параметров), увеличение разрушающего усилия, особенности разрушения армированной модели по сравнению с неармированной [7].

Проведение натурных штамповых испытаний в полевых условиях позволяет определить напряженно-деформированное состояние армогрунтовой конструкции, в частности изменение ее деформативных свойств в условиях имитации работы реального инженерного сооружения, будь то железнодорожное или автодорожное земляное полотно. Уточняются и корректируются конструктивные решения, производится сопоставление с результатами лабораторных испытаний, разрабатываются рекомендации к испытаниям на опытных участках. Кроме того, оказывается возможным дополнительно изучить влияние на деформативность армированного земляного полотна, например, метеорологических, гидрологических, гидрогеологических условий, изменение которых в лабораторных условиях можно лишь смоделировать с некоторой долей приближения.

Анализ результатов лабораторных и натурных испытаний, выполненных при варьировании параметров конструктивного, эксплуатационного, технологического характера, предоставляет широкий и разнообразный материал для построения теоретических основ с последующей разработкой методик расчета армогрунтовых конструкций. Проведенные исследования показали, что наличие в грунтовой конструкции

армирующих элементов в виде слоев геоматериала может быть учтено введением в расчет однородного эквивалентного слоя, заменяющего по своему воздействию на напряженно-деформированное состояние армогрунтовой конструкции воздействие геоматериала [8, 9]. Геометрические и деформационные характеристики эквивалентного слоя принимаются в соответствии с результатами лабораторных и натурных штамповых испытаний, проведенных для условий, соответствующих расчетным (вид армирующего геоматериала, вид грунта, диапазон нагрузок) [8]. Данный способ моделирования армирующих свойств лег в основу методики расчета напряженно-деформированного состояния армогрунтовых конструкций, учитывающей наличие в конструкции слоя геоматериала, и нашел применение, в частности, при расчетах железнодорожного земляного полотна [10].

Исследование деформативных свойств армогрунтовых конструкций в условиях производства позволяет проверить сходимость практических и теоретических данных, полученных на предыдущих этапах лабораторных, полевых и камеральных работ, с результатами, полученными в реальных условиях эксплуатации транспортного сооружения, а также оценить жизнеспособность предложенных инженерных решений. Испытания армированного геоматериалами железнодорожного земляного полотна проводились в рамках комплексных научных работ как на опытных участках небольшой протяженности, так и на действующих перегонах магистральных ходов Октябрьской железной дороги, с последующим мониторингом состояния участков. Сопоставление теоретических и практических результатов показало хорошую степень сходимости для некоторого диапазона конструктивных, эксплуатационных и технологических параметров [2, 11, 12].

Заключение

Рассмотренные методологические аспекты исследования деформативности армогрунтовых конструкций могут быть использованы

при разработке практических рекомендаций по определению рациональных сфер применения армированного грунта в конструкции земляного полотна железных и автомобильных дорог, оптимальных конструктивных, эксплуатационных, технологических параметров работы армогрунтовых конструкций, при изучении возможности внедрения новых видов геоматериалов для армирования грунтовых массивов и при разработке нормативной документации по вопросам применения армогрунтовых конструкций на объектах транспортного строительства.

Библиографический список

1. Грицык В. И. Геоматериалы, геоконструкции в объектах земляного полотна / В. И. Грицык // Применение геоматериалов при строительстве и реконструкции транспортных объектов : материалы II Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2002. – С. 29–32.
2. Блажко Л. С. Испытания модели балластного слоя, армированного геоматериалами / Л. С. Блажко, Е. С. Свинцов, А. В. Петряев // Путь и путевое хозяйство. – 2000. – № 6. – С. 29–30.
3. Блажко Л. С. Анализ способов повышения несущей способности грунтов основной площадки земляного полотна / Л. С. Блажко, С. Н. Чуян, В. Б. Захаров, Е. В. Черняев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2016. – Т. 13. – Вып. 3 (48). – С. 328–336.
4. Петряев А. В. Армирование подбалластного слоя георешетками как альтернатива защитным слоям из смесей специального подобранного грансостава / А. В. Петряев, В. В. Ганчиц // Актуальные проблемы развития транспортной инфраструктуры : сб. науч. трудов / под ред. А. Ф. Колоса, А. В. Кабанова. – СПб. : ПГУПС, 2018. – С. 255–266.
5. Петряев А. В. Несущая способность железнодорожного земляного полотна, армированного геосинтетическими материалами / А. В. Петряев // Транспорт Урала. – 2019. – № 1 (60). – С. 71–75.
6. Журавлев И. Н. Лабораторные испытания армогрунтовых конструкций / И. Н. Журавлев // Бюл. результатов науч. исследований. – 2012. – Вып. 4 (3). – С. 57–62.
7. Петряев А. В. Современные геоматериалы, модельные испытания в лабораторных условиях / А. В. Петряев, И. Н. Журавлев // Современные проблемы и прогрессивные технологии в путевом хозяйстве Октябрьской железной дороги : тез. докл. 43-й науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2001. – С. 119–122.
8. Журавлев И. Н. Оценка влияния геоматериалов на деформативность грунтовых массивов и разработка способа моделирования армирующих свойств геоматериалов / И. Н. Журавлев // Проблемы развития сети железных дорог : межвуз. сб. науч. трудов ; под ред. В. С. Шварцфельда. – Хабаровск : ДВГУПС, 2006. – С. 102–105.
9. Петряев А. В. Моделирование поведения геосинтетического материала в железнодорожном земляном полотне / А. В. Петряев // Транспорт Урала. – 2017. – № 1 (52). – С. 61–66.
10. Журавлев И. Н. Разработка методики расчета напряженно-деформированного состояния земляного полотна, усиленного геоматериалами / И. Н. Журавлев // Железнодорожный транспорт : проблемы и решения : междунар. сб. трудов молодых ученых, аспирантов и докторантов. – СПб. : ПГУПС, 2004. – Вып. 7. – С. 38–42.
11. Петряев А. В. Исследования эффективности применения современных геоматериалов в конструкции железнодорожного пути / А. В. Петряев, И. Н. Журавлев // Исследования и разработки ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте : междувуз. сб. науч. трудов с международным участием. – Самара : СамИИТ, 2001. – Вып. 21. – С. 319–320.
12. Блажко Л. С. Перспектива применения геоматериалов в конструкции верхнего строения пути на участках обращения подвижного состава с осевыми нагрузками до 30 т/ось / Л. С. Блажко // Применение геоматериалов при строительстве и реконструкции транспортных объектов : материалы II Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2002. – С. 66–68.

Дата поступления: 12.12.2019

Решение о публикации: 27.12.2019

Контактная информация:

ЖУРАВЛЕВ Игорь Николаевич – канд. техн. наук, доцент; oldmasterplus@mail.ru

Methodological aspects of reinforced ground structures' deformability study

I. N. Zhuravlev

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

For citation: Zhuravlev I. N. Methodological aspects of reinforced ground structures' deformability study. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 1, pp. 71–76. (In Russian)
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-71-76

Summary

Objective: Presentation of the methodological foundations of the reinforced ground structures deformability study, including procedures, rationales, algorithms for selecting the technical parameters of reinforced ground structures for road construction. **Methods:** Innovative engineering is widely used in the design and construction of such an important component of the road infrastructure as the roadbed. The use of advanced geomaterials allows solving the problem of improving the strength and deformation characteristics of roadbed and base soils. The range of geomaterials, as well as a wide range of tasks facing design engineers, necessitate a thorough study of these advanced technologies. A comprehensive determination and assessment of the degree of change in the deformability of reinforced ground structures versus a combination of structural, operational and process parameters have been carried out. **Results:** The types, objectives, challenges, features of various studies of reinforced ground structures, which are part of a comprehensive analysis, have been considered. **Practical importance:** Methodological aspects of the reinforced ground structures' deformability study can be applied in: developing practical recommendations for determining feasible areas of reinforced ground application in the railway and highway roadbed construction; determining the optimal structural, operational, process parameters of the reinforced ground structures' operation; studying the possibility of using new types of geomaterials for reinforcing soil masses and developing regulatory documentation on the use of reinforced ground structures at transport construction sites.

Keywords: Reinforced ground structure, roadbed, geomaterial, geotechnology, deformability, stress-strain state, transport construction, laboratory tests, laboratory equipment, plate-bearing tests, full-scale tests, design parameters, operational parameters, process parameters, procedure, methodology.

References

1. Gritsyk V. I. Geomaterialy, geokonstruktsii v ob"yektakh zemlyanogo polotna [Geomaterials, geoconstructions in the roadbed facilities]. *Primeneniye geomaterialov pri stroitel'stve i rekonstruktsii transportnykh ob"yektov*. Materialy II Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konferentsii [The use of geomaterials in the construction and reconstruction of transport facilities. Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2002, pp. 29–32. (In Russian)

2. Blazhko L. S., Svintsov E. S. & Petryayev A. V. Ispytaniya modeli ballastnogo sloya, armirovannogo geomaterialami [Testing a model of a stone bed reinforced

with geomaterials]. *Put'i putevoye khozyaystvo [Railway Track and Facilities]*, 2000, no. 6, pp. 29–30. (In Russian)

3. Blazhko L. S., Chuyan S. N., Zakharov V. B. & Chernyayev E. V. Analiz sposobov povysheniya neshchey sposobnosti gruntov osnovnoy ploshchadki zemlyanogo polotna [Analysis of methods of increasing the soil bearing capacity of the top of subgrade]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2016, vol. 13, iss. 3 (48), pp. 328–336. (In Russian)

4. Petryayev A. V. & Ganchits V. V. Armirovaniye podballastnogo sloya georeshetkami kak al'ternativa zashchitnym sloyam iz smesey spetsial'nogo podobrannogo gransostava [Reinforcement of the sub-ballast bed with geogrids as an alternative to protective layers made of specially selected granular mixtures]. *Aktual'nyye prob-*

lemiy razvitiya transportnoy infrastruktury [Urgent matters of the development of transport infrastructure]. Sb. nauch. trudov [Scientific proceedings], ed. by A. F. Kolos, A. V. Kabanov. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, pp. 255–266. (In Russian)

5. Petryayev A. V. Nesushchaya sposobnost' zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna, armirovannogo geosinteticheskimi materialami [Bearing capacity of the railway roadbed reinforced with geosynthetic materials]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2019, no. 1 (60), pp. 71–75. (In Russian)

6. Zhuravlev I. N. Laboratornyye ispytaniya armogruntovykh konstruktsey [Laboratory tests of reinforced ground structures]. *Bulletin of scientific research results*, 2012, iss. 4 (3), pp. 57–62. (In Russian)

7. Petryayev A. V. & Zhuravlev I. N. Sovremennyye geomaterialy, model'nyye ispytaniya v laboratornykh usloviyakh [Modern geomaterials, model laboratory tests]. *Sovremennyye problemy i progressivnyye tekhnologii v putevom khozyaystve Oktyabr'skoy zheleznoy dorogi* [Current issues and advanced technologies in the railway facilities of the October Railway]. Tez. dokl. 43y nauch.-tekhnich. konferentsii [Abstracts of the 43rd Scientific and Technical Conference]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2001, pp. 119–122. (In Russian)

8. Zhuravlev I. N. Otsenka vliyaniya geomaterialov na deformativnost' gruntovykh massivov i razrabotka sposoba modelirovaniya armiruyushchikh svoystv geomaterialov [Assessing the impact of geomaterials on the deformability of soil masses and developing a method for modeling the reinforcing properties of geomaterials]. *Problemy razvitiya seti zheleznykh dorog* [Problems of the railway network development]. Mezhdunar. sb. nauch. trudov [Interuniversity collection of scientific proceedings], ed. by V. S. Shvartsfel'd. Khabarovsk, DVGUPS [Far Eastern State Transport University] Publ., 2006, pp. 102–105. (In Russian)

9. Petryayev A. V. Modelirovaniye povedeniya geosinteticheskogo materiala v zheleznodorozhnom zemlyanom polotne [Modeling the behavior of geosynthetic material in a railway roadbed]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2017, no. 1 (52), pp. 61–66. (In Russian)

10. Zhuravlev I. N. Razrabotka metodiki rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zemlyanogo polotna, usilennogo geomaterialami [Development of a methodology for calculating the stress-strain state of the stress-strain state of the roadbed reinforced with geomaterials]. *Zheleznodorozhnyy transport: problemy i resheniya*. Mezhdunar. sb. trudov molodykh uchenykh, aspirantov i doktorantov [Railway Transport: Problems and Solutions. International proceedings of young scientists, graduate students and doctoral students]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2004, iss. 7, pp. 38–42. (In Russian)

11. Petryayev A. V. & Zhuravlev I. N. Issledovaniya effektivnosti primeneniya sovremennykh geomaterialov v konstruktsey zheleznodorozhnogo puti [Studies of the effectiveness of modern geomaterials in the construction of a railway track]. *Issledovaniya i razrabotki resursosberegayushchikh tekhnologiy na zheleznodorozhnom transporte* [Research and development of resource-saving technologies in railway transport]. Mezhdunar. sb. nauch. trudov s mezhdunarodnym uchastiyem [Interuniversity collection of scientific proceedings with international participation]. Samara, SamIIT [Samara State Transport University] Publ., 2001, iss. 21, pp. 319–320. (In Russian)

12. Blazhko L. S. Perspektiva primeneniya geomaterialov v konstruktsey verkhnego stroyeniya puti na uchastkakh obrashcheniya podvizhnogo sostava s osevyimi nagruzkami do 30 t/os' [The prospect of using geomaterials in the construction of the track's superstructures in the areas of rolling stock circulation with axle loads up to 30 t/axle]. *Primeneniye geomaterialov pri stroitel'stve i rekonstruktsii transportnykh ob'yektov* [The use of geomaterials in the construction and reconstruction of transport facilities]. Materialy II Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konferentsii [Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2002, pp. 66–68. (In Russian)

Received: December 12, 2019

Accepted: December 27, 2019

Author's information:

Igor' N. ZHURAVLEV – PhD in Engineering, Associate Professor; oldmasterplus@mail.ru

УДК 656.223

Анализ показателей эффективности использования железнодорожного подвижного состава

Н. Г. Кобозева

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

Для цитирования: Кобозева Н. Г. Анализ показателей эффективности использования железнодорожного подвижного состава // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 77–83. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-77-83

Аннотация

Цель: Систематизация теоретической и практической базы, а также формирование навыков ведения научных изысканий в области эксплуатации железнодорожного подвижного состава. **Методы:** Сравнение и анализ показателей оценки качества организации перевозочного процесса в части грузовых перевозок с точки зрения эффективности использования железнодорожного подвижного состава. Рассмотрены и изучены показатели, применяемые в разные периоды деятельности железнодорожного транспорта в различных условиях, в том числе существования частного парка вагонов. **Результаты:** Сформирован перечень основных, наиболее универсальных показателей, характеризующих эффективность использования железнодорожного подвижного состава. Показана необходимость приведения этих показателей к современным условиям организации перевозочного процесса в условиях частного парка подвижного состава. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы при разработке правовых, технологических и нормативных условий работы.

Ключевые слова: Железнодорожный транспорт, подвижной состав, показатели эффективности, оборот вагона, порожний пробег, частный парк.

Жесткая конкуренция требует от железнодорожного транспорта постоянного совершенствования и развития на всех уровнях. Основным источником доходов для железнодорожного транспорта являются грузовые перевозки. Их организация – процесс многосторонний и многогранный, представляющий собой сложную логистическую систему, совершенствование и оптимизация которой невозможны без полноценного анализа, базирующегося на правильных, полностью отражающих реальную картину критериях (показателях).

Перевозочный процесс – это совокупность взаимосвязанных технологических операций, выполняемых с грузами и вагонами с целью доставки грузов от грузоотправителя до грузополучателя, если речь идет о грузовых перевозках.

Задача данной статьи – анализ показателей использования грузовых вагонов при организации перевозочного процесса на железнодорожном транспорте. Ключевым моментом при этом является эффективность. Как уже было отмечено, перевозочный процесс – сложная логистическая система, в которой работа каждого составляющего элемента должна быть максимально отлажена и оптимизирована. К основным составляющим, наряду с инфраструктурой, обеспечивающим работу системы, относится подвижной состав. Эффективное использование этих двух составляющих и представляет собой базу для стратегического развития железнодорожного транспорта. Более подробно рассмотрим вопросы эксплуатации железнодорожного подвижного состава.

Еще в конце 1990-х годов Министерство путей сообщения нашей страны пыталось решить проблему дефицита вагонного парка на сети дорог страны [1]. За время реформ на железнодорожном транспорте сформировались определенные конкурентные условия, в связи с чем появилась необходимость внести изменения в систему организации перевозочного процесса, в том числе в процессы регулирования вагонного парка. А это невозможно осуществить без внесения изменений в правовые, технологические и нормативные условия работы. До начала реформирования и по настоящее время в системе технического нормирования ОАО «РЖД» практически не изменились показатели оценки качества перевозочного процесса, которые касаются грузовых перевозок. Как и прежде, комплексным показателем качества работы на железной дороге служит оборот вагона. Важнейшим элементом его расчета является полный рейс вагона, который составляет 3/4 его значения. Однако он (его груженная и порожняя составляющие) сейчас полностью определяется операторами подвижного состава, но не ОАО «РЖД». От операторов зависит и время простоя вагонов в порожнем состоянии на станциях после выгрузки в ожидании выполнения очередного рейса.

Академик Российской академии наук, доктор технических наук, проф. ПГУПС В. А. Кудрявцев определил, что оборот вагона достиг своего минимального показателя в 1965 г.: 5,23 суток [2]. В это время в США он составлял 26 суток. Согласно данным пономерного учета подвижного состава ВНИИАСа, в настоящее время показатели оборота вагона у ОАО «РЖД» – 15 суток, у операторских компаний – 18 суток. Таким образом, эффективность работы подвижного состава инвентарного парка выше, чем частного. Коэффициенты порожнего пробега в СССР были также очень низкими: в 1988 г. у полувагона МПС он составлял 27 % по сравнению с величиной в Российской Федерации. У ОАО «РЖД» он достиг в 2006 г. 42 %, а по итогам 2017 г. – 40,4 % [3].

Однако по настоящее время ОАО «РЖД» ориентируется на показатели, основным из ко-

торых является оборот вагона. Но современные условия диктуют новые правила. Для более полного анализа показателей качества использования железнодорожного подвижного состава были проанализированы работы А. А. Бочаровой, О. П. Юрина, С. Ю. Соснина, Ф. И. Хусаинова, Б. М. Лapidуса, Т. А. Луниной, М. О. Северовой, Л. О. Аникеевой-Науменко [4–9], а также нормативные документы Министерства транспорта Российской Федерации. В исследуемых работах представлены все используемые и предлагаемые к применению показатели эффективности использования железнодорожного подвижного состава с учетом работы в современных условиях. В результате их анализа можно сделать вывод о том, что по-прежнему наиболее востребованными показателями для определения эффективности использования подвижного состава являются оборот вагона и его производительность. В порядке убывания значимости перечень наиболее часто применяемых показателей включает:

- 1) оборот вагона в целом;
- 2) оборот вагона по составляющим:
 - в движении,
 - простой на технических станциях,
 - простой под грузовыми операциями, в том числе на местах необщего пользования;
- 3) производительность вагона;
- 4) коэффициент порожнего пробега;
- 5) полный рейс вагона (груженный и порожний пробег);
- 6) простои в ожидании погрузки–выгрузки и после;
- 7) доходность вагона.

В ряде работ используются менее распространенные показатели, в том числе:

- сокращение потребного рабочего парка,
- среднесуточный пробег вагона,
- средняя дальность перевозок,
- средняя скорость движения,
- срок окупаемости вагона,
- количество порожних вагоноотправок,
- средняя дальность порожней вагоноотправки,
- средняя дальность груженой вагоноотправки,

- общие затраты на оплату провозных платежей порожних вагоноотправок,
- средняя стоимость одной порожней вагоноотправки,
- затраты на оплату провозных платежей, приходящихся на одну груженую вагоноотправку.

Если говорить об операторах подвижного состава, то одним из показателей эффективности работы операторской компании является отношение величины порожнего пробега вагона к общему пробегу за отчетный период. Чем меньше порожних рейсов, тем больше грузов перевезено одной единицей подвижного состава. Это высказывание верно, когда в обороте вагона время, затраченное на начально-конечные операции, значительно меньше времени нахождения его в пути. Из этого следует, что повышение доходности при перевозках на большие расстояния невозможно без обратной загрузки вагонов. При коротком плече пробега вагона улучшение экономики операторов зависит в основном от сокращения простоев при погрузке–выгрузке, т. е. от оборачиваемости вагона.

Можно говорить о двух способах повышения эффективности использования частных вагонов. Первый обычно применяют при использовании специализированного парка, при этом собственник вагона добавляет свои расходы на обновление, содержание подвижного состава и аппарата управления к тарифу за груженный и порожний рейсы и эта сумма выставляется клиенту. Второй способ работает при перевозке в универсальных вагонах. Оператор старается вписать эти расходы в вагонную составляющую, и доходность для него тем больше, чем выше стоимость груза и шире возможность снизить порожний пробег вагонов, загрузив их попутным грузом.

Такой показатель как оборот вагона не утрачивает своей актуальности до тех пор, пока будут существовать железнодорожные перевозки. Любой оператор планирует свою работу, величина которой напрямую зависит от оборота вагона. Если у оператора есть выбор груза, то с учетом оборота вагонов он подберет его так, чтобы получить максимальный финансовый выигрыш.

А для этого необходимо знать и контролировать оборот своего вагона.

В условиях ограниченности пропускных и перерабатывающих способностей инфраструктуры дальнейший рост частного вагонного парка делает недостижимым эффективное использование вагонов и ведет к ухудшению показателей работы. Сокращение издержек возможно путем применения современных логистических схем, а для анализа их эффективности нужен новый подход оценки качества использования инфраструктуры и подвижного состава, в том числе через качественные и количественные показатели.

Ликвидировать экономические потери компании, связанные с ростом маневровой работы, увеличением времени переработки на сортировочных станциях, дополнительным содержанием локомотивов и бригад, позволит применение логистических схем перемещения порожних вагонов. Финансовая ответственность операторов за простой вагона, наделение перевозчика правом перемещения невостребованных вагонов на станции их отстоя, совершенствование нормативно-правовой базы и системы тарифов – это только часть мероприятий для повышения эффективности перевозочного процесса в рамках транспортного рынка. В феврале 2014 г. в компании ОАО «РЖД» были разработаны и утверждены типовые формы договорной документации на оказание услуг по оптимизации логистических схем перевозки, в результате чего созданы условия для привлечения грузовых вагонов в консолидированный парк под управлением перевозчика [10]. В новой модели коммерческая работа с грузовладельцами и регулирование ценообразования на услуги по предоставлению вагонов осуществляются непосредственно операторами, а управление порожним подвижным составом ОАО «РЖД» – на основе принципов балансового метода. Эта технология приводит к максимально эффективному использованию подвижного состава с учетом минимизации порожнего пробега [11–17].

В настоящее время целевой задачей ОАО «РЖД» является повышение качества основной деятельности в части снижения издержек

и минимизации порожнего пробега вагонов грузовых компаний-операторов, в том числе для более эффективного использования железнодорожной инфраструктуры. Необходимость в объективной оценке мероприятий, направленных на решение этих задач, возрастает и невозможно без выработки универсального и сбалансированного подхода к показателям эффективности работы всех участников перевозочного процесса.

Библиографический список

1. Об утверждении порядка мониторинга обеспечения железнодорожным подвижным составом грузовладельцев и использования железнодорожного подвижного состава участниками перевозочного процесса и методики оценки эффективности использования железнодорожного подвижного состава. – Приказ от 5 мая 2012 г. № 136. – М. : Министерство транспорта РФ, 2012.
2. Кудрявцев В. А. Техническое нормирование эксплуатационной работы в новых условиях / В. А. Кудрявцев // Железнодорожный транспорт. – 2004. – № 2. – С. 59–64.
3. Сайт ОАО «РЖД». – URL : http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTUREID=5232&layer_id=3290&id=4094 (дата обращения : 10.10.2019 г.).
4. Бочарова А. А. Исследование эффективности использования частного подвижного состава транспортной компанией : дис. ... канд. экон. наук, специальность : 08.00.05 / А. А. Бочарова. – М. : МИИТ, 2012. – 138 с.
5. Югина О. П. Особенности эффективного использования частного вагонного парка операторской компании / О. П. Югина, С. Ю. Соснин // Вестн. Уральск. гос. ун-та путей сообщения. – 2017. – № 1 (33). – С. 88–89.
6. Хусаинов Ф. И. Экономика, организация и планирование на транспорте / Ф. И. Хусаинов // Вестн. транспорта Поволжья. – 2011. – № 1 (25). – С. 9–10.
7. Лapidус Б. М. Экономические проблемы управления железнодорожным транспортом в России в период становления рыночных отношений / Б. М. Лapidус. – М. : Изд-во МГУ, 2001. – 301 с.
8. Лунина Т. А. Моделирование парка подвижного состава при изменении экономической конъюнктуры рынка / Т. А. Лунина, М. О. Северова // Экономика железных дорог. – 2015. – № 5. – С. 340–345.
9. Аникеева-Науменко Л. О. Методы повышения эффективности использования вагонов грузового парка на железнодорожном транспорте : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 08.06.05 / Л. О. Аникеева-Науменко. – М. : МИИТ, 2014. – 190 с.
10. Распоряжение ОАО «РЖД» от 27.02.2014 г. № 529р (ред. от 26.05.2014 г.). Об утверждении типовой формы договора на оказание услуг по оптимизации логистических схем перевозок вагонов. – М. : ОАО «РЖД», 2014. – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc. (дата обращения: 15.02.2020 г.).
11. Кудрявцев В. А. Управление движением на железнодорожном транспорте : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / В. А. Кудрявцев. – М. : Маршрут, 2003. – 199 с. – (Высшее профессиональное образование).
12. 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 С.-Петерб. конгресса. – СПб. : ПГУПС, 2018. – С. 172–173.
13. Грошев Г. М. Пропускная способность и график движения поездов на участках железной дороги : учеб. пособие / Г. М. Грошев, А. А. Грачёв, А. С. Бессолицын, О. В. Котенко, Б. Е. Алексеев. – СПб. : ПГУПС, 2016. – 53 с.
14. Грошев Г. М. Разработка и определение эффективности информационных технологий оперативно-го регулирования пропуска поездопотоков на полигонах железных дорог / Г. М. Грошев, И. Ю. Романова, И. В. Кашицкий, В. В. Аланин // Интеллектуальные системы на транспорте : сб. материалов V Междунар. науч.-практич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 190–196.
15. Грошев Г. М. Исторический обзор классификаций диспетчерских регулировочных приемов и способов, применяемых на участках, сортировочных станциях и в узлах / Г. М. Грошев, И. Ю. Романова, А. В. Сугоровский, А. В. Сугоровский // Августин Бетанкур : от традиций к будущему инженерного образования : сб. материалов Междунар. науч.-практич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2018. – С. 58–61.

16. Никифорова Г.И. Проблемы управления железнодорожным подвижным составом в современных условиях / Г.И. Никифорова, Т.Г. Сергеева // Транспорт России : проблемы и перспективы–2018 : сб. материалов Междунар. науч.-практич. конференции. – СПб. : ИПТ РАН, 2018. – С. 249–255.

17. Покровская О.Д. Организация международной доставки груза через распределительный центр : учеб.

пособие / О.Д. Покровская. – Новосибирск : Центр развития научного сотрудничества, 2015. – 102 с.

Дата поступления: 12.11.2019

Решение о публикации: 20.02.2020

Контактная информация:

КОБОЗЕВА Нона Гивиевна – ст. преподаватель;
nona-kobozeva@yandex.ru

Railway rolling stock performance analysis

N. G. Kobozeva

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

For citation: Kobozeva N. G. Railway rolling stock performance analysis. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 1, pp. 77–83. (In Russian)
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-77-83

Summary

Objective: Systematization of the theory and practice, as well as the formation of skills for conducting scientific research in the field of railway rolling stock operation. **Methods:** Comparison and analysis of indicators for assessing the quality of the freight traffic process organization in terms of the efficiency of railway rolling stock use. The indicators used in different periods of the railway transport operations in various conditions, including the existence of a private fleet of wagons, have been reviewed and studied. **Results:** A list of the main and most universal indicators characterizing the railway rolling stock performance has been compiled. The necessity of bringing these indicators in line with up-to-date conditions for the transportation process organization in a private rolling stock fleet has been shown. **Practical importance:** The findings can be used in the development of legal, process and regulatory working conditions.

Keywords: Railway transport, rolling stock, performance indicators, wagon turnover, empty mileage, private fleet.

References

1. *Ob utverzhdenii poryadka monitoringa obespecheniya zheleznodorozhnym podvizhnym sostavom gruzovladel'tsev i ispol'zovaniya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava uchastnikami perevozochnogo protsessa i metodiki otsenki effektivnosti ispol'zovaniya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [On the approval of the monitoring procedure for the provision of

railway rolling stock for cargo owners and the use of railway rolling stock by transportation process participants and the methodology for assessing the effectiveness of the use of railway rolling stock]. Order of May 5, 2012, no. 136. Moscow, Ministry of Transport of the Russian Federation Publ., 2012. (In Russian)

2. Kudryavtsev V.A. Tekhnicheskoye normirovaniye ekspluatatsionnoy raboty v novykh usloviyakh [Technical standardization of operational work in new conditions].

Zheleznodorozhnyy transport [The Railway Transport Magazine], 2004, no. 2, pp. 59–64. (In Russian)

3. OJSC Russian Railways website. Available at: http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTUREID=5232&layer_id=3290&id=4094 (accessed: 10.10.2019) (In Russian)

4. Bocharova A. A. *Issledovaniye effektivnosti ispol'zovaniya privatnogo podvizhnogo sostava transportnoy kompaniyey* [Study of the efficiency of using private rolling stock by a transport company]. Dissertatsiya na soiskaniye uchen. stepeni kand. ekon. nauk, spetsial'nost': 08.00.05 [Dissertation for scientist degree of PhD in Economics, specialty: 08.00.05]. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., 2012, 138 p. (In Russian)

5. Yugrina O. P. & Sosnin S. Yu. *Osobennosti effektivnogo ispol'zovaniya privatnogo vagonnogo parka operatorskoy kompanii* [Specific features of the effective use of a private wagon fleet of an operator company]. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo Universiteta putey soobshcheniya* [Vestnik of UrGUPS journal]. Yekaterinburg, UrGUPS [Ural State Transport University] Publ., 2017, no. 1 (33), pp. 88–89. (In Russian)

6. Khusainov F. I. *Ekonomika, organizatsiya i planirovaniye na transporte* [Economics, organization and planning for transport]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Transport Bulletin of the Volga region], 2011, no. 1 (25), pp. 9–10. (In Russian)

7. Lapidus B. M. *Ekonomicheskiye problemy upravleniya zheleznodorozhnym transportom v Rossii v period stanovleniya rynochnykh otnosheniy* [Economic issues of railway management in Russia during the formation of market relations]. Moscow, MSU [Moskovsky State University] Publ., 2001, 301 p. (In Russian)

8. Lunina T. A. & Severova M. O. *Modelirovaniye parka podvizhnogo sostava pri izmenenii ekonomicheskoy kon'yunktury rynka* [Modeling the rolling stock fleet in the changing market economic situation]. *Ekonomika zheleznnykh dorog* [Railway Economy], 2015, no. 5, pp. 340–345. (In Russian)

9. Anikeyeva-Naumenko L. O. *Metody povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya vagonov gruzovogo parka na zheleznodorozhnom transporte* [Methods to improve the efficiency of the use of freight fleet wagons in railway transport]. Dissertatsiya na soiskaniye uchen. stepeni kand. texn. nauk [Dissertation for PhD of Engineerings]. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., 2014, 190 p. (In Russian)

10. *Rasporyazheniye OAO "RZhD" ot 27.02.2014 g., no. 529r (red. ot 26.05.2014) "Ob utverzhdenii tipovoy formy dogovora na okazaniye uslug po optimizatsii logisticheskikh skhem perevozok vagonov"* [Order of Russian Railways dated February 27, 2014 N 529r (529 p) (as amended on May 26, 2014) "On the approval of the standard form of the contract for the provision of services to optimize the logistics schemes for wagons carriage"]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc (accessed: 10.10.2019) (In Russian)

11. Kudryavtsev V. A. *Upravleniye dvizheniyem na zheleznodorozhnom transporte* [Rail traffic control]. Ucheb. posobie dlya vuzov zh.-d. transporta [A training manual for universities of railway transport]. Moscow, Marshrut Publ., 2003, 199 p. (Higher vocational education). (In Russian)

12. Nikiforova G. I. *Issledovaniye problem deyatelnosti operatorskikh kompaniy v upravlenii vagonnym parkom* [Studying the issues of the operator companies' activities in the rolling stock management]. *Professional'noye obrazovaniye, nauka i innovatsii v XXI veke* [Professional education, science and innovation in the 21st century]. Sb. trudov XII Sankt-Peterburgskogo kongressa [Proceedings of the XII St. Petersburg Congress]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, pp. 172–173. (In Russian)

13. Groshev G. M., Grachyov A. A., Bessolitsyn A. S., Kotenko O. V. & Alekseyev A. E. *Propusknaya sposobnost' i grafik dvizheniya poyezdov na uchastkakh zheleznoy dorogi* [The capacity and schedule of trains on railway sections]. Ucheb. posobiye [Training manual]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, 53 p. (In Russian)

14. Groshev G. M., Romanova I. Yu., Kashitskiy I. V. & Alanin V. V. *Razrabotka i opredeleniye effektivnosti informatsionnykh tekhnologiy operativnogo regulirovaniya propuska poyezddpotokov na poligonakh zheleznnykh dorog* [Development and determination of the effectiveness of information technologies for the operational regulation of the passage of train flows in operating domains]. *Intellektual'nyye sistemy na transporte* [Intelligent transport systems]. Sb. materialov V Mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii [Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2015, pp. 190–196. (In Russian)

15. Groshev G. M., Romanova I. Yu., Sugorovskiy A. V. & Sugorovskiy A. V. Istoricheskiy obzor klassifikatsiy dispetcherskikh regulirovochnykh priyomov i sposobov, primenyayemykh na uchastkakh, sortirovochnykh stantsiyakh i v uzlakh [Historical review of classifications of dispatch control adjusting techniques and methods used at sections, classification yards and junctions]. *Avgustin Betankur: ot traditsiy k budushchemu inzhenerenogo obrazovaniya* [Agustin Betancourt: from Traditions to Future of Engineering Education]. Sb. materialov Mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, pp. 58–61. (In Russian)

16. Nikiforova G. I. & Sergeyeva T. G. Problemy upravleniya zheleznodorozhnym podvizhnym sostavom v sovremennykh usloviyakh [Issues of railway rolling stock management in the current conditions]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy* [Transport of Russia: problems

and prospects]. Sb. materialov Mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg, IPTRAS [Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences] Publ., 2018, pp. 249–255. (In Russian)

17. Pokrovskaya O. D. Organizatsiya mezhdunarodnoy dostavki gruzha cherez raspredelitel'nyy tsentr. Uchebnoye posobiye [Organization of international cargo delivery through a distribution center. Training manual]. Novosibirsk, Tsentr razvitiya nauchnogo sotrudnichestva [Scientific Cooperation Development Center] Publ., 2015, 102 p. (In Russian)

Received: November 12, 2019

Accepted: February 20, 2020

Author's information:

Nona G. KOBOZEVA – Senior Lecturer;
nona-kobozeva@yandex.ru

УДК 621.332:3(07)

Основные направления и методы совершенствования поддерживающих конструкций контактной сети железных дорог

Ю. А. Кочунов, Е. С. Волгин

Уральский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 620034, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Для цитирования: Кочунов Ю. А., Волгин Е. С. Основные направления и методы совершенствования поддерживающих конструкций контактной сети железных дорог // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 84–95.
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-84-95

Аннотация

Цель: Оценить существующие и перспективные направления по усовершенствованию и увеличению надежности поддерживающих конструкций контактной сети железных дорог, возможность применения полимерных композитных материалов при изготовлении консолей, а также их работоспособность. **Методы:** Проведен анализ статистических данных состояния поддерживающих устройств контактной подвески. **Результаты:** Проанализировано состояние консолей, находящихся в распоряжении «Трансэнерго» – филиала ОАО «РЖД», рассмотрены причины нарушения нормальной работы поддерживающих конструкций. Описаны консоли, выполненные из полимерных композитных материалов отечественных производителей, определены их достоинства и недостатки, а также выявлены перспективы применения таких конструкций на контактной сети железных дорог России. **Практическая значимость:** Результаты работы могут быть использованы при разработке консолей из полимерных композитных материалов для контактной сети железных дорог, а также в качестве теоретического материала для студентов высших учебных заведений.

Ключевые слова: Контактная сеть железных дорог, консоли, изоляторы, отказы, полимерные композитные материалы, стеклопластик, электрическая прочность, механическая прочность, эксплуатация.

Контактная сеть (КС) железной дороги – это часть тяговой сети железной дороги, предназначенная для обеспечения токосъема и состоящая из контактной подвески, экранирующих и усиливающих проводов, опор, поддерживающих устройств и фиксирующих конструкций [1]. Поддерживающие устройства закрепляют провода КС в определенном положении относительно оси пути, уровня головки рельса, земли и других сооружений. Для этих целей используют консоли, кронштейны, фиксаторы, жесткие (ригели) и гибкие поперечины [2].

В статье проведен анализ состояния консолей, находящихся в распоряжении «Трансэнер-

го» – филиала ОАО «РЖД», выявлены причины нарушения нормальной работы поддерживающих конструкций, а также перспективы усовершенствования и возможность изготовления консолей из полимерных композитных материалов (ПКМ).

На основании ежегодных анализов работы «Трансэнерго» определено общее количество нарушений нормальной работы КС и из них выделены отказы консолей (рис. 1) [3]. На рис. 2 представлена диаграмма соотношения отказов консолей и изоляторов от общего количества устройств КС. На ней видно, что консоли выходят из строя в среднем около 6,5 %, а

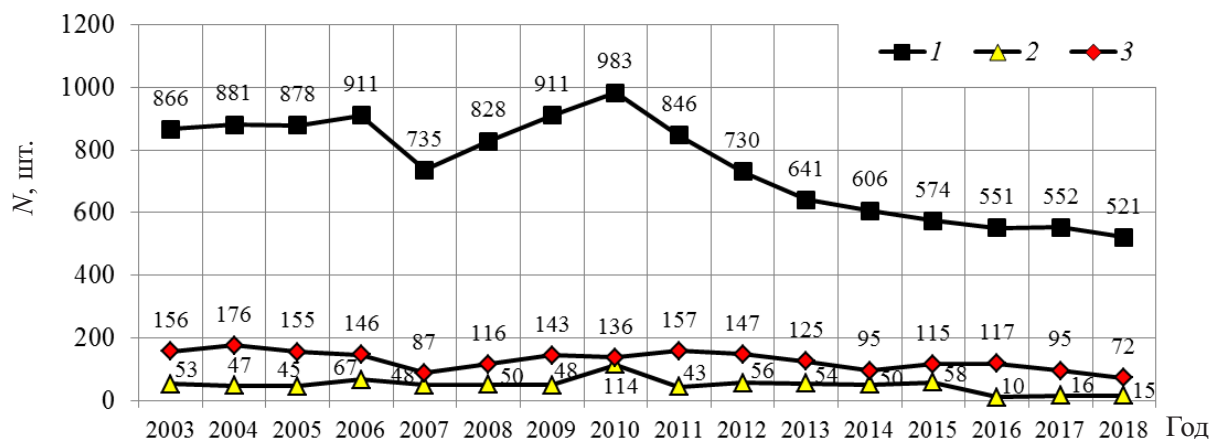


Рис. 1. Общее количество нарушений нормальной работы КС:
 1 – общее количество отказов за год; 2 – количество отказов консолей;
 3 – количество отказов изоляторов

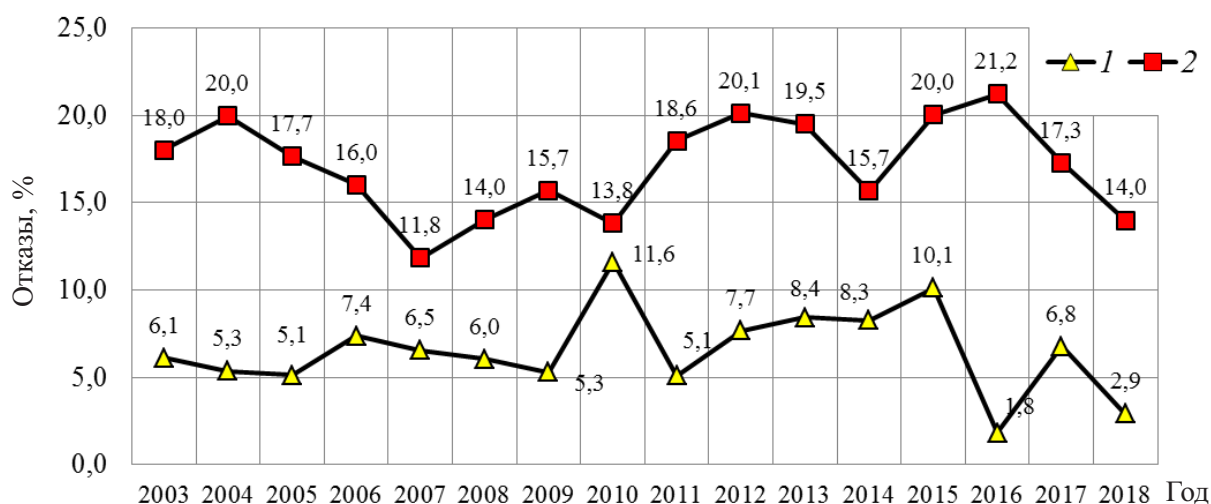


Рис. 2. Соотношение отказов консолей и изоляторов от общего числа нарушений КС:
 1 – консоли; 2 – изоляторы

отказы изоляторов составляют 17% от общего числа отказов устройств КС.

Отметим, что консоли являются элементом поддерживающей конструкции, в которую также входят изоляторы. Отказов изоляторов существенно больше, чем отказов консолей (см. рис. 1 и 2). Таким образом, отказы поддерживающих конструкций составляют примерно 23% от общего числа нарушений нормальной работы КС железных дорог.

С целью уменьшения повреждений поддерживающих конструкций выполняют проверку и регулировку консолей. При проверке оценивают состояние консоли, ее тяг, сварные соединения,

крепежные узлы и степень коррозии металла. Обращают внимание на положение валиков, шпильников, наличие гаек, степень их затяжки. Резьбовые части покрывают антикоррозионной смазкой. На железобетонной опоре проверяют расстояние от ее вершины до хомута тяги консоли, которое должно быть не менее 200 мм. Проверяют крепления к консоли фиксатора, бугеля, узлы соединения изолятора с бугелем и несущим тросом, усиливающим или питающим проводом. В седле проверяют крепление плашки, соединение провода [4]. Выполняют диагностику изоляторов, осмотры и дефектировку фиксирующих элементов, покраску металличе-

ских частей и др. Это лишь небольшой перечень работ, который выявляет и предотвращает развитие дефектов консолей и изоляторов [5].

Повышение надежности устройств КС и консолей, в частности, – одна из актуальных задач для «Трансэнерго». В «Стратегии развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 года» (Стратегия развития РЖД) основным направлением инновационной деятельности является внедрение современных конструкций из ПКМ.

Опыт использования таких материалов на КС железных дорог достаточно большой, но в основном он связан с внедрением полимерных изоляторов. Вопрос применения ПКМ для изготовления комплексной поддерживающей конструкции, обладающей требуемой механической и электрической прочностью, до сих пор актуален. Такие консоли позволяют отказаться от изоляторов, облегчат поддерживающую конструкцию, тем самым уменьшится нагрузка на опору, значительно повысится стабильность несущего троса, что является необходимой предпосылкой надежности КС при высоких скоростях движения поездов. Использование консолей из ПКМ

приведет к большей безопасности производства работ под напряжением [6].

Проведя литературный обзор, можно сказать, что консоли из ПКМ достаточно давно применяются в Европе, например на участках лесовозной железной дороги Тюрингервальдбан и Штрассенбан Гота [7], Ле Мур (Западные Альпы) [8], однако эти участки маломощные и развиваются как туристические. Кроме железных дорог, подобные конструкции можно встретить на КС трамвайных и троллейбусных линий [9].

Отечественные разработки в данной области представлены организациями «Универсал-контактные сети», Нанотехнологическим центром композитов «НКЦ», ВНИИЖТ, МГУПС (МИИТ), ОАО «РОСНАНО» [6, 10–13].

Одним из основных материалов для изготовления поддерживающих конструкций может быть стеклопластик, производство которого возможно методом пултрузии – непрерывной вытяжки профиля постоянного сечения путем протяжки пропитанных полимерным связующим армирующих стекломатериалов через нагретую формообразующую фильеру (рис. 3) [14], а также методом намотки стеклянного ровинга (рис. 4).

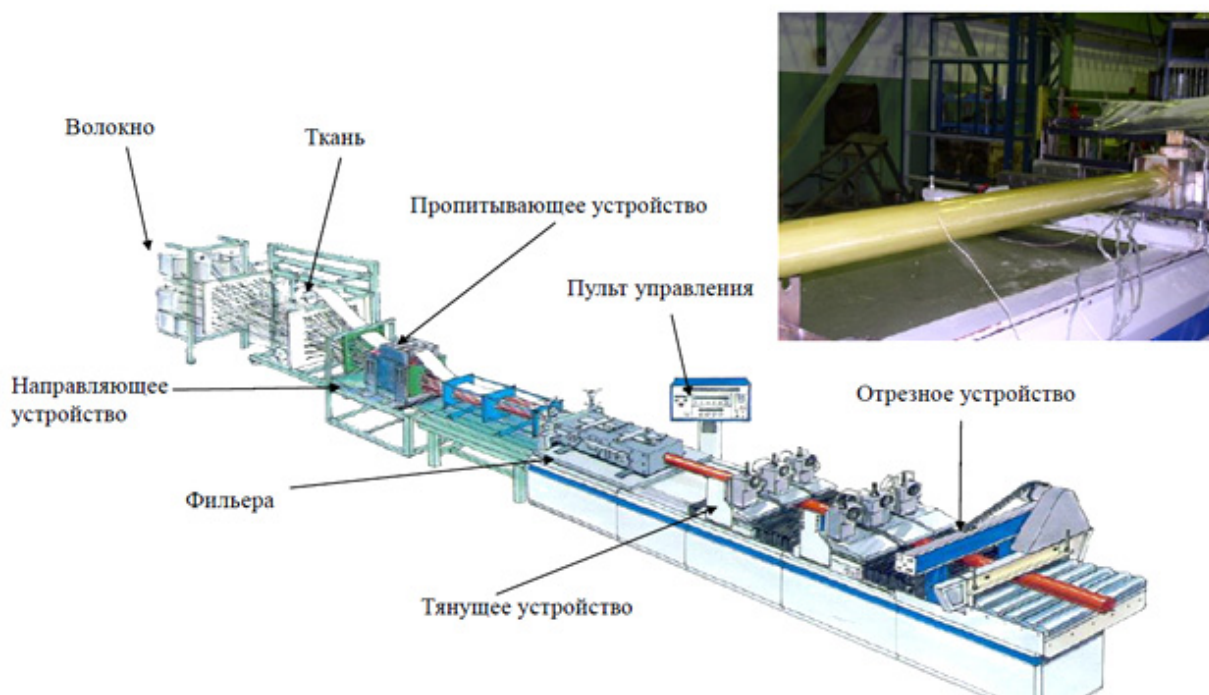


Рис. 3. Процесс изготовления стеклопластикового стержня методом пултрузии

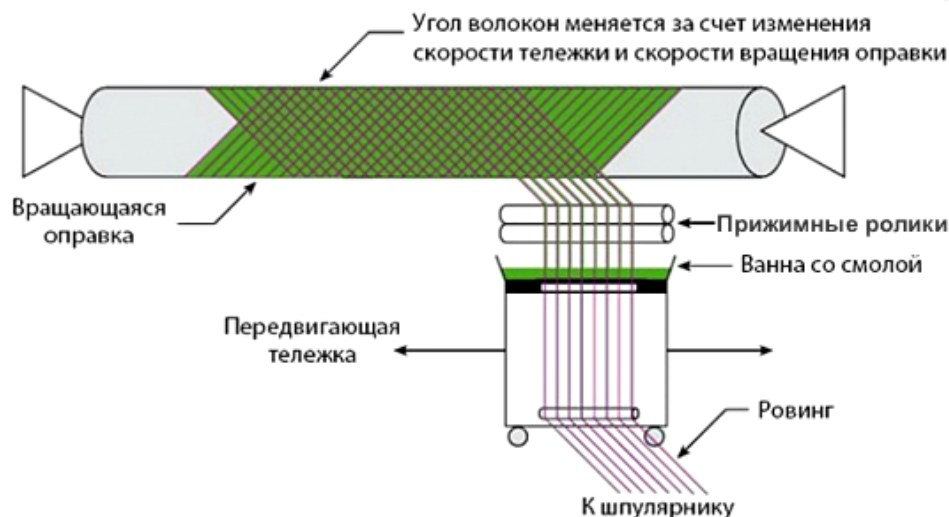
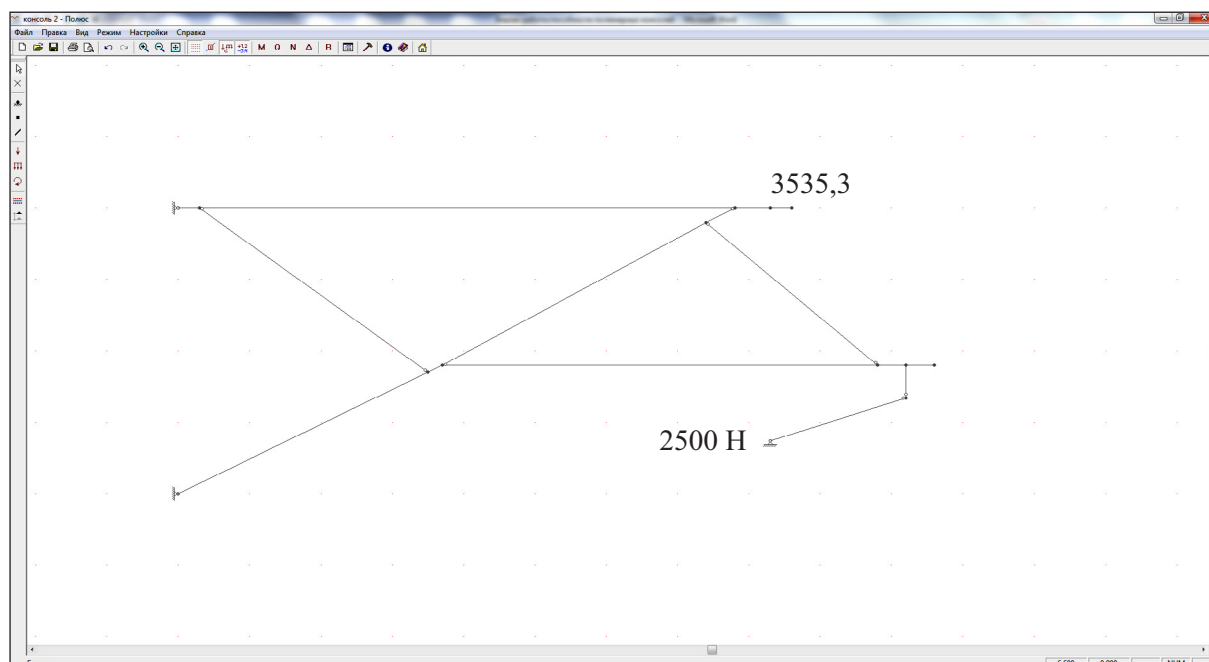


Рис. 4. Технологический процесс мокрой намотки стеклянного ровинга

Используя параметры материала, габариты, схемы приложения и величины нагрузок, представленные в [6, 12], был проведен сравнительный расчет полимерных консолей в программе POLUS, которая позволяет осуществить аналитические исследования механической составляющей конструкций любой формы. Интерфейс достаточно простой и понятный даже для начинающего пользователя [15]. На первом

этапе создается модель (схема) конструкции, далее задаются технические характеристики материала, из которого она изготовлена. Программа позволяет оценить и построить эпюры: максимального изгибающего момента; поперечных, продольных сил; перемещения; реакций в сечении стержней.

На рис. 5 и 6 представлены расчетные схемы.

Рис. 5. Общая схема обратной полимерной консоли при нагрузке $-Q$

The diagram shows a truss structure with several members and joints. The forces and moments are labeled as follows:

- At the top left joint: 2601.76 N (horizontal, left), 66.1009 N (vertical, up), 2601.76 N (horizontal, right), 403.353 (vertical, down).
- At the top right joint: 2274.23 (horizontal, left), 5463.95 (vertical, down), 3535.53 N (horizontal, right), 2500 (vertical, down).
- At the bottom left joint: 4919.44 N (horizontal, right), 2376.32 N (vertical, up), 5463.3 (vertical, down).
- At the bottom right joint: 2682.32 N (horizontal, right), 57.5756 N (vertical, up), 191.197 (horizontal, left), 2500 (vertical, down).
- At the middle left joint: 403.353 (vertical, down), 5275.13 (vertical, down), 5512.79 (vertical, down), 272.443 (horizontal, right).
- At the middle right joint: 182.323 (horizontal, right), 323.323 (vertical, down), 57.5756 (vertical, down), 191.197 (horizontal, left).
- At the top middle joint: 5512.79 (vertical, down), 117.31 (vertical, down).
- At the bottom middle joint: 272.443 (horizontal, right), 182.323 (horizontal, right), 323.323 (vertical, down), 57.5756 (vertical, down), 191.197 (horizontal, left).

Diagram illustrating the structural analysis of a bridge, showing the main span and approach spans. The diagram includes the following data points and forces:

- Top Left Joint:** $DY = 0.000874191$, $R = 0.00583588$
- Top Right Joint:** $DY = 4.088726 \times 10^{-5}$, $R = 0.0126362$
- Top Right Joint (Secondary):** $DY = 8.25874 \times 10^{-5}$, $R = 0.00288456$
- Top Right Joint (Tertiary):** $DY = 0.00540983$, $R = 0.0138875$
- Bottom Left Joint:** $DX = 0.00025605$, $DY = 0.00026515$, $R = 4.68157 \times 10^{-5}$
- Bottom Left Joint (Secondary):** $DX = 0.00029379$, $DY = 0.00021863$, $R = 9.36458 \times 10^{-5}$
- Bottom Right Joint:** $DX = 0.000192350$, $DY = 0.000287003$, $R = 0.00843918$
- Bottom Right Joint (Secondary):** $DX = 4.84805 \times 10^{-5}$, $DY = 0.000153522$
- Bottom Right Joint (Tertiary):** $R = 2500$ N

2020/1

Сравнительные расчеты произведены для консоли из цельного стержневого профиля, трубчатого профиля и для комбинированного варианта, в котором некоторые элементы выполнены в трубчатом исполнении, а другие в стержневом. При этом нагрузки, действующие на консоль, одинаковы.

Первым этапом анализа является изучение конструкции, выполненной из цельного профиля в виде «Стержень» при отрицательной нагрузке от воздействия результирующей нагрузки на несущий трос. Для остальных исследований схемы выглядят аналогично, изменяется лишь величина рассматриваемого показателя, результаты представлены в табл. 1, из которой видно, что более перспективным вариантом является комбинированное использование стержневых и трубчатых стеклопластиковых профилей при

изготовлении консолей. Однако данные расчеты несут лишь рекомендательный характер.

В ходе изучения конструкции отечественной консоли для КС железных дорог можно выделить следующее:

- разработчиками были выбраны трубчатые стеклопластиковые профили сечением $70 \times 7,5$ мм и $80 \times 7,5$ мм (такие профили являются унифицированными и на них можно применять стандартную арматуру КС [16]). На рис. 7 представлен общий вид полимерной консоли;

- основные виды испытаний и нормативные значения для полимерных консолей изложены в [6]. Электрические параметры материала полностью соответствуют заявленным требованиям, параметрам правил устройства электроустановок (ПУЭ) и специализированным ГОСТ;

ТАБЛИЦА 1. Сравнительные результаты расчета композитной консоли

Профиль	Нагрузка, P , Н	Вид эпюры	Показатели	
			«Стержень»	«Труба»
Диаметром 70 мм	2500	M , Н	625	625
		N , Н	5463,3	5463,3
		Δ , мм	5,4	8,7
	5000	M , Н	1250	1250
		N , Н	10 926,6	10 926,6
		Δ , мм	10,8	16,7
Диаметром 60 мм	2500	M , Н	625	625
		N , Н	5463,3	5463,3
		Δ , мм	10,02	14
	5000	M , Н	1250	1250
		N , Н	10 926,6	10 913,6
		Δ , мм	20,05	28,2
Комбинированная консоль диаметром 70 мм с использованием в качестве траверс «Стержень», в качестве тяг и подкоса «Трубу»	2500	M , Н	625	
		N , Н	5468,75	
		Δ , мм	5,4	
	5000	M , Н	1250	
		N , Н	10 937,3	
		Δ , мм	10,8	

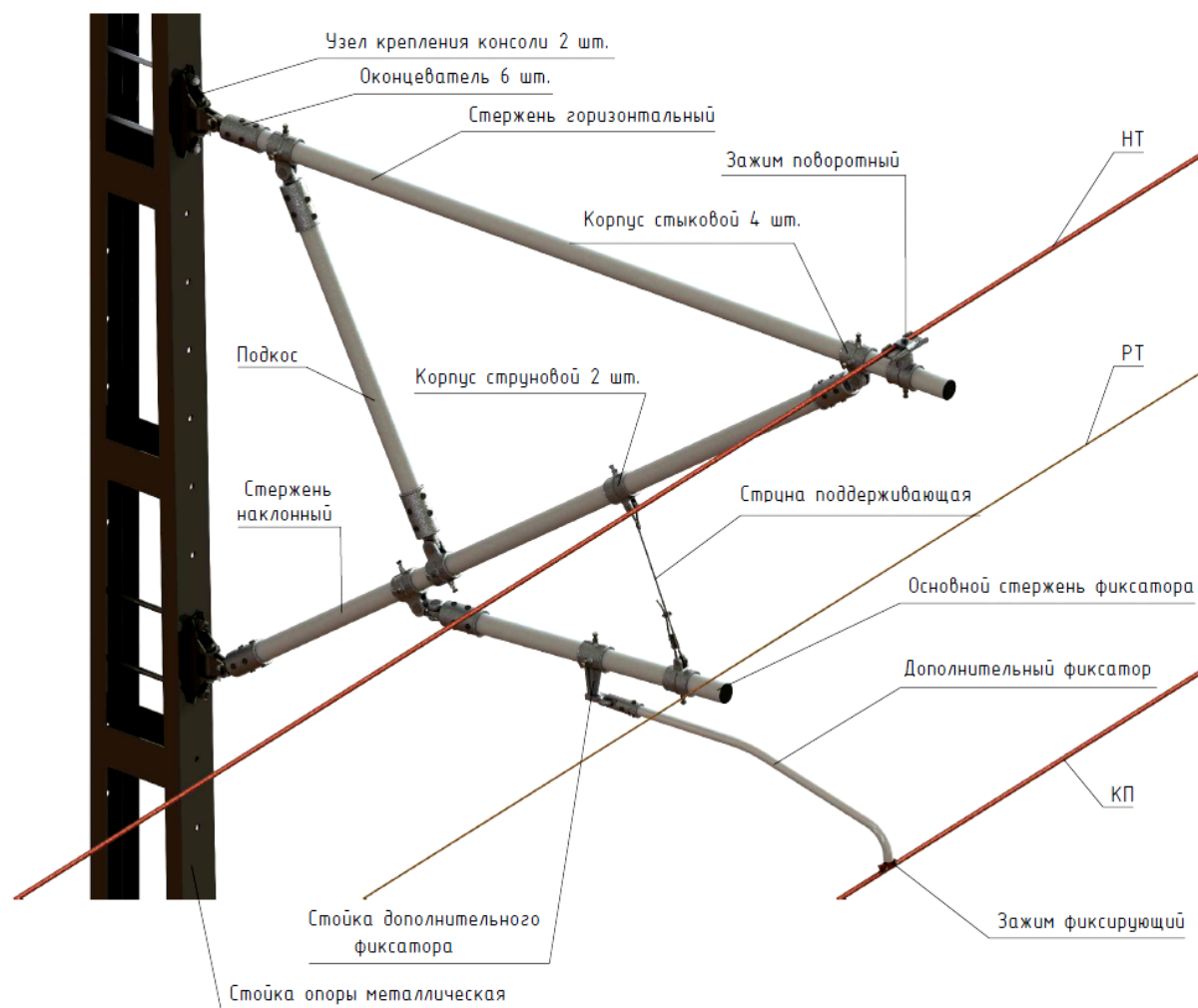


Рис. 7. Общий вид композитной консоли с фиксатором на опоре КС:
 НТ – несущий трос; КП – контактный провод; РТ – рессорный трос

– проверка механической прочности консоли в сборе проведена на стенде по схемам, показанным в [6], по результатам которых определено, что при приложении нагрузки повреждения элементов консолей и фиксаторов не зафиксированы; смещения узлов крепежной арматуры не обнаружены. Однако при прямом нагружении прогиб стержня консоли не соответствует требованиям $1/100$ длины элемента [6]. При обратном нагружении стержень фиксатора не отвечает требованиям, в частности, он не проходит испытания на устойчивость. Это можно объяснить тем, что выбран трубчатый профиль. Например, заменив трубчатые на цилиндрические стержни или используя несколько подко-

сов (тяг), можно добиться более жесткой конструкции [9].

Опытные образцы композитных консолей установлены на испытательном кольце на полигоне в Щербинке (рис. 8).

Частичную информацию о полимерных композитных консолях можно получить в передвижном выставочно-лекционном комплексе (ПВЛК) ОАО «РЖД», вагон «Нанотехнологии», ОАО «РОСНАНО» [17]. Основные преимущественные характеристики консолей из ПКМ рассмотрены в [10].

Несмотря на положительный эффект, показанный полимерными консолями при эксплуатации на полигоне в Щербинке, следует учи-



Рис. 8. Опытная эксплуатация композитной консоли

ТАБЛИЦА 2. Климатические данные предполагаемых мест установки консолей из ПКМ

Место установки	Гололедный район	Ветровой район	Снежный район	Зона степени загрязнения атмосферы	Температурный район, t , °C (+/-)		Относительная влажность воздуха, %
Соликамск	II–III	II	VI	VII	I	36/–45	86
Магнитогорск	III–IV	III	IV	VI	I	40/–41	78
Верхний Баскунчак	III	III	I	VI	II	45/–37	83
Феодосия	III	III	I–II	IV	III	38/–25	82
Красная Поляна	IV	V	VII	IV	III	38/–23	83
ВСКМ-1	I	II	III–IV	IV	II	36/–37	85

Примечание. Указаны участки центральной и южной частей России с точки зрения рационального способа доставки и проведения технического контроля консолей из ПКМ в опытной эксплуатации.

тывать незначительное влияние механических и электрических нагрузок, а также степени загрязнения атмосферы в данном районе. Следо-

вательно, реальные показатели работоспособности консолей из ПКМ можно получить либо через длительный срок, либо при установке в

более суровых условиях эксплуатации, например в районах с сильно загрязненной атмосферой, вблизи химических или металлургических предприятий. На основании [4, 5, 18, 19] определены основные климатические зоны и выбраны наиболее сложные эксплуатационные участки (табл. 2). Опытная эксплуатация в этих районах показала бы более подробные функциональные данные работоспособности консолей из ПКМ. В табл. 2 указан участок высокоскоростной магистрали (ВСМ-1) «Окуловка–Мстинский мост», где достигается максимальная скорость пассажирского состава 250 км/ч (6 мая 2009 г. был установлен абсолютный рекорд скорости движения для Российских железных дорог – 281 км/ч) [20]. Участок ВСМ-1 относится к Медведевской дистанции электроснабжения, климатические данные которого также взяты из [4].

Заключение

В результате проведенных исследований определено, что повреждаемость консолей и применяемых на них изоляторов выражается в достаточно большом количестве отказов – суммарно 23 % от общего числа нарушений нормальной работы КС электрифицированных железных дорог. Одним из решений по уменьшению отказов может быть применение консолей, выполненных из ПКМ. Использование комбинированных конструкций консолей (стержневые и трубчатые профили) может привести к повышению их механической прочности. Применение консолей из ПКМ позволит получить эффект за счет существенной экономической эффективности. Несмотря на все достоинства новых конструкций, необходимо более подробное изучение их работоспособности путем опытной эксплуатации в условиях (районах) повышенной сложности.

Библиографический список

- ГОСТ 12393–2013. Арматура контактной сети железной дороги линейная. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2013. – 26 с.
- Контактная сеть и воздушные линии. Нормативно-методическая документация по эксплуатации контактной сети и высоковольтных воздушных линий : справочник. – М. : Департамент электрификации и электроснабжения Министерства путей сообщения Российской Федерации ; Трансиздат, 2001. – 512 с.
- Анализ работы Трансэнерго по итогам 2016 года. «Трансэнерго» – филиал ОАО «РЖД». – М. : ОАО «РЖД», 2017. – 93 с.
- Контактная сеть и воздушные линии: иллюстрированное пособие по техническому обслуживанию и ремонту контактной сети и воздушных линий. – М. : Департамент электрификации и электроснабжения ОАО «Российские железные дороги» ; Трансиздат, 2006. – 296 с.
- Правила содержания контактной сети, питающих линий, отсасывающих линий, шунтирующих линий и линий электропередачи. – Утв. распоряжением от 25 апреля 2016 г. № 753р (в ред. распоряжений ОАО «РЖД» от 02.08.2017 г. № 1540р, от 16.04.2019 г. № 736р). – М. : ОАО «РЖД», 2016. – 134 с.
- Лукьянов А. М. Разрабатываем полимерные консоли / А. М. Лукьянов, Ю. Г. Чепелев, А. Н. Бардин // Мир транспорта. – 2016. – № 3 (64). – С. 60–71.
- Кисслинг Ф. Контактные сети электрифицированных железных дорог : проектирование, расчет, сооружение, монтаж, эксплуатация / Ф. Кисслинг, Р. Пушманн, А. Шмидер. – 1-е изд. – М. : Сименс Россия, 2018. – 1176 с. – (SIEMENS. Indenuity for life.)
- Железная дорога Ля Мур (Гренобль, Франция). – URL : http://gidtravel.com/country/france/Geleznay_doroga_La-Mur_dp9910.html (дата обращения : 25.01.2020 г.).
- Кочунов Ю. А. Анализ производства кронштейнов контактной сети трамвайных линий, выполненных из полимерных композитных материалов / Ю. А. Кочунов, С. А. Чебаков // Транспортное дело России. – 2018. – № 5. – С. 120–123.
- Каталог продукции НЦК. – URL : <http://www.nccrussia.com/ru/products/220-konsol-kontaktnoj-seti-rzhd.html> (дата обращения : 24.01.2020 г.).
- Нанотехнологии на железнодорожном транспорте : каталог. – М. : РОСНАНО «Железнодорожная отрасль», ОАО «РЖД». 2013. – 32 с. – URL : <https://docplayer.ru/27775070-Nanotehnologii-na-zheleznodorozhnom-transporte-nanotechnology-for->

railway-transport-stroim-novuyu-industriyu-fostering-a-new-industry.html (дата обращения : 24.01.2020 г.).

12. Предварительный национальный стандарт. Консоли из полимерных материалов для контактной сети железных дорог. Методы испытаний. – М. : Стандартинформ, 2014. – 14 с.

13. Кочунов Ю. А. Применение композитных материалов для изготовления поддерживающих конструкций линий продольного электроснабжения / Ю. А. Кочунов // Транспорт Урала. – 2014. – № 1 (40). – С. 76–80.

14. Кленин Ю. Г. Опыт создания конструкций из композиционных материалов для автодорожной и городской инфраструктуры / Ю. Г. Кленин // Материалы Междунар. конференции «Композиты СНГ». Роза Хутор Сочи, 2012. – URL : <http://ciscomposites.com/ru/archive/2012> (дата обращения : 24.01.2020 г.).

15. Построение эпюр в «Полюсе». – URL : <http://alvo.ru/mekhanika/postroenie-epiur-v-polyuse.html> (дата обращения : 28.02.2020 г.).

16. Альбом КС-160.6.1-10. Консоли изолированные горизонтальные, фиксаторы, схемы установки, типоразмеры и таблицы применения. – СПб. : ЗАО «Универсал-контактные сети», 2010. – 164 с.

17. Передвижной выставочно-лекционный комплекс (ПВЛК) ОАО «Российские железные дороги». – URL : <https://www.rusnano.com/about/press-centre/news/20130425-fiop-obnovlena-ekspozitsiya-vagona-nanotekhnologii> (дата обращения : 24.01.2020 г.).

18. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. – Актуализир. ред. СНиП 2.01.07–85*. Офиц. изд. – М. : Минрегион России, 2016. – 86 с.

19. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. – Актуализир. ред. СНиП 23-01–99*. Офиц. изд. – М. : Минрегион России, 2011. – 120 с.

20. Пролетел соколом. Высокоскоростной электропоезд «Сапсан» поставил спринтерский рекорд // Российская газета. – Федеральный вып. № 83 (4907). – 2009. – URL : <https://rg.ru/2009/05/12/sapsan.html> (дата обращения : 24.01.2020 г.).

Дата поступления: 14.01.2020

Решение о публикации: 23.01.2020

Контактная информация:

КОЧУНОВ Юрий Александрович – канд. техн. наук, доцент; yukochunov@mail.ru
ВОЛГИН Евгений Сергеевич – аспирант; EvgenVolgin007@yandex.ru

Basic trends and methods of improvement for supporting structures of the railroad catenary system

Yu. A. Kochunov, E. S. Volgin

Ural State University of Railway Transport, 66, Kolmogorov ul., Yekaterinburg, 620034, the Sverdlovsk region, Russian Federation

For citation: Kochunov Yu. A., Volgin E. S. Basic trends and methods of improvement for supporting structures of the railroad catenary system. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 1, pp. 84–95. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-84-95

Summary

Objective: To evaluate current and perspective trends on safety improvement of supporting structures for the railroad catenary system, applicability of polymer composite materials in the production of consoles as well as their efficiency. **Methods:** Statistical data analysis of the catenary supporting structures was carried out. **Results:** The condition of consoles available to “Transenergo” – the subsidiary of ОАО “Russian Railways” was analyzed, reasons for correct operation failures were considered. Consoles produced from domestic polymer composite materials were described. Their strengths and weaknesses were determined. Application prospects of the above-mentioned structures for the Russian railroad catenary

system were pointed out. **Practical importance:** The obtained results might be used in elaboration of consoles produced from polymer composite materials for the railroad catenary system and as theoretical material for students of higher educational institutions.

Keywords: Railroad catenary system, consoles, insulators, rejection, polymer composite materials, glass fiber reinforced plastic, electric strength, mechanical strength, maintenance.

References

1. GOST 12393–2013. *Armatura kontaktnoy sety zheleznoy dorogi lineynaya. Obshchaya tekhnicheskiye usloviya* [GOST 12393–2013. *Contact system line armature. General technical specifications*]. Moscow, Standartinfrom Publ., 2013, 26 p. (In Russian)
2. *Kontaktnaya set i vozduzhniye linii. Normativno-metodicheskaya dokumentatsiya po ekspluatatsii kontaktnoy sety i vysokovolnykh vozduzhnykh liniy. Spravochnik* [Catenary system and overhead lines. Regulatory and guidance documentation on operation and maintenance of catenary system and overhead lines. Reference guide]. Moscow, Departament elektrifikatsii i elektrosnabzheniya Ministerstva putey soobshcheniya Rossiyskoy Federatsii [Department for electrification and electricity supply of the Ministry of Railways of the Russian Federation], Transizdat Publ., 2001, 512 p. (In Russian)
3. *Analiz raboty Transenergo po itogam 2016 goda* [“Transenergo” performance analysis according to the results of 2016]. “Transenergo” – filial OAO “RZhD” [“Transenergo” – subsidiary of OAO “Russian Railways”]. Moscow, OAO “Russian Railways” Publ., 2017, 93 p. (In Russian)
4. *Kontaktnaya set i vozduzhniye linii. Illustrirovannoye posobiye po tekhnicheskoy obsluzhivaniyu i remontu kontaktnoy sety i vozduzhnykh liniy* [Catenary system and overhead lines. Illustrated aid on maintenance and repair of catenary system and overhead lines]. Moscow, Departament elektrifikatsii i elektrosnabzheniya OAO “Rossiyskiye zhelezniye dorogi” [Department for electrification and electricity supply of the Ministry of Railways of the Russian Federation], Transizdat Publ., 2006, 296 p. (In Russian)
5. *Pravila soderzhaniya kontaktnoy sety, pitayushchikh liniy, otsasyvayushchikh liniy, shuntiruyushchikh liniy i liniy elektroperedachy* [Maintenance rules for catenary system, feed lines, feeder lines, shunt lines and power transmission lines]. Utverzhdeny rasporyazheniyem ot 25 aprelya 2016 g. no. 753r. V redaktsii Rasporyazheniy OAO “RZhD” ot 02.08.2017. Approved by the Order dated April 25th 2016 N 753r. Received by OAO “Russian Railways” editorial board in August 2nd 2017 no. 1540r, dated 16.04.2019 no. 736r. Moscow, OAO “Russian Railways” Publ., 2016, 134 p. (In Russian)
6. Lukyanov A. M., Chepelev Yu. G. & Bardin A. N. Razrabatyvaem polimernye konsoly [The design of polymer cantilever beams]. *Mir transporta* [The world of transport], 2016, no. 3 (64), pp. 60–71. (In Russian)
7. Kissling F., Pushmann R. & Schmider A. *Kontaktniye sety elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog: proektirovaniye, raschet, sooruzheniye, montazh, ekspluatatsiya* [Catenary systems for the electrified railroad: design, calculation, construction, installation work, running]. 1st edition. Moscow, Siemens Russia Publ., 2018, 1176 p. (SIEMENS. Ingenuity for life). (In Russian)
8. *Zheleznyaya doroga La Mur* [La Mur railway] (Grenoble, France). Available at: http://gidtravel.com/country/france/Geleznay_doroga_La-Mur_dp9910.html (accessed: 25.01.2020). (In Russian)
9. Kochunov Yu. A. & Chebakov S. A. Analiz proizvodstva kronshteynov kontaktnoy sety tramvaynykh liniy, vpolnennykh iz polymernykh kompozitnykh materialov [Production study of brackets for tramline catenary, made from polymer composite materials]. *Transportnoye delo Rossii* [Transport business of Russia], 2018, no. 5, pp. 120–123. (In Russian)
10. *Katalog produktsii NTsK* [Nanotechnology Center of Composites Product catalogue]. Available at: <http://www.nccrussia.com/ru/products/220-konsol-kontaktnoj-seti-rzhd.html> (accessed: 24.01.2020). (In Russian)
11. *Nanotekhnologii na zheleznodorozhnom transporte* [Nanotechnologies for railway transport]. Moscow, ROS-NANO “Railway Branch”, OAO “RZhD”, 2013. 32 p. Available at: <https://docplayer.ru/27775070-Nanotekhnologii-na-zheleznodorozhnom-transporte-nanotekhnologii-for-railway-transport-stroim-novuyu-industriyu->

fostering-a-new-industry.html (accessed: 24.01.2020). (In Russian)

12. *Predvaritelnyy natsionalnyy standart. Konsoli iz polimernykh materialov dlya kontaktnoy sety zheleznykh dorog. Metody ispytaniy* [Preliminary national standard. Polymer consoles for railway catenary system. Testing methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 14 p. (In Russian)

13. Kochunov Yu. A. Primeneniye kompozitnykh materialov dlya izgotovleniya podderzhivayushchikh konstruktsiy liniy prodolnogo elektrosnabzheniya [Application of composite materials in the production of supporting structures for direct power transmission lines]. *Transport Urala* [Ural Transport], 2014, no. 1 (40), pp. 76–80. (In Russian)

14. Klenin Yu. G. Opyt sozdaniya konstruktsiy iz kompozitsionnykh materialov dlya avtodorozhnoy i gorodskoy infrastruktury [Production of composite structures for road-transport and urban infrastructure]. *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii “Kompozity SNG”* [Proceeding of the International conference “Composites of the CIS”]. Roza Khutor Sochi, 2012. Available at: <http://ciscomposites.com/ru/archive/2012> (accessed: 24.01.2020). (In Russian)

15. *Postroeniye epyur v “Polyuse”* [Construction of diagrams in “Polus”]. Available at: <http://al-vo.ru/mekhanika/postroenie-epyr-v-polyuse.html> (accessed: 28.02.2020). (In Russian)

16. *Albom KS-160.6.1-10. Konsoly izolirovanniye gorizontalniye, fiksatory, skhemy ustanovky, tiporazmery i tablitsy primeneniya* [KS-160.6.1-10 manual. Isolated horizontal consoles, locking pins, installation diagrams, standard sizes and application charts]. Saint Petersburg, ZAO “Universal-kontaktniye sety” [“Universal catenary systems”], 2010, 164 p. (In Russian)

17. *Peredvizhnoy vystovochno-lektsionniy kompleks (PVLK) OAO “Rossiyskiye zhelezniye dorogi”* [Mobile exhibition and lecture complex (PVLK) of OAO “Russian Railways”]. Available at: <https://www.rusnano.com/about/press-centre/news/20130425-fiop-obnov-lena-ekspozitsiya-vagona-nanotekhnologii> (accessed: 24.01.2020). (In Russian)

18. *SP 20.13330.2011. Nagruzky i vozdeistviya*. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07–85*. [SP [Set of Rules] 20.13330.2011. Loads and effects. Revised edition of SNiP [Construction Norms and Regulations] 2.01.07–85*]. Official publication. Moscow, Minregion Rossii [Ministry of regional development of the Russian Federation] Publ., 2016, 86 p. (In Russian)

19. *SP 131.13330.2012. Stroitel'naya klimatologiya*. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 23-01–99* [SP [Set of Rules] 131.13330.2012. Building climatology. Revised edition SNiP [Construction Norms and Regulations] 23-01–99*]. Official publication. Moscow, Minregion Rossii [Ministry of regional development of the Russian Federation] Publ., 2011, 120 p. (In Russian)

20. *Proletel sokolom. Vysokoskorostnoy poezd “Sapsan” postavil sprinterskiy record* [Flew like a falcon. High-speed electric train “Sapsan” broke sprint record]. Rossiyskaya gazeta, Federal issue no. 83 (4907), 2009. Available at: <https://rg.ru/2009/05/12/sapsan.html> (accessed: 24.01.2020). (In Russian)

Received: January 14, 2020

Accepted: January 23, 2020

Author's information:

Yury A. KOCHUNOV – PhD in Engineering, Associate Professor; yukochunov@mail.ru
Evgeny S. VOLGIN – Postgraduate Student; EvgenVolgin007@yandex.ru

УДК 629.4.016.12

Возможности, перспективы и особенности модульной конструкции грузового электровоза в современных эксплуатационных условиях

В. А. Кручек, О. Р. Хамидов

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

Для цитирования: Кручек В. А., Хамидов О. Р. Возможности, перспективы и особенности модульной конструкции грузового электровоза в современных эксплуатационных условиях // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 96–107. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-96-107

Аннотация

Цель: На участках сети ОАО «РЖД» из-за наличия большого количества пассажирских поездов практически отсутствуют грузовые перевозки. Использование на этих участках современных электровозов 2ЭС4К, 2ЭС6 и 2ЭС10 с поездами небольшого веса приведет к неэффективности их использования. Таким образом, в настоящее время для таких участков сети железной дороги необходимы грузовые электровозы с асинхронным тяговым приводом, которые способны были бы работать с поездами массой до 4000 т с большим коэффициентом полезного действия и могли бы увеличивать тяговые показатели, при возникающем росте грузопотока, для работы с поездами массой от 6000 т и выше в составе двух или трех секций. **Методы:** Проведены сравнение и анализ тяговых и токовых характеристик, коэффициентов полезного действия, электрических схем соединения тяговых электродвигателей, межремонтных пробегов, материальных затрат на техническое обслуживание, трудозатрат на ремонт тепловозов и электровозов, работающих в современных эксплуатационных условиях. Для расчета прочности несущей рамы консольной конструкции базового элемента перспективного электровоза применен метод конечных элементов. **Результаты:** Для достижения большей экономии энергорасходов для работы с поездами небольшого веса необходимы менее мощные односекционные электровозы, чем двухсекционные 2ЭС10. В случае увеличения массы поезда односекционный электровоз должен быть в максимально короткие сроки преобразован в двух- или трехсекционный. **Практическая значимость:** Применение электровоза модульной конструкции приведет к возможности за короткое время переформатировать односекционный локомотив в многосекционный вариант, а также позволит быстро отремонтировать его путем замены неисправного модуля на исправный. В качестве базового элемента электровоза принимается рама несущей консольной конструкции нового типа, на которой устанавливается силовое и вспомогательное оборудование, помещенное в пять отдельных функциональных модулей. Внешняя обшивка проектируемых модулей кузова изготавливается из легких и прочных композитных материалов.

Ключевые слова: Электровоз, грузовой, грузонапряженность, весовая норма, односекционный, двухсекционный, масса поезда, модульная конструкция, несущая рама, многосекционный, кабина, функциональный модуль, статическая нагрузка, динамическая нагрузка, безопасность.

При осуществлении грузовых перевозок по железным дорогам предпочтение отдается тепловозной тяге как автономному тяговому сред-

ству [1]. Однако при применении электрического подвижного тягового состава (ЭПС) (электровозов) появляется возможность повысить про-

пускную способность железной дороги за счет увеличения массы поезда и участковой скорости движения. Электровозы имеют более высокий коэффициент полезного действия (КПД) по сравнению с другими видами тяги. Так, в настоящее время КПД электровозов с учетом КПД электростанций и устройств электроснабжения может достигать до 40 %. Данный показатель достигается в результате применения современной преобразовательной техники и асинхронного тягового привода [2]. Преимуществом ЭПС перед тепловозной тягой является так же и то, что производственные затраты, включая техническое обслуживание и возможный внеплановый ремонт, могут быть сведены до минимального сокращения регламентных работ. Это достигается из-за отсутствия сложных технических устройств и агрегатов (например, дизель-генераторной установки, вспомогательных масло-, водо- и воздухосистем), работающих в режиме высоких температур и агрессивных сред, которые присутствуют на тепловозах [3].

В качестве примера можно привести периодичность проведения ТО-2 и ТР-1 грузовых тепловозов и электровозов [4–7].

Из таблицы видно, что по показателям периодичности проведения ТО-2 электровозы выигрывают за счет большего времени работы, что приводит к наиболее эффективному их использованию в этот период. Однако обратим внимание на тот факт, что у тепловозов больший пробег между ТР-1 по сравнению с электрово-

зами, имеющими коллекторный тяговый привод и систему реостатного регулирования скорости. Также отметим, что, несмотря на значительные пробеги между ТР-1, у тепловозов существует такой вид обслуживания как ТО-3, который предназначен для ревизии механического оборудования и дизель-генераторной установки. У электровозов обслуживание ТО-3 отсутствует, что ведет к сокращению затрат на обслуживание в целом.

Современные разработки в области силовой преобразовательной техники, а также совершенствование асинхронного тягового привода дает возможность создавать электровозы с высокими экономическими показателями по энергопотреблению и имеющим силу тяги продолжительного режима, близкую по значению к тепловозам той же мощностной категории. Так, сила тяги продолжительного режима электровоза 2ЭС10, оснащенного асинхронным тяговым приводом и современной преобразовательной техникой на полупроводниковых элементах, равна 54 800 кгс. В то же время сила тяги таких электровозов как ВЛ10, ВЛ11, 2ЭС4К, 2ЭС6 составляет от 32 000 до 44 300 кгс. Кроме того, электровоз 2ЭС10 помимо высоких тягово-энергетических характеристик имеет большие пробеги между ТО-2 и ТР-1 (см. таблицу).

Таким образом, для ЭПС, оборудованного асинхронными тяговыми электродвигателями (ТЭД) и полупроводниковыми преобразователями, свойственны более высокие тягово-

Периодичность проведения ТО-2 и ТР-1 для грузовых тепловозов и электровозов

Наименование локомотива	Периодичность ТО-2	Периодичность ТР-1
2ТЭ25КМ	120 ч	75 000 км
2ТЭ25А	96 ч	75 000 км
2ТЭ116	72 ч	50 000 км
2ТЭ116У	120 ч	75 000 км
2ЭС4 К	240 ч	50 000 км
ВЛ10У	72 ч	28 000 км
2ЭС6	180 ч	31 500 км
2ЭС10	15 000 км	150 000 км

энергетические характеристики, меньшее энергопотребление (по сравнению с ЭПС, использующим реостатный метод регулирования скорости) и работает с сравнительно большими пробегами между сервисным обслуживанием. На железных дорогах Российской Федерации подобного рода электровозы применяются для работы с грузовыми поездами массой от 5000 т и выше.

В рамках реализации программы развития ОАО «РЖД» для увеличения грузооборота по сети железных дорог проводятся тестовые поездки с массой состава от 9000 до 12 000 т. При этом не учитываются участки с малой грузонапряженностью, на которых помимо пассажирских и пассажирских высокоскоростных поездов обращаются и грузовые поезда. К таким участкам относится главный ход Октябрьской железной дороги. На этом участке из-за обращения большого количества пассажирских поездов грузооборот недостаточно высокий. Полностью вывести грузовые перевозки с главного хода не удастся по причине грузов местного назначения, которые невозможно перевести на другие виды транспорта. Кроме грузовых поездов на подобных дорогах присутствует хозяйственное движение, в котором предусмотрена не только работа путевых машин на отдельных железнодорожных участках, но и транспортирование путевой техники и поездов хозяйственного назначения от места дислокации до места работы. Согласно распоряжению по Октябрьской железной дороге ЦТ-20 от 12.02.2018 г. [8], весовая норма для грузовых поездов на участке от станции Санкт-Петербург-Сортировочный-Московский до станции Ховрино устанавливается в размере от 3000 до 3800 т с критической массой 5200 т, но при этом по факту она не превышает 2000 т [8–10]. Учитывая имеющиеся данные, можно предположить, что электровозы с тяговой характеристикой, подобные ВЛ10 или 2ЭС4К, используют свои тяговые возможности (в особенности 2ЭС4 К) не в полной мере. Реостатная система регулирования скорости на таких локомотивах приводит к перерасходу электроэнергии из-за рассеивания энергий на промежуточных позициях контроллера машиниста в момент разгона.

Одновременно с этим данные электровозы способны работать с поездами массой до 6000 т на участках Полустрово–Пискаревка–Выборг или Санкт-Петербург-Сортировочный-Московский–Бабаево Октябрьской железной дороги.

Таким образом, в настоящее время для рассмотренных участков сети железной дороги необходим такой грузовой электровоз с асинхронным тяговым приводом, который способен был бы работать с поездами массой от 3000 до 4000 т с наибольшей эффективностью и способный увеличивать тяговые показатели при возникающем росте грузопотока для работы с поездами массой от 6000 т и выше в составе двух или трех секций.

Основу парка грузовых электровозов, применяемых на главном ходу Октябрьской железной дороги, составляют электровозы ВЛ10 и ВЛ10У. Для электровозов ВЛ10 сила тяги продолжительного режима составляет 32 000 кгс, скорость продолжительного режима – 51,2 км/ч и осевая нагрузка – 23 т на ось, а для электровозов ВЛ10У – примерно такая же тяговая характеристика, что и ВЛ10, за тем исключением, что у ВЛ10У имеется ограничение по сцеплению при более высокой силе тяги за счет увеличенной нагрузки до 25 т на ось.

Анализ технических возможностей и весовых норм для локомотивного парка, работающих на железнодорожном участке главного хода от Твери до станции Ховрино, используя техническую литературу [2, 4], руководящие документы [5, 8] и каталог профилей для локомотивных бригад ТЧЭ-12 Санкт-Петербург-Финляндский [6] филиала ОАО «РЖД» Октябрьской железной дороги, показывает, что электровозы ВЛ10 и ВЛ10У по своим тяговым возможностям полностью справляются с возложенной на них задачей по работе с поездами массой до 3800 т на данном участке [11]. Однако, если учитывать статистику за 2017 и 2018 гг., масса грузовых поездов, работающих на участке Тверь–Ховрино, не превышает 2000 т (как исключение не более 2500 т), то можно говорить о неэффективности использования для работы с подобными поездами электровозов серии ВЛ10, не говоря уже об электровозах 2ЭС4 К, 2ЭС6 и 2ЭС10. Таким

образом, необходим электровоз, способный работать с грузовыми составами массой до 4000 т с меньшим энергопотреблением при достаточных тяговых возможностях.

Решением поставленной задачи может служить создание односекционного грузового электровоза, способного эффективно (с высоким КПД) работать с поездами массой от 3000 до 4000 т. Учитывая заданную ОАО «РЖД» тенденцию в росте грузооборота на Октябрьской железной дороге и доведение массы поездов до 6000–9000 т, новый электровоз должен быть приспособлен к работе по системе многосекционности, т. е. способного работать в составе двух или при необходимости даже трех секций [12].

Опыт предыдущих лет эксплуатации тягового подвижного состава на сети советских железных дорог позволяет отметить, что подобного рода эксперимент уже был. Наиболее убедительным примером служат электровозы серий 2 ВЛ23, 3 ВЛ23 и 2 ВЛ60. Подобного рода машины переделывались исключительно в условиях ремонтных депо, таких как локомотивное депо ТЧ-2 «Ховрино», где до середины 1990-х годов успешно эксплуатировались наряду с обычными

электровозами ВЛ23 и переделанные электровозы 2 ВЛ23. Проводимые в условиях ремонтных депо переделки электрических схем накладывали ограничения на тяговые характеристики и выявляли свои особенности эксплуатационной работы локомотивных бригад на этих электровозах. Например, из-за наличия реостатной системы регулирования скорости и перегруппировки ТЭД с одного соединения на другое у двухсекционных электровозов возникал двойной перерасход электроэнергии, чем у односекционных ВЛ23, или в 1,5 раза больший, чем у электровозов ВЛ10 и ВЛ11 [13]. Кроме этого соединения ТЭД на 2 ВЛ23 имело аналогичное соединение ТЭД, реализованное на электровозах ВЛ15: последовательное (С) – две ветви по шесть ТЭД в каждой, последовательно-параллельное (СП) – четыре ветви по три ТЭД в каждой, параллельное (П) – шесть ветвей по два ТЭД в каждой, как показано на рис. 1.

При подобных соединениях ТЭД тяговые характеристики электровоза ВЛ15, представленные на рис. 2, показывают, что группы характеристик СП- и П-соединений ТЭД при некотором ослаблении магнитного поля перекрываются друг другом.

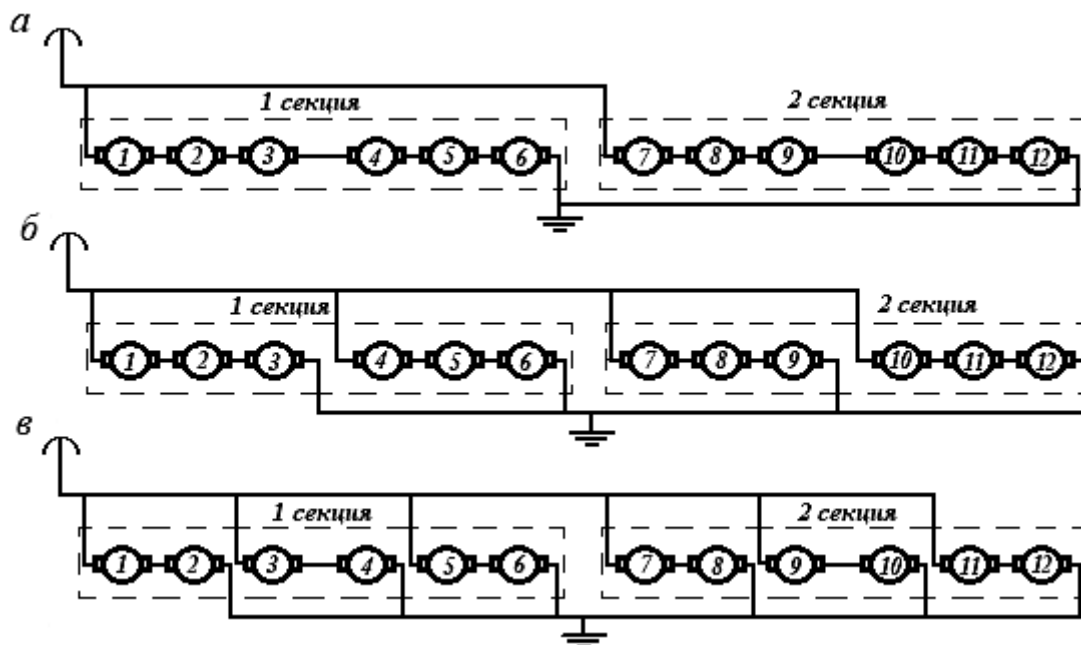


Рис. 1. Соединение ТЭД электровозов 2 ВЛ23 и ВЛ15:
а – последовательное; б – последовательно-параллельное; в – параллельное

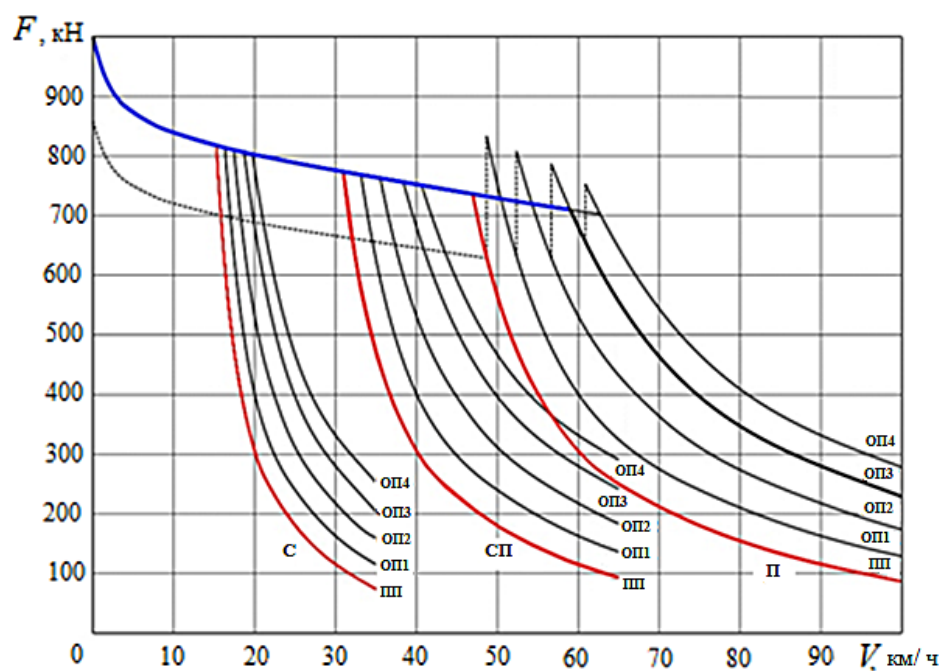


Рис. 2. Тяговые характеристики электровоза ВЛ15

Поэтому, начиная со скоростей $V = 30$ – 35 км/ч, применение реостатов сводится к минимуму. При этом токовые характеристики электровоза ВЛ15, представленные на рис. 3, при СП- и П-соединениях ТЭД со всеми ограничениями очень близки к идеальному виду, которые сейчас имеют только электровозы ЭП20 и 2ЭС10, благодаря наличию плавного регулирования, построенного на современной полупроводниковой платформе.

Кроме этого, работа локомотивных бригад в пути следования на двухсекционных электровозах особенно затруднена из-за отсутствия внутренних переходных площадок между сочлененными электровозами.

Учитывая вышеперечисленные особенности эксплуатации переделанных двухсекционных электровозов на участке Октябрьской железной дороги и наличия большого количества пассажирских и высокоскоростных поездов, скорость движения грузовых поездов на отдельных участках ограничена 90 км/ч, что соответствует выписке из распоряжения скоростного режима по Октябрьской железной дороге. Таким образом, при имеющемся в настоящее время грузовом потоке или его возрастании в будущем пона-

добится электровоз, способный работать с поездами массой от 3000 до 9000 т со скоростями до 90 км/ч, а в перспективе и до 120 км/ч.

В соответствии с программой обновления локомотивного парка ОАО «РЖД» до 2030 г. на железные дороги России стали поступать электровозы постоянного тока 2ЭС4К, 3ЭС4К, 2ЭС6 и 2ЭС10. Обновляется парк электровозов переменного тока такими машинами как 2 (3,4) ЭС5К. Наиболее перспективными считаются опытные электровозы 2ЭС5 (переменный ток, ООО ПК «НЭВЗ»), 2ЭС7 (переменный ток, ООО «Уральские Локомотивы»), а также серийный 2ЭС10 (постоянный ток, ООО «Уральские Локомотивы»). К преимуществам данных машин можно отнести асинхронный тяговый привод, модульность конструкции и внедрение микропроцессорной системы управления и диагностики. Подобные решения позволяют достичь наиболее высоких технико-экономических показателей [2].

Учитывая сложившуюся ситуацию и современные условия грузового движения, а также исторический, технический и технологический опыт в области электровозостроения, можно сказать, что решением поставленной задачи мо-

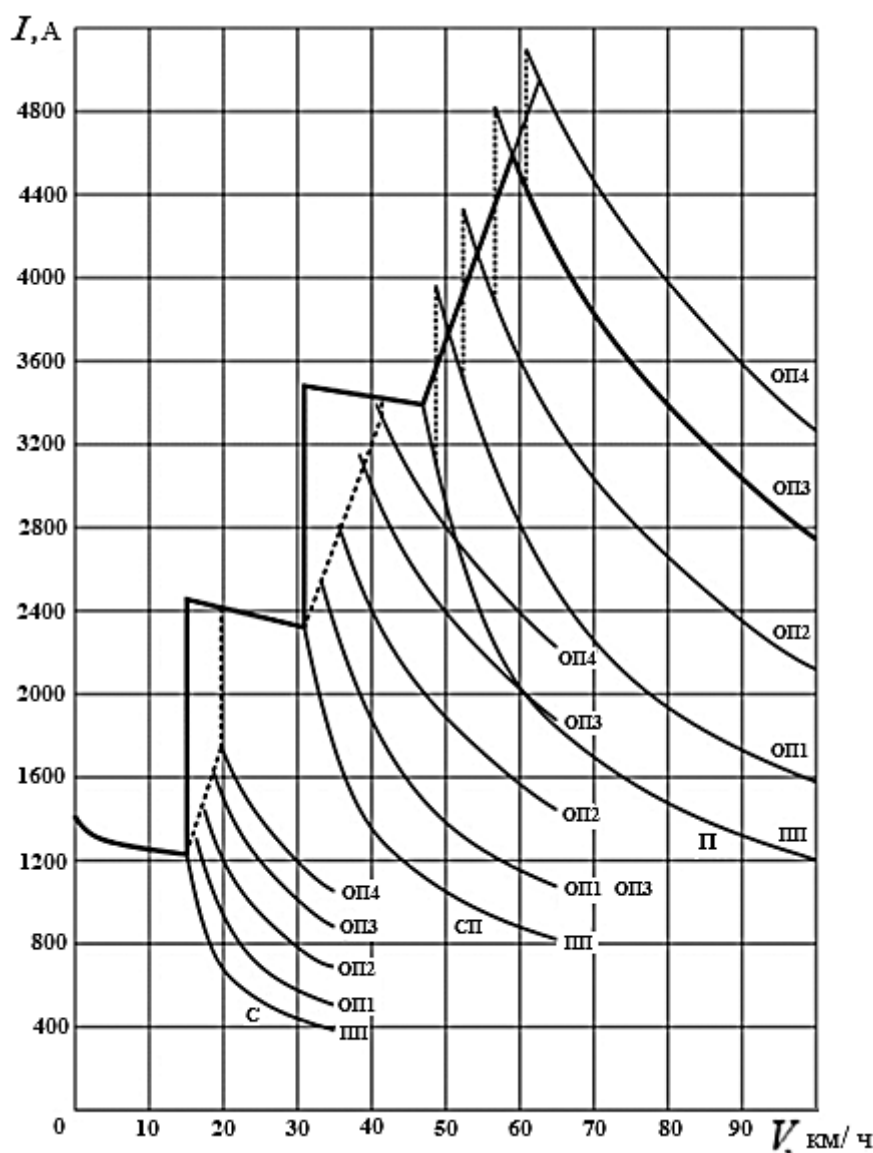


Рис. 3. Токовые характеристики электровоза ВЛ15

жет явиться создание односекционного модульного грузового электровоза с главной несущей рамой новой конструкции, которая позволит формировать в дальнейшем из односекционного электровоза не только двух- или даже трехсекционные локомотивы, но и в случае изменения системы электрификации участка быстро и рационально переоснастить имеющийся парк электровозов с одного рода тока на другой. Кроме этого, применение электровоза модульной конструкции дает возможность не только в короткое время переформатировать его в многосекционный вариант, но и осуществить быстрый

ремонт путем замены неисправного модуля на исправный.

Основным вариантом является односекционный грузовый электровоз модульной конструкции на двух трехосных тележках и с асинхронным тяговым приводом. В качестве базового элемента электровоза принимается рама несущей конструкции нового типа, на которой устанавливается силовое и вспомогательное оборудование, размещенное в отдельных функциональных модулях. Рама в процессе эксплуатации воспринимает на себя статические и динамические нагрузки, такие как от массы

размещенного на ней оборудования, продольные реакции от состава в процессе движения и трогания с места, а также тяговые и тормозные усилия, приходящие от ходовых тележек. Применение подобной рамы и модулей приводит к увеличению веса локомотива до расчетных значений естественным путем без использования дополнительного балласта. Главная несущая рама электровоза, показанная на рис. 4, позволяет полностью использовать подкузовное пространство для размещения в нем модулей с тяговым и вспомогательным оборудованием.

К основным элементам конструкции главной рамы (рис. 4) относятся: стяжные ящики (1), расположенные по торцовым краям рамы, в которых размещаются автосцепные устройства, воспринимающие продольные усилия от состава и ходовых тележек через кронштейн тягового поводка (4), а также для передачи тяговых и тормозных усилий на продольные несущие балки и восприятия веса от модуля кабины или модуля тамбура; поперечные балки (2), являющиеся элементами конструкции для соединения продольных несущих балок; опорная балка (3) предназначена для стяжки продольных несущих балок, а также служит дополнительной точкой опоры для модуля вспомогательного оборудования; две продольные несущие балки (5) – главные элементы конструкции главной рамы, в задачу которых входит восприятие сжимающих и растягивающих продольных усилий, прихо-

дящихся на раму [14, 15], а также являющиеся основанием для размещения модулей силового и вспомогательного оборудования; поперечные балки ниши (6) – как элементы конструкции П-образной формы, которые позволяют использовать подкузовное пространство для размещения модуля силового оборудования и так же, как и поперечные балки, есть стяжки для продольных несущих балок (6).

Кабина управления, силовое, вспомогательное и другое оборудование электровоза, размещенные в отдельных модулях и установленные на главной раме, образуют кузов с внутренним сквозным проходом. Практическая реализация задачи по созданию всей линейки модульных электровозов, начиная от односекционного и заканчивая многосекционными, возможна при наличии модуля кабины, модуля вспомогательного оборудования, модуля силового оборудования, модуля санитарного узла и тамбурного модуля, как показано на рис. 5.

Модуль кабины представляет собой кабину управления с установленными пассивными системами безопасности для локомотивной бригады. Для максимального изолирования вредных вибрационных воздействий на локомотивную бригаду, возникающих во время движения электровоза, в процессе движения электровоза модуль кабины устанавливается на вибропоглощающие опоры, которые опираются на стяжной ящик главной рамы. Кроме этого, в модуль каби-

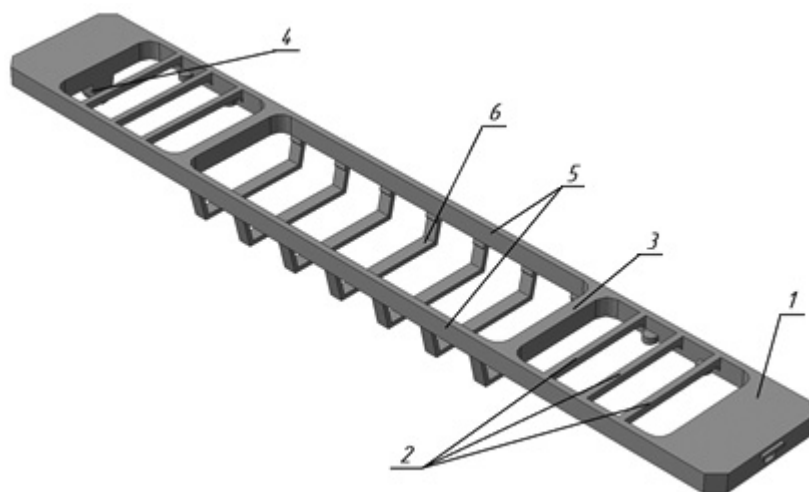


Рис. 4. Главная несущая рама модульного электровоза

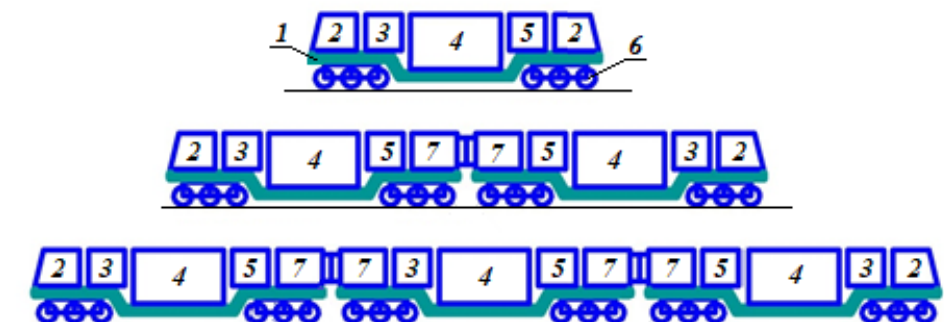


Рис. 5. Модульная конструкция одно-, двух- и трехсекционного электровоза:
 1 – главная рама; 2 – модуль кабины; 3 – модуль вспомогательного оборудования; 4 – модуль силового оборудования; 5 – модуль санитарного и дополнительного оборудования; 6 – ходовая тележка; 7 – модуль-тамбур

ны могут быть интегрированы системы пассивной безопасности. Наиболее распространены пассивные блоки, которые в момент столкновения с препятствием воспринимают на себя основную силу удара, сохраняя внутреннее пространство кабины, как показано на примере электровоза ЭП20 на рис. 6.

Модуль вспомогательного оборудования (см. рис. 5) предназначен для размещения в нем обязательных устройств, обеспечивающих работоспособность как агрегатов силового модуля, так и электровоза в целом. В нем располагаются мотор-вентиляторы охлаждения ТЭД, мотор-компрессор и т. п. Данный модуль опирается на продольные несущие балки основной рамы.

В зависимости от электрификации участка (рода тока), на котором предполагается эксплуатировать электровоз, в модуле силового оборудования размещаются тяговый трансформатор, другое силовое оборудование и аппараты для работы электровоза. Такое решение позволит максимально быстро в условиях основного локомотивного депо сформировать или переоборудовать электровоз для работы на участках, электрифицированных разным видом тока (постоянным или переменным). По конструктивному исполнению модуль силового оборудования схож с модулем вспомогательного оборудования и располагается в нише по центру главной несущей рамы электровоза. С целью более пол-

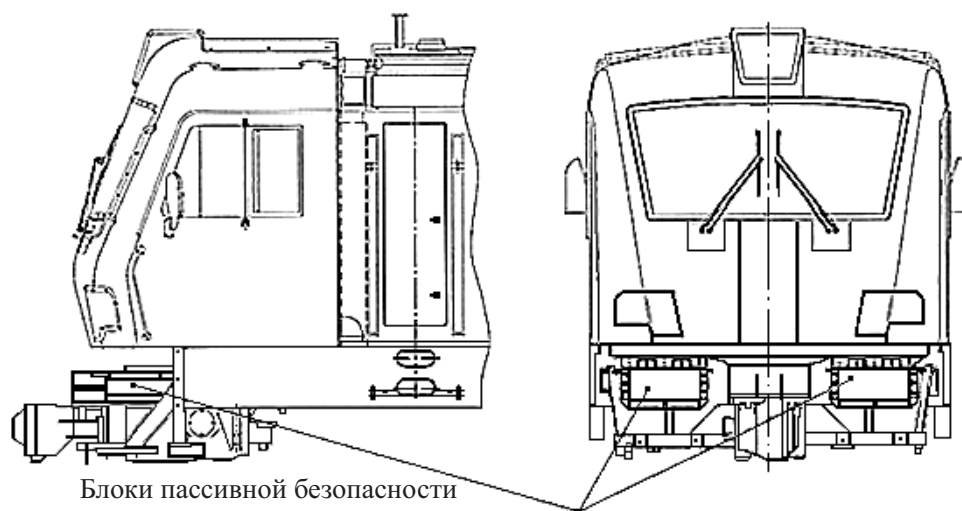


Рис. 6. Система пассивной безопасности электровоза

ного использования объема рамной ниши габариты модуля силового оборудования совпадают.

Как показано на рис. 5, модуль-тамбур позволяет преобразовать односекционный локомотив в многосекционный. Применение модульной компоновки электровоза дает возможность формировать двух- и при необходимости n -секционные электровозы при повышении грузооборота на отдельном участке его эксплуатации или по другим причинам. Модуль-тамбур размещается на консольной части рамы вместо одного из модулей кабины. Подобное решение позволяет в процессе эксплуатации локомотивной бригаде беспрепятственно и без выхода из электровоза перемещаться из одной секции в другую.

Модуль санитарного оборудования устанавливается в единственном экземпляре на один многосекционный локомотив или может быть исполнен совместно с модулем кабины. Возможны и другие варианты компоновки.

Для исключения избыточного веса и уменьшения нагрузки на ось колесной пары внешнюю обшивку проектируемых модулей кузова следует изготавливать из легких и одновременно прочных композитных материалов.

Таким образом, применение главной несущей рамы с внутренней заглубленной центральной нишей и модульной конструкцией оборудования, имеющей обшивку из облегченных композитных материалов, приведет к выполнению условия осевой нагрузки, которая составляет 25 т/ось, без применения дополнительного балласта, в отличие от грузовых электровозов ВЛ10У, 2ЭС4К, 2ЭС6 и 2ЭС10. Рациональное использование тяговых средств на железнодорожном транспорте, а также внедрение новых технологий в области проектирования нового подвижного состава дает возможность экономить значительные средства, затрачиваемые на эксплуатацию и ремонт, что, в свою очередь, ведет к повышению эффективности и конкурентоспособности железнодорожного транспорта в целом. Современные достижения в области тягового привода и силовой преобразовательной техники позволяют значительно понизить энергопотребление ЭПС и практически в 2 раза

повысить тяговые возможности электровозов и электропоездов, а модульная компоновка оборудования – быстро проводить все виды ремонтов (в том числе и внеплановые), а также адаптировать имеющийся тяговый подвижной состав под конкретные условия эксплуатации.

Библиографический список

1. Кручек В. А. Коэффициент использования сцепной массы локомотива с групповым тяговым приводом колесных пар / В. А. Кручек, А. В. Грищенко, Т. С. Титова // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 14. – Вып. 2. – С. 267–280.
2. Раков В. А. Локомотивы отечественных железных дорог (1956–1975 гг.) / В. А. Раков. – М. : Транспорт, 1999. – 443 с.
3. Шрайбер М. А. Повышение эффективности технического обслуживания локомотивов / М. А. Шрайбер, А. В. Грищенко, В. В. Грачев, В. А. Кручек // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2012. – Вып. 4. – С. 93–98.
4. Хаймоненко А. И. Руководство по эксплуатации. Электровоз 2ЭС4 К / А. И. Хаймоненко. – М. : ОАО «РЖД», 2007. – 142 с.
5. Говоров В. С. Руководство по эксплуатации. Тепловоз 2ТЭ25А / В. С. Говоров. – Брянск : ЗАО «УК БМЗ», 2009. – 199 с.
6. Андросов Н. Н. Руководство по эксплуатации. Электровоз 2ЭС6 / Н. Н. Андросов. – Екатеринбург : ОАО «УАЖМ», 2009. – 171 с.
7. Андросов Н. Н. Электровоз 2ЭС10. Руководство по эксплуатации / Н. Н. Андросов. – Екатеринбург : ОАО «УАЖМ», 2009. – 101 с.
8. ЦТ-20 от 12.02.2018 г. Нормы массы и длины грузовых поездов по сериям локомотивов для Октябрьской железной дороги. – М. : ОАО «РЖД», 2018.
9. Распоряжение ОАО «РЖД» от 3 декабря 2012 г. № 2434р «О порядке издания приказов об установлении норм масс и длин поездов на участках ОАО «РЖД»». – М. : ОАО «РЖД», 2012.
10. Распоряжение № 1651р от 11.08.2016 г. «О нормах межремонтных пробегов железнодорожного подвижного состава, эксплуатируемого на инфраструктуре ОАО «РЖД»». – М. : ОАО «РЖД», 2016.

11. Кручек В. А. Анализ тяговых возможностей и весовых норм парка грузовых электровозов Октябрьской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» / В. А. Кручек, И. В. Евченко // Специальная техника и технологии транспорта : сб. науч. статей. – СПб. : ВАМТО, 2019. – Вып. 2. – Ч. 2. – С. 77–83.

12. Кручек В. А. Электровоз модульной конструкции / В. А. Кручек, Г. Д. Шелудяков // Сб. материалов VI Междунар. науч.-технич. конференции «Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век». – СПб. : ПГУПС, 2018. – Т. 2. – С. 34–38.

13. Осинцев И. А. Устройство и работа электрической схемы электровозов серии ВЛ10 и ВЛ10У. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2013. – 384 с.

14. Кручек В. А. Исследование напряженно-деформированного состояния рамы тепловоза UzTE16M /

В. А. Кручек, Х. Р. Косимов // Сб. науч. трудов Республиканск. науч.-технич. конференции «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». – Ташкент : ТашИИТ, 2013. – С. 69–77.

15. Кручек В. А. Оценка остаточного ресурса рам локомотивов и продление их службы / В. А. Кручек, Х. Р. Косимов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2013. – Вып. 1. – С. 115–122.

Дата поступления: 21.11. 2019

Решение о публикации: 02.12.2019

Контактная информация:

КРУЧЕК Виктор Александрович – д-р техн. наук, профессор; victor.kruchek@yandex.ru

ХАМИДОВ Отабек Рустамович – канд. техн. наук, доцент, докторант;

otabek.rustamovich@yandex.ru

Opportunities, prospects and special features of modular design of the electric freight locomotive in modern operational conditions

V. A. Kruchek, O. R. Khamidov

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

For citation: Kruchek V. A., Khamidov O. R. Opportunities, prospects and special features of modular design of the electric freight locomotive in modern operational conditions. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 1, pp. 96–107. (In Russian)
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-96-107

Summary

Objective: Freight traffic is not available at sections of ОАО “Russian Railways” due to a considerable number of passenger trains. The use of such modern electric locomotives as 2ES4K, 2ES6 and 2ES10 with low-weight trains at these sections might prove to be inefficient. Thus, at present freight electric trains with asynchronous power actuator are essential at such sections of the railway net, as the former are capable of efficient functioning with trains up to 4000 ton and can increase haulage indices in case of freight traffic growth as well as with trains of 6000 ton and more consisting of two or three sections. **Methods:** The comparison and analysis of tractive and current characteristics, efficiency factors, electric connection diagrams of traction electric motors, distance run between overhauls, tangible costs on maintenance, labor expenditures on maintenance of diesel and electric locomotives functioning in modern operational conditions. Finite-element method was applied for strength analysis of the overhanging design supporting frame of the future electric locomotive basic element. **Results:** Less high-powered one-section electric locomotives, compared to two-section 2ES10, are needed for operation with low weight trains in order to reduce power costs. A single-section electric locomotive is to be converted into two or three-section locomotive within the shortest period of time in case of train weight increase. **Practical importance:**

The use of the electric locomotive with modular design will make it possible to convert a single-section locomotive into a multisection one in the shortest period of time. It will also allow quick repair of the locomotive by means of replacing the defective module with a working one. The overhanging design supporting frame of the new type is taken as the basic element of the electric locomotive. Power and supporting facilities placed into five separate functional modules are installed on the above-mentioned frame. The inner skin of the superstructure modules under design is produced from light and durable composite materials.

Keywords: Electric locomotive, freight, traffic volume, tonnage rating, single-section, two-section, train weight, modular design, supporting frame, multisection, cab, functional module, static load, dynamic load, security.

References

1. Kruchek V.A., Grishchenko A.V. & Titova T.S. Koefitsient ispolzovaniya stepnoy massy lokomotiva s gruppovym tyagovym privodom kolesnykh par [Coefficient of adhesive weight efficiency of the locomotive with group power actuator of the wheel pair]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, vol. 14, iss. 2, pp. 267–280. (In Russian)
2. Rakov V.A. *Lokomotivy otechestvennykh zheleznykh dorog (1956–1975 gg.)* [Home-produced locomotives (1956–1975)]. Moscow, Transport Publ., 1999, 443 p. (In Russian)
3. Shraiber M.A., Grishchenko A.V., Grachev V.V. & Kruchek V.A. Povysheniye effektivnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniya lokomotivov [Efficiency improvement of maintenance operation of locomotives]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2012, iss. 4, pp. 93–98. (In Russian)
4. Khaimonenko A.I. *Rukovodstvo po ekspluatatsii. Elektrovoz 2ES4K* [Maintenance manual. Electric locomotive 2ES4K]. Moscow, OAO “Russian Railways” Publ., 2007, 142 p. (In Russian)
5. Govorov V.S. *Rukovodstvo po ekspluatatsii. Teplovoz 2TE25A* [Maintenance manual. Diesel locomotive 2TE25 A]. Bryansk, ZAO “UK BMZ” [Managing Company Bryansk Machine Engineering Plant] Publ., 2009, 199 p. (In Russian)
6. Androsov N.N. *Rukovodstvo po ekspluatatsii. Elektrovoz 2ES6* [Maintenance manual. Electric locomotive 2ES6]. Yekaterinburg, OAO “UAZhM” Publ., 2009, 171 p. (In Russian)
7. Androsov N.N. *Elektrovoz 2ES10. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Electric locomotive 2ES10. Maintenance manual]. Yekaterinburg, OAO “UAZhM” Publ., 2009, 101 p. (In Russian)
8. *TsT-20 ot 12.02.2018 g. Normy massy i dliny gruzovykh poezdov po seriyam lokomotivov dlya Oktyabrskoy zheleznoy dorogi* [TsT-20 [Railway Locomotive Economy Department dated February 12th, 2018]. Load and length standards for freight trains according to the range of locomotives for October Railway]. Moscow, OAO “RZhD” [“Russian Railways”] Publ., 2018. (In Russian)
9. *Rasporyazheniye OAO “RZhD” ot 3 dekabrya 2012 g. no. 2434r “O poryadke izdaniya prikazov ob ustanovlenii norm mass i dlin poezdov na uchastkakh OAO “RZhD”* [Order by OAO “Russian Railways” dated December 3rd 2012. N 2434r “On issuing orders for establishment of length and load standards for trains at sections of OAO “Russian Railways”]. Moscow, OAO “RZhD” [“Russian Railways”] Publ., 2012. (In Russian)
10. *Rasporyazheniye no. 1651r ot 11.08.2016 g. “O normakh mezhremontnykh probegov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava, ekspluatiruyemogo na infrastrukturu OAO “RZhD”* [Order N 1651r dated August 11th 2016 “On the norms of distance run between overhauls for the railway rolling stock operated by OAO “Russian Railways”]. Moscow, OAO “RZhD” [“Russian Railways”] Publ., 2016. (In Russian)
11. Kruchek V.A. & Evchenko I.V. Analiz tyagovykh vozmozhnostey i vesovykh norm parka gruzovykh elektrovozov Oktyabrskoy zheleznoy dorogi – filiala OAO “RZhD” [The analysis of traction ability and tonnage rating for the October Railway fleet of electric freight

locomotives of – OAO “Russian Railways” subsidiary]. *Spetsialnaya tekhnika i tekhnologii transporta* [Special-purpose machinery and transport solutions]. Collection of research papers. Saint Petersburg, VAMTO [General Khrulev A. V. Military Academy of Material Logistics] Publ., 2019, iss. 2, pp. 77–83. (In Russian)

12. Kruchek V.A. & Sheludyakov G.D. Elektrovoz modulnoy konstruktсии [Electric locomotive of the module-type construction]. *Sb. materialov VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Lokomotivy. Elektricheskiy transport. XXI vek”* [Collected papers of the 6th International Research and Training Conference “Locomotives. Electric transport. 21st century”]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, vol. 2, pp. 34–38. (In Russian)

13. Osintsev I.A. *Ustroistvo i rabota elektricheskoy skhemy elektrovozov serii VL10 i VL10U* [Operation and description of a circuit diagram for the VL10 and VL10U-series electric locomotives]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 2013, 384 p. (In Russian)

14. Kruchek V.A. & Kosimov Kh.R. Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya ramy teplovoza UzTE16M [Stress-strain analysis of the diesel

locomotive frame UzTE16M]. *Sbornik nauchnykh trudov Respublikanskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Resursosberegayushchiye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte”* [Collected papers of the Republican Research and Technical Conference “Resource-saving technologies for railway transport”]. Tashkent, TashIIT [Tashkent Railway Engineering Institute] Publ., 2013, pp. 69–77. (In Russian)

15. Kruchek V.A. & Kosimov Kh.R. Otsenka ostatochnogo resursa ram lokomotivov i prodleniye ikh sluzhby [Remaining life time assessment of locomotive underframe and their service extension]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2013, iss. 1, pp. 115–122. (In Russian)

Received: November 21, 2019

Accepted: December 2, 2019

Author’s information:

Victor A. KRUCHEK – D. Sci. in Engineering, Professor; victor.kruchek@yandex.ru

Otabek R. KHAMIDOV – PhD in Engineering, Associate Professor, Doctoral Candidate; otobek.rustamovich@yandex.ru

УДК 621.33

Использование инфракрасного излучения при упрочнении изоляционных конструкций электрооборудования тягового подвижного состава

И. О. Лобыцин

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

Для цитирования: Лобыцин И. О. Использование инфракрасного излучения при упрочнении изоляционных конструкций электрооборудования тягового подвижного состава // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 108–116. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-108-116

Аннотация

Цель: Повышение надежности изоляционных конструкций электрооборудования тягового подвижного состава при деповском и заводском ремонтах. Совершенствование ремонта изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей путем применения технологии инфракрасного нагрева. **Методы:** Исследования осуществлялись в соответствии с методами теории планирования эксперимента и заключались в сравнении технологий восстановления изоляции по показателям электрической прочности. **Результаты:** В ходе изучения процесса упрочнения различных изоляционных материалов пропиточными смесями с использованием инфракрасного излучения была выявлена оптимальная система «спектральный состав излучения–жидкий полимер–изоляционная лента» для восстановления изоляционных конструкций тягового подвижного состава. Кроме того, был определен наиболее эффективный источник инфракрасного излучения для упрочнения электроизоляционного лакового покрытия изоляционных пальцев тяговых электродвигателей. **Практическая значимость:** Проведенные эксперименты позволят усовершенствовать процесс восстановления изоляции обмоток тяговых электрических машин и аппаратов с помощью технологии инфракрасного нагрева, которая сокращает время на выполнение технологического процесса не менее чем в 5 раз и уменьшает затраты электроэнергии, по сравнению с традиционной технологией конвективной сушки, позволяя достичь относительно высокого качества изоляционного слоя. Созданный переносной лабораторный комплекс дает возможность изучить рациональные режимы упрочнения изоляции электрооборудования тягового подвижного состава при применении современных пропиточных электроизоляционных составов. Результаты лабораторных исследований процесса упрочнения изоляционных пальцев инфракрасным излучением играют значимую роль при проектировании и изготовлении производственной установки для ремонта изоляционных пальцев в заводских и деповских условиях.

Ключевые слова: Упрочнение изоляции, инфракрасный нагрев, электрическая прочность, изоляционный палец, спектральный состав излучения, тяговый подвижной состав, электрооборудование.

Введение

Традиционная технология изготовления или восстановления изоляционных конструкций электрооборудования локомотивов базируется на использовании конвективных методов нагре-

ва, позволяющих превратить жидкие пропиточные материалы в твердые электроизоляционные покрытия под воздействием температур в интервале 100–130 °С. В последнее время были проведены исследования процессов ускоренного отверждения с применением нетрадиционных

методов нагрева, в основе которых лежит применение токов высокой частоты, а также радиационное отверждение потоками ускоренных электронов и инфракрасным излучением.

Высокочастотный нагрев способствует внутреннему разогреву полимерной изоляции, при этом скорость увеличения температуры определяется подведенной удельной мощностью и не зависит от теплопроводности и геометрических размеров объекта. Этот фактор значительно ускоряет переход полимера из жидкого состояния в твердое, однако ведет к явному снижению межслоевой прочности отвержденной изоляции [1].

При радиационном нагреве ускоренными электронами процесс отверждения электроизоляционных материалов сокращается в десятки раз, а степень твердости значительно не отличается от получаемой при отверждении традиционной технологией. Следует подчеркнуть, что данный метод используется с помощью дорогостоящего оборудования, поэтому в каждом конкретном случае необходим анализ целесообразности его применения [2].

Технически универсальным и легко реализуемым является метод инфракрасного энергоподвода. Создание высоких удельных мощностей излучения на наружных слоях позволяет ускорить процесс отверждения с относительно высоким коэффициентом полезного действия и при меньших вложениях на приобретение источников излучения с рефлекторами. Данный метод наиболее эффективен для восстановления изоляционных конструкций электрооборудования тягового подвижного состава и уже зарекомендовал себя при упрочнении лобовых частей обмоток якорей тяговых электродвигателей [3, 4].

Исследование системы «спектральный состав излучения– жидкий полимер–изоляционная лента» в процессе упрочнения

В данной статье термин «упрочнение» используется в процессе, при котором жидкие полимеры (лаки и компаунды) превращаются

в твердые под действием теплового излучения в технологиях изготовления и восстановления изоляционных конструкций электрооборудования для различных отраслей промышленности, сельского хозяйства и транспорта. Кроме того, в этот термин заложены основные характеристики и свойства электроизоляционных материалов: электрическая и механическая прочность, нагревостойкость, хладостойкость, влаго- и водостойкость, гибкость и эластичность, химическая стойкость, шероховатость, трекинговая стойкость и др.

Экспериментальное исследование системы «спектральный состав излучения–жидкий полимер–изоляционная лента» заключается в применении концентрированного локального инфракрасного энергоподвода для отверждения оболочечной изоляционной конструкции.

Объектами исследований выступали:

- пропиточные материалы типа ФЛ-98, ПК-11, ВЗТ-1, имеющие в своем составе разное содержание летучих веществ;
- электроизоляционные слюдинитовые ленты ЛСЭП-934 ТПл и ЛСП-Н-ТПл, с различными прочностными и теплофизическими характеристиками;
- инфракрасные длинно-, средне- и коротковолновые источники излучения.

Для упрочнения образцов использовался переносной лабораторный комплекс сушки изоляции инфракрасным излучением (рис. 1). Данный комплекс был специально сконструирован для выявления рациональных режимов упрочнения изоляции электрооборудования тягового подвижного состава.

Эффективность упрочнения полимерной изоляции инфракрасным излучением определяется по показаниям электрической прочности путем воздействия пробивного напряжения на слюдинитовую ленту с отведенным электроизоляционным материалом [5]. На рис. 2 представлены основные результаты экспериментальных исследований по определению электрической прочности отвержденной инфракрасным излучением полимерной изоляции.

Наиболее высокие показатели по электрической прочности были получены при отвержде-

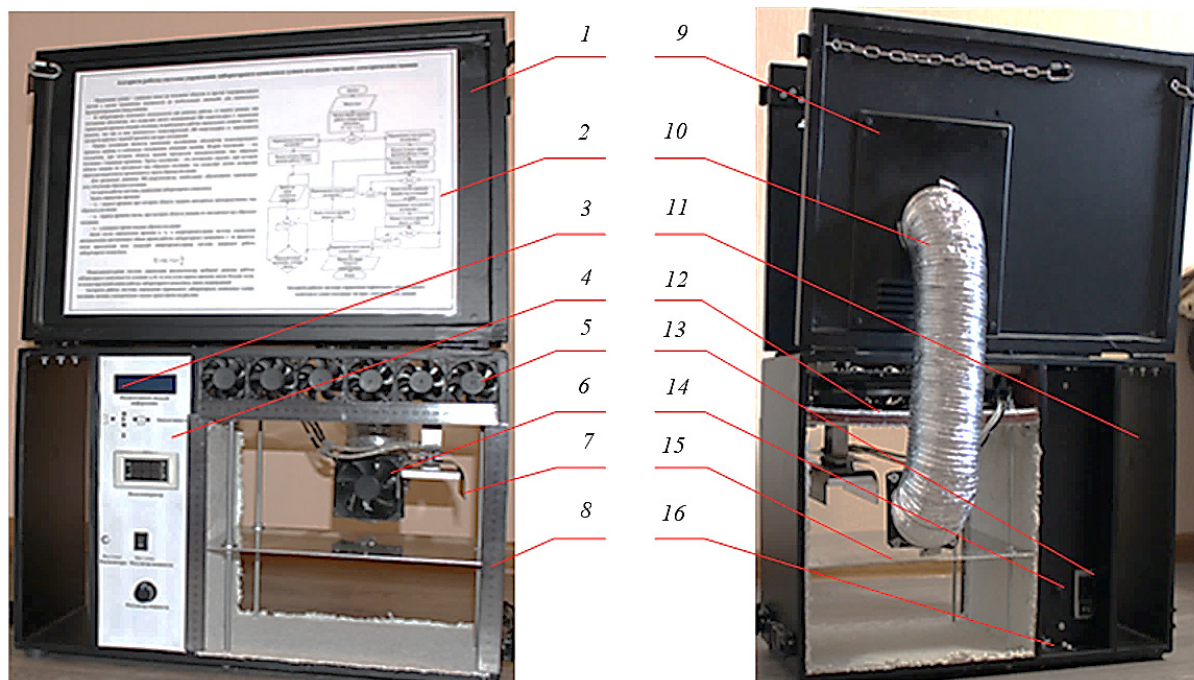


Рис. 1. Переносной лабораторный комплекс сушки изоляции:
 1 – самоклеящаяся пленка; 2 – алгоритм работы с лабораторным комплексом;
 3 – индикаторный дисплей информации; 4 – передняя панель управления комплексом; 5 – система охлаждения; 6 – вентилятор системы вытяжки; 7 – ИК-излучатель; 8 – регулировочные линейки; 9 – торцевая площадка; 10 – гофрированная труба; 11 – отсек для размещения дополнительного оборудования; 12 – асбестовый картон общего назначения; 13 – разъем для подключения к сети, выключатель разъема; 14 – предохранитель; 15 – регулируемая по высоте полка; 16 – разъем miniUSB

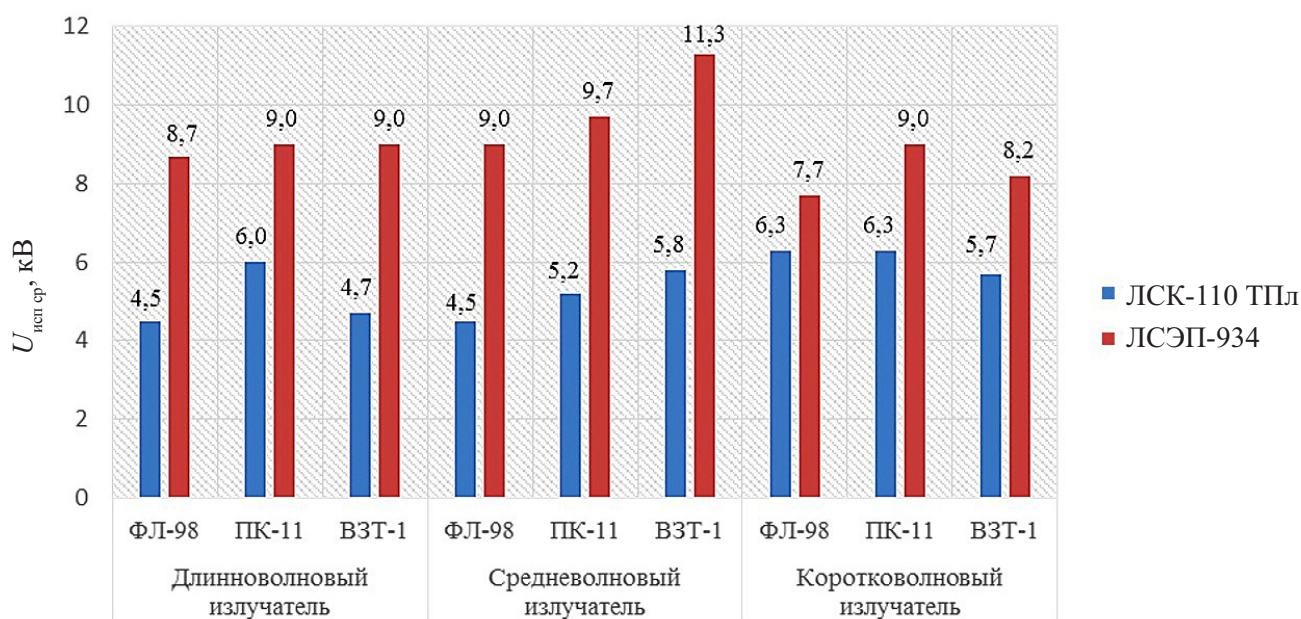


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований по определению электрической прочности отвержденной инфракрасным излучением полимерной изоляции

нии средневолновым инфракрасным излучением, генерируемым керамическими излучателями типа ECS-2 мощностью 500 Вт, на образце из слюдинитовой ленты типа ЛСЭП-934, толщиной 0,11 мм, пропитанной в компаунде ВЗТ-1. В целом отмечены высокие показатели электрической прочности на всех образцах с этой же слюдинитовой лентой независимо от спектрального состава излучения и пропиточного материала по сравнению со слюдинитовой лентой типа ЛСК-110 ТПл такой же толщины. Отличия показателей сопротивления электрическому пробою при изменении марки слюдинитовой ленты позволяют судить об особенностях механизма взаимодействия системы «спектральный состав излучения–жидкий полимер–изоляционная лента» в процессах упрочнения.

В заявленных характеристиках слюдинитовых лент ЛСЭП-934 и ЛСК-110 ТПл очень большая часть элементов изоляционных лент совпадает, расхождение в подложках. У слюдинитовой ленты ЛСЭП-934 подложка изготовлена из полиэтилентерефталатной пленки и стеклоткани, пропитанной эпоксидно-полиэфирным связующим. В свою очередь, у слюдинитовой ленты ЛСК-110 ТПл подложка изготовлена из полиэтиленнафталатной пленки Теонекс производства фирмы «DuPont Teijin Films» и стеклоткани, пропитанной компаундом. По данной причине результаты по электрической прочности значительно отличаются, так как механизм взаимодействия теплового излучения при облучении материалов с различными веществами существенно влияет на физико-химические свойства отвержденного полимера [6–8].

Применение инфракрасного излучения при упрочнении изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей

Применительно к практической реализации метода инфракрасного нагрева для упрочнения изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей тяговых двигателей электровозов ранее был проведен анализ влияния спектрального со-

става инфракрасного излучения, характеристик пропиточных материалов и изоляционных лент на качество полимеризации.

В традиционной технологии восстановления изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей используются пропиточные материалы для изготовления и восстановления обмоток электрических машин. Стоит отметить то, что конструктивно пальцы (рис. 3) представляют собой стальные шпильки, изготовленные из стали марки 45 и опрессованные прессматериалом типа АГ-4 В, покрытым электроизоляционным лаком типа ФЛ-98. Фактор использования различных изоляционных слоев позволяет исследовать систему «спектральный состав излучения–жидкий полимер–прессматериал» при упрочнении изоляционных пальцев [9–11].

Прессматериал АГ-4 В, представленный на рис. 3, обладает высокой механической прочностью, теплостойкостью и хорошими электроизоляционными свойствами. В его состав входят фенолоформальдегидная смола, как связующее вещество, и стеклянные нити, являющиеся наполнителем.

Лак типа ФЛ-98 включает в свой состав смесь двух смол: резольнобутанольной (60%-ный раствор в бутаноле) и алкидной (50%-ный раствор в смеси двух растворителей (1:1) ксилола и уайт-спирита). Стоит отметить, что смешивание смол выполняют в соотношении 26:74. Готовый электроизоляционный материал перед использованием зачастую разбавляют ксилолом до рабочей вязкости [12].

Элементы, входящие в состав электроизоляционных лент типа ЛСЭП-934 ТПл, имеют наибольшее сходство с составляющими прессматериала АГ-4В. При отверждении лент данного типа и пропиточного лака ФЛ-98, также применяющегося в технологии деповского ремонта изоляционных пальцев, наилучшие результаты были получены при нагреве средневолновыми источниками инфракрасного излучения (см. рис. 2). В связи с этим было решено использовать средневолновые керамические инфракрасные излучатели типа ECS-2 для упрочнения изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей (рис. 4).

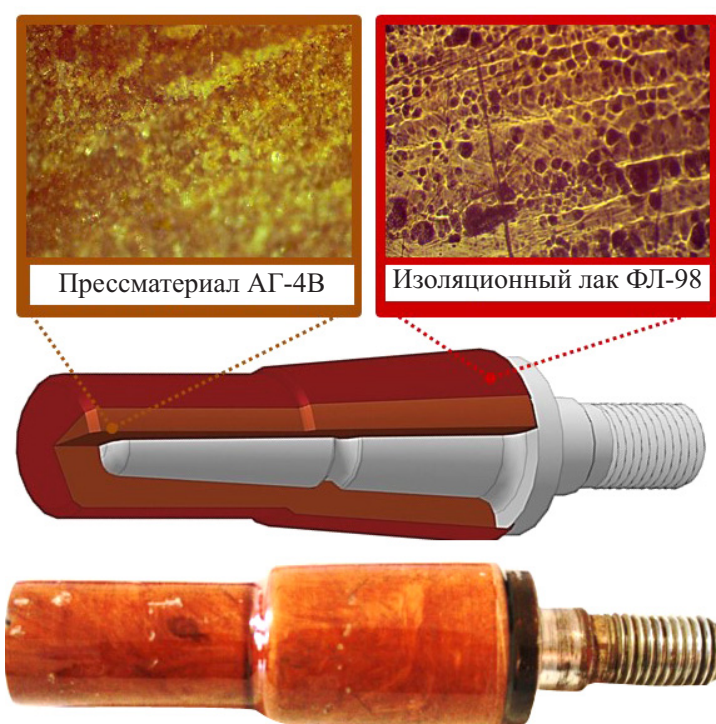


Рис. 3. Изоляционные пальцы кронштейнов щеткодержателей тяговых электродвигателей постоянного тока типов НБ-418 К6, НБ-514, НБ-520

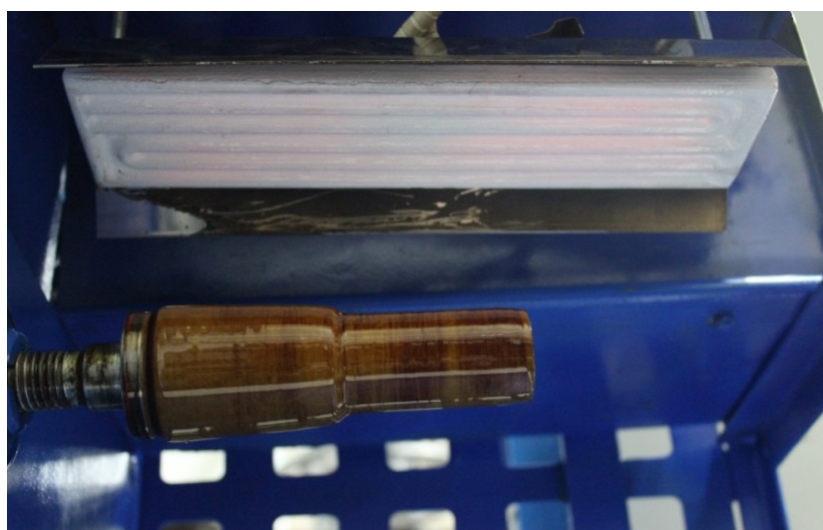


Рис. 4. Упрочнение изоляционных пальцев инфракрасным излучением

Надежность изоляционных пальцев зависит от их электрической прочности, поэтому проверка качества изоляции осуществлялась путем воздействия постоянно нарастающего напряжения до пробивного значения. Для опреде-

ления электрической прочности изоляционных пальцев применялись испытательные установки WPT-4.4/100 и GPT-6/120, которые позволяют получить переменное напряжение до 100 кВ и до 120 кВ выпрямленного напряжения со ско-

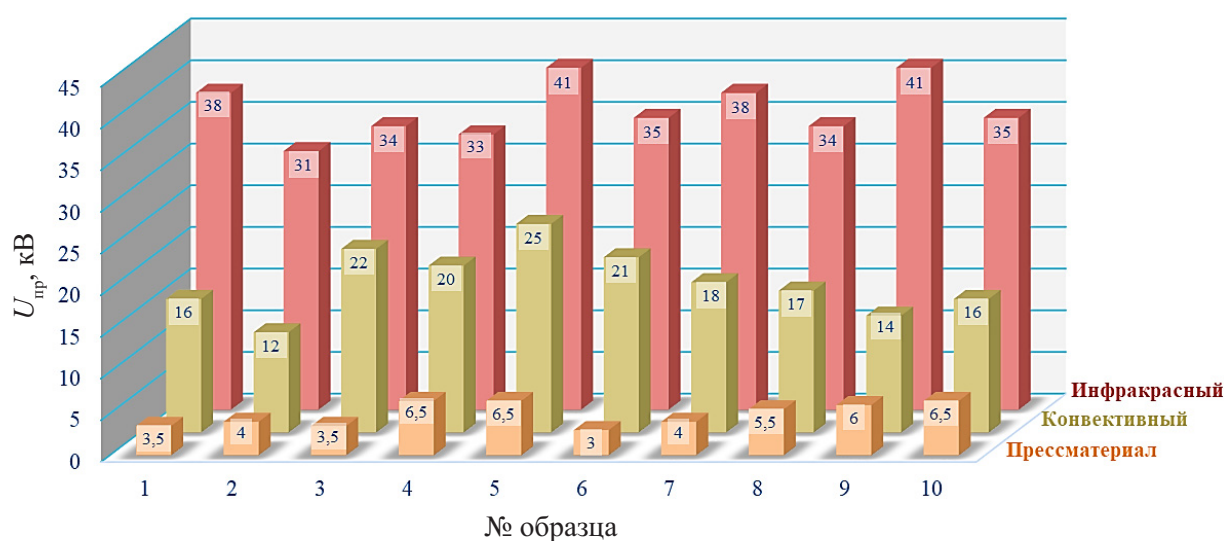


Рис. 5. Результаты экспериментальных исследований по определению электрической прочности изоляционных пальцев

ростью подъема 2 % в секунду с возможностью автоматического отключения при возникновении пробоя [13].

Воздействию пробивного напряжения подверглись три партии изоляционных пальцев по 10 образцов каждая. Первая партия была восстановлена по традиционной (конвективной) технологии, вторая – с помощью инфракрасного излучения, третья была очищена от лака ФЛ-98 и состояла из прессматериала, не прошедшего процесс восстановления. Результаты экспериментальных исследований по определению электрической прочности отражены на рис. 5.

Проведенные исследования электрической прочности изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей после упрочнения их изоляционного слоя технологией инфракрасного нагрева дают возможность судить о том, что: 1) применение средневолновых керамических источников инфракрасного излучения позволяет достичь высокоэффективного результата упрочнения изоляционной поверхности на основе пропиточного лака ФЛ-98 и прессматериала АГ-4 В в сравнении с конвективным методом; 2) изоляционные пальцы тяговых электродвигателей, не покрытые пропиточным изоляционным лаком, имеют высокую вероятность

возникновения пробоя из-за относительно большого содержания стеклянных нитей в составе, которые способствуют снижению диэлектрических свойств прессматериала.

Заключение

Основным преимуществом инфракрасного нагрева является возможность концентрации большой мощности в рабочих объемах или на поверхности нагреваемого материала, обеспечивающей получение высоких температур. Но самое главное преимущество состоит в том, что большая концентрация мощности позволяет получать начальные температуры за сравнительно короткий промежуток времени, исчисляемый минутами или секундами, что приводит в необходимых случаях к ускоренному нагреву материала [14, 15]. Высокая концентрация мощности обеспечивает интенсификацию технологических процессов и, следовательно, большую производительность установок и экономию энергии. Принцип концентрации мощности распространяется как на когерентные источники инфракрасного излучения, так и на некогерентные.

Библиографический список

1. Барэмбо К. Н. Сушка, пропитка и компаундирование обмоток электрических машин / К. Н. Барэмбо, Л. М. Бернштейн. – М. : Гос. энергетич. изд-во, 1961. – 368 с.
2. Худоногов А. М. Анализ эффективности существующих способов сушки изоляции обмоток тяговых электрических машин / А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : Материалы четвертой Всерос. науч.-практич. конференции с международным участием. 13–17 мая 2013 г. – Иркутск : ИрГУПС, 2013. – С. 422–425.
3. Лыткина Е. М. Локальный метод капсулирования лобовых частей обмоток тяговых электрических машин / Е. М. Лыткина, А. С. Ковшин, Е. Ю. Дульский // Проблемы, решения, инновации транспорта Российской Федерации : сб. науч. трудов науч.-практич. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых ЭМФ ИрГУПС. – Иркутск : ИрГУПС, 2010. – С. 19–25.
4. Худоногов А. М. Критерии оптимальности при капсулировании изоляции лобовых частей обмоток электрических машин тягового подвижного состава / А. М. Худоногов, С. Г. Еремеев, Е. М. Лыткина // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 2. – С. 236–239.
5. Дульский Е. Ю. Анализ пространственного распределения инфракрасного излучения в процессе капсулирования изоляции электрических машин тягового подвижного состава / Е. Ю. Дульский // Вестн. ИрГТУ / под ред. И. М. Головных и др. – Иркутск : ИрГТУ, 2013. – № 7. – С. 132–136.
6. Ваксер Н. М. Изоляция электрических машин : учеб. пособие / Н. М. Ваксер. – Л. : Изд-во ЛПИ, 1985. – 83 с.
7. Дульский Е. Ю. Моделирование режимов ИК-энергоподвода в технологии продления ресурса тяговых электрических машин с использованием метода конечных элементов / Е. Ю. Дульский // Вестн. ИрГТУ / под ред. И. М. Головных и др. – Иркутск : ИрГТУ, 2013. – № 12. – С. 258–263.
8. Лобыцин И. О. Повышение надежности изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей электрических машин тягового подвижного состава / И. О. Лобыцин, Е. Ю. Дульский, А. А. Васильев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 4. – С. 218–224.
9. Лобыцин И. О. Терморadiационное восстановление малогабаритных изоляционных элементов тяговых электродвигателей локомотивов / И. О. Лобыцин, А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта : Материалы третьей Междунар. науч.-практич. конференции с международным участием. – Омск : Изд-во Омск. гос. ун-та путей сообщения, 2018. – С. 236–243.
10. Худоногов А. М. Анализ конструктивных особенностей элементов электромагнитной системы тяговых электродвигателей локомотивов / А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский, В. Н. Иванов, И. О. Лобыцин // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : Материалы девятой Междунар. науч.-практич. конференции. 10–13 апреля 2018 г. – Иркутск : ИрГУПС, 2018. – С. 351–355.
11. Бочаров В. П. Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины / В. П. Бочаров, Г. В. Василенко, А. П. Курочка и др. ; под ред. В. И. Бочарова, В. П. Янова. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 464 с.
12. Немухин В. П. Повышение нагревостойкости и влагостойкости изоляции тяговых электрических машин / В. П. Немухин // Повышение надежности электрооборудования тепловозов ; под ред. В. П. Немухина. – М. : Транспорт, 1974. – С. 20–42.
13. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. – М. : Госэнергоиздат, 1956. – 464 с.
14. Лебедев П. Д. Сушка инфракрасными лучами / П. Д. Лебедев. – М. : Госэнергоиздат, 1955. – 232 с.
15. Дульский Е. Ю. Совершенствование технологии ремонта магнитной системы тяговых двигателей электровозов / Е. Ю. Дульский // Вестн. ИрГТУ / под ред. И. М. Головных и др. – Иркутск : ИрГТУ, 2012. – № 4. – С. 103–108.

Дата поступления: 02.09.2019

Решение о публикации: 16.01.2020

Контактная информация:

ЛОБЫЦИН Игорь Олегович – аспирант;
lobycin@mail.ru

Utilization of infrared radiation in strengthening insulation constructions of electrical equipment of traction rolling stock

I. O. Lobytsin

Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskogo ul., Irkutsk, 664074, Russian Federation

For citation: Lobytsin I. O. Utilization of infrared radiation in strengthening insulation constructions of electrical equipment of traction rolling stock. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 1, pp. 108–116. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-108-116

Summary

Objective: Increasing reliability of insulation constructions of electrical equipment of traction rolling stock during depot and factory repairs. Perfecting repair of insulation studs of brush gear carrier by applying the infrared heating technology. **Methods:** The study was carried out in accordance with experiment planning methods and consisted of comparison of technologies for restoring insulation by electrical strength indices. **Results:** In the course of study of the process of strengthening various insulating materials by impregnation compounds with the use of infrared radiation, the system of “spectral composition of radiation–liquid polymer–insulation tape”, optimal for restoration of insulation constructions of traction rolling stock, was identified. In addition, the most efficient source of infrared radiation for strengthening electrical-insulation lacquer coating of insulation studs of traction electrical engines was identified. **Practical importance:** The experiments will allow perfecting the process of restoring insulation of winding of traction electrical engines and machines by utilization of the infrared radiation technology, which reduces time required for implementation of technological processes at least five-fold, and cuts electrical power costs, compared to traditional convection drying technology, allowing achieving relatively high quality of insulation layer. The newly developed portable laboratory system would allow studying rational regimes of strengthening the insulation of electrical equipment of traction rolling stock in utilization of modern impregnating electrical-insulation formulae. Results of laboratory studies of the process of strengthening insulation studs by infrared radiation have a significant role in designing and production of a production unit for repairs of insulation studs in factory and depot conditions.

Keywords: Strengthening insulation, infrared radiation, electrical strength, insulation stud, spectral composition of radiation, traction rolling stock, electrical equipment.

References

1. Barenbo K. N. & Bernshtein L. M. *Sushka, propitka i kompaundirovanie obmotok elektricheskikh mashin* [Drying, impregnation and compounding of electrical engines' winding]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1961, 368 p. (In Russian)

2. Khudonogov A. M. & Dul'skii E. Iu. Analiz effektivnosti sushchestvuiushchikh sposobov sushki izoliatsii obmotok tiagovykh elektricheskikh mashin [Analysis of efficiency of existing methods of drying insulation of traction electrical engines' winding]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. Papers of the 4th All-Russian

scientific and practical conference with Intl. participation, Irkutsk, May 13–17, 2013. Irkutsk, IrGUPS [Irkutsk State Transport University] Publ., 2013, pp. 422–425. (In Russian)

3. Lytkina E. M., Kovshin A. S. & Dul'skii E. Iu. Lokal'nyi metod kapsulirovaniia lobovykh chastei obmotok tiagovykh elektricheskikh mashin [Local method for capsulation of coil ends in winding of traction electrical engines]. *Problemy, resheniia, innovatsii transporta Rossiiskoi Federatsii* [Problems, solutions, innovations in transport of the Russian Federation]. Coll. papers of scientific and practical conference of students, PhD students and young researchers of the electromechanical department of the Irkutsk State Transport University. Ir-

kutsk, IrGUPS [Irkutsk State Transport University] Publ., 2010, pp. 19–25. (In Russian)

4. Khudonogov A. M., Ereemeev S. G. & Lytkina E. M. Kriterii optimal'nosti pri kapsulirovanii izoliatsii lobovykh chastei obmotok elektricheskikh mashin tiagovogo podvizhnogo sostava [Optimum criteria in capsulation of insulation of coil ends of winding of traction rolling stock's electrical engines]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific problems of transport in Siberia and the Far East], 2009, no. 2, pp. 236–239. (In Russian)

5. Dul'skii E. Iu. Analiz prostranstvennogo raspredeleniia infrakrasnogo izlucheniia v protsesse kapsulirovaniia izoliatsii elektricheskikh mashin tiagovogo podvizhnogo sostava [Analysis of spatial distribution of infrared radiation in the process of capsulation of insulation of traction rolling stock's electrical engines]. *Vestnik of IrGTU* [Irkutsk State Transport University Herald]. Irkutsk, IrGUPS [Irkutsk State Transport University] Publ., 2013, no. 7, pp. 132–136. (In Russian)

6. Vakser N. M. *Izoliatsiia elektricheskikh mashin* [Insulation of electrical engines]. Study guide. Leningrad, LPI [Leningrad Polytechnic Institute] Publ., 1985, 83 p. (In Russian)

7. Dul'skii E. Iu. Modelirovanie rezhimov IK-energopodvoda v tekhnologii prodleniia resursa tiagovykh elektricheskikh mashin s ispol'zovaniem metoda konechnykh elementov [Modelling of infrared energy supply regimes in the technology for life extension of traction electrical engines utilizing the finite elements method]. *Vestnik of IrGTU* [Irkutsk State Transport University Herald]. Irkutsk, IrGUPS [Irkutsk State Transport University] Publ., 2013, no. 12, pp. 258–263. (In Russian)

8. Lobytsin I. O., Dul'skii E. Iu. & Vasil'ev A. A. Povyshenie nadezhnosti izoliatsionnykh pal'tsev kronshteynov shchetkoderzhatelei elektricheskikh mashin tiagovogo podvizhnogo sostava [Increasing reliability of insulation studs of brush gear carriers of traction rolling stock's electrical engines]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modelling], 2017, no. 4, pp. 218–224. (In Russian)

9. Lobytsin I. O., Khudonogov A. M. & Dul'skii E. Iu. Termoradiatsionnoe vosstanovlenie malogabaritnykh izoliatsionnykh elementov tiagovykh elektrodvigatelei lokomotivov [Thermoradiation restoration of small-scale insulation elements of traction electrical engines of locomotives]. *Razrabotka i ekspluatatsiia elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem energetiki i nazemnogo transporta*

[Development and operation of electrotechnical complexes and power systems of surface transport]. Proc. of the 3rd Intl. scientific and practical conference with international participation. Omsk, OmGUPS [Omsk State Transport University] Publ., 2018, pp. 236–243. (In Russian)

10. Khudonogov A. M., Dul'skii E. Iu., Ivanov V. N. & Lobytsin I. O. Analiz konstruktivnykh osobennostei elementov elektromagnitnoi sistemy tiagovykh elektrodvigatelei lokomotivov [Analysis of design features of electromagnetic system elements of locomotives' traction electrical engines]. *Transportnaia infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. Papers of the 9th Intl. scientific and practical conference, Apr. 10–13, 2018. Irkutsk, IrGUPS [Irkutsk State Transport University] Publ., 2018, pp. 351–355. (In Russian)

11. Bocharov V. P., Vasilenko G. V., Kurochka A. P. et al. *Magistral'nye elektrovozy. Tiagovye elektricheskie mashiny* [Main line electric locomotives. Traction electrical engines]. Eds by V. I. Bocharov, V. P. Ivanov. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992, 464 p. (In Russian)

12. Nemukhin V. P. Povyshenie nagrevostoikosti i vlagostoikosti izoliatsii tiagovykh elektricheskikh mashin [Increasing thermal and humidity resistance of traction electrical engines' insulation]. *Povyshenie nadezhnosti elektrooborudovaniia teplovozzov* [Increasing reliability of diesel locomotives' electrical equipment]. Ed. by V. P. Nemukhin. Moscow, Transport Publ., 1974, pp. 20–42. (In Russian)

13. Lykov A. V. *Teplo i massoobmen v protsessakh sushki* [Heat and mass transfer in drying processes]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1956, 464 p. (In Russian)

14. Lebedev P. D. *Sushka infrakrasnymi luchami* [Drying by infrared radiation]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1955, 232 p. (In Russian)

15. Dul'skii E. Iu. Sovershenstvovanie tekhnologii remonta magnitnoi sistemy tiagovykh dvigatelei elektrovozzov [Perfecting technology for repair of magnetic system of electrical locomotives' traction engines]. *Vestnik of IrGTU* [Irkutsk State Transport University Herald]. Irkutsk, IrGUPS [Irkutsk State Transport University] Publ., 2012, no. 4, pp. 103–108. (In Russian)

Received: September 02, 2019

Accepted: January 16, 2020

Author's information:

Igor' O. LOBYTSIN – Postgraduate Student;
lobycin@mail.ru

УДК 629.463.62

Съемное оборудование для перевозки лесоматериалов: новые технические решения и применение высокопрочных сталей

Н. А. Таничева¹, И. В. Федоров¹, И. О. Филиппова²

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

² Акционерное общество «Научно-внедренческий центр «Вагоны», Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 2

Для цитирования: Таничева Н. А., Федоров И. В., Филиппова И. О. Съемное оборудование для перевозки лесоматериалов: новые технические решения и применение высокопрочных сталей // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 117–128. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-117-128

Аннотация

Цель: Предложить новые технические решения, в том числе с применением высокопрочных сталей, для создания съемных многооборотных средств для перевозки лесоматериалов на универсальных вагонах-платформах. **Методы:** Применяется анализ грузоперевозок лесоматериалов на железной дороге во внутреннем сообщении и на экспорт за 2014–2018 гг. Проводятся сравнение существующих конструкций вагонов-платформ и устройств для перевозки лесоматериалов, анализ их преимуществ и недостатков, обзор используемых в машино- и вагоностроении, в частности, высокопрочных сталей. **Результаты:** Выявлена сезонность в грузоперевозках лесоматериалов по железным дорогам России, диктующая необходимость разработки конструкций съемных многооборотных средств для перевозки данных грузов на универсальных вагонах-платформах. Выявлено отсутствие таких конструкций, обеспечивающих сохранение универсальности вагонов-платформ, на которые они устанавливаются. Предложены направления развития конструкций съемного оборудования для перевозки лесоматериалов, позволяющих надежно крепить их на вагоне, а также обладающих достаточной прочностью при меньшей массе. **Практическая значимость:** Показана необходимость разработки новых конструкций съемных многооборотных средств для перевозки лесоматериалов на универсальных вагонах-платформах, в том числе с применением высокопрочных сталей, которые дают возможность улучшить технико-экономические характеристики вагонов-платформ. Следует проработать нормативно-техническую базу для внедрения новых высокопрочных сталей в производство съемного многооборотного оборудования, использующегося в вагоностроении.

Ключевые слова: Подвижной состав, съемное многооборотное оборудование, перевозка лесоматериалов, крепление оборудования, высокопрочная сталь.

Введение

Согласно данным Открытого акционерного общества «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД») [1], перевозки лесоматериалов по же-

лезнодорожным путям за 2018 г. составили 3,5% от грузооборота по основным видам грузов. При этом за последние пять лет – с 2014 по 2018 г. – наблюдается постоянный прирост объема перевозок лесоматериалов на 2–7%.

С января по май 2019 г. [2] погрузка лесных грузов уменьшилась на $-4,6\%$: во внутреннем сообщении выросла на $+3,6\%$, а на экспорт снизилась на -11% . Прирост погрузки во внутреннем сообщении связан с ростом производства пиломатериалов лиственных и хвойных пород, а понижение грузооборота на экспорт объясняется в том числе действием повышенных ставок вывозных таможенных пошлин на отдельные товарные позиции лесных грузов.

Перевозки лесоматериалов носят сезонный характер. Как правило, их пик приходится на март-апрель, а наибольшие спады – на конец года. Изменение объемов перевозок лесоматериалов составляет порядка 400–700 тыс. т.

Аналитики сообщают [3], что в месяцы пикового спроса профицит парка вагонов для перевозки лесоматериалов сокращается до 900 ед. Это вызвано увеличением указанной ранее погрузки, главным образом за счет экспорта лесоматериалов в Китай. Одновременно растут перевозки лесоматериалов на внутреннем рынке (рис. 1). По разным оценкам, спрос на замену списанных вагонов до 2021 г. может составить до 5 тыс. ед., а суммарный спрос с учетом выбытия – до 12 тыс. ед.

Для перевозки круглых лесоматериалов целесообразно применять специализированные вагоны-платформы или универсальные с установленным оборудованием. Специализированные вагоны-платформы имеют больший погрузочный объем, однако их строительство приводит к значительной стоимости. В то же время парк универсальных вагонов-платформ достаточно велик, что создает предпосылки для разработки съемного многооборотного оборудования для перевозки лесоматериалов, повышающего эффективность использования универсальных вагонов.

Однако, как показывает практика, называемое съемным оборудование для перевозки лесоматериалов на деле таким не оказывается, поскольку для его установки и крепления необходимо приваривать к раме вагона-платформы дополнительные элементы, предотвращающие продольное смещение лесных рам и торцевых стен. Установка со сварными соединениями яв-

ляется модернизацией и влечет за собой изменения, согласно документам, модели вагона и его специализации.

Далее рассмотрим новые технические решения для съемного оборудования, обеспечивающие эффективную перевозку и сохранность груза без изменения специализации вагона.

Новые технические решения оборудования для перевозки лесоматериалов

С целью увеличения номенклатуры перевозимых грузов основной задачей при конструировании вагонов-лесовозов является создание съемного оборудования. К современным относятся съемные кузова, достаточно широко применяемые за рубежом и разрабатываемые на территории Российской Федерации [4].

В ПАО «Научно-производственная корпорация “Объединенная Вагонная Компания”» в рамках комплексного проекта сочлененного вагона-платформы со съемными кузовами разработаны и кузов для перевозки лесоматериалов [5]. Представители компании утверждают, что такое решение позволит повысить производительность парка, сбалансировать профицит и дефицит парка при сезонных колебаниях перевозок, улучшить пропускную способность железных дорог без дополнительной модернизации инфраструктуры [6].

Однако съемные кузова, в силу особенностей конструкции, снижают грузоподъемность вагона и увеличивают металлоемкость.

Зарубежные производители съемных кузовов, как видно из рис. 2 и 3, благодаря особенностям эксплуатации, также тяготеют к конструкции отдельных лесных рам, а не к полноценным кузовам, как предлагают российские производители.

В этой связи целесообразной будет разработка крепления съемного оборудования для перевозки лесоматериалов к скобам стоечным лесным универсальным вагонам-платформ без применения сварки. Например, можно исполь-

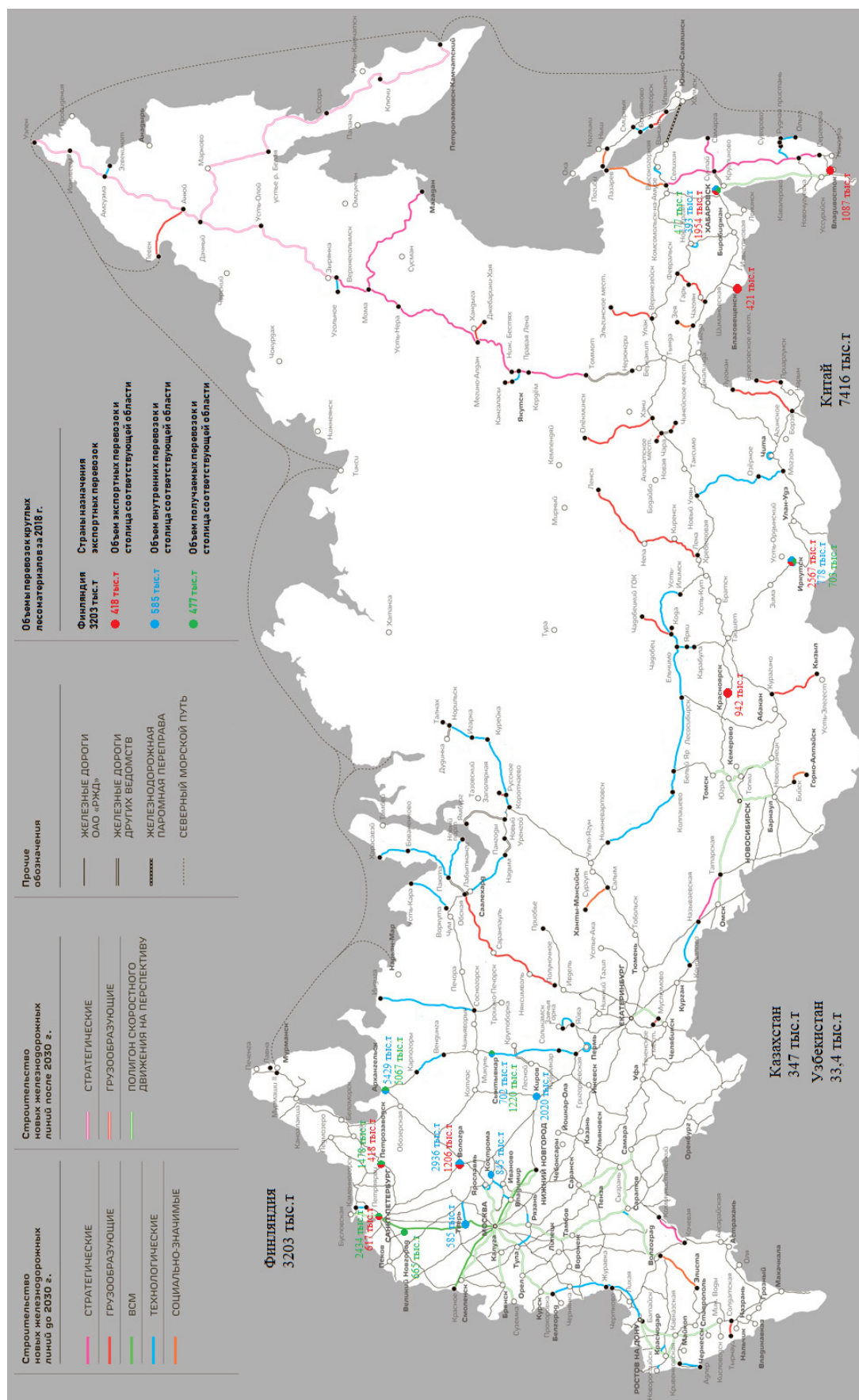


Рис. 1. Карта железных дорог России с перспективной развития сети до 2030 г. и объемы перевозок круглых лесоматериалов за 2018 г.



Рис. 2. Съемный кузов для перевозки лесоматериалов, WASCOSA, Швейцария



Рис. 3. Платформа со съемными кузовами для перевозки лесоматериалов, Innofreight, Германия

зывать торцевые стоечные скобы для расположения съемного торцевого упора (рис. 4, *а*) [7].

При транспортировке (рис. 4, *б*) продольная нагрузка, действующая на торцевую стену, передается на балку. Стойки соприкасаются с внутренней поверхностью стоечных скоб, затем

нагрузка через стойки передается на упорки и далее на концевую балку вагона-платформы.

В верхней части балки торцевого упора выполняются пазы для возможности регулировки расстояния между стойками в зависимости от фактического расстояния между стоечными ско-

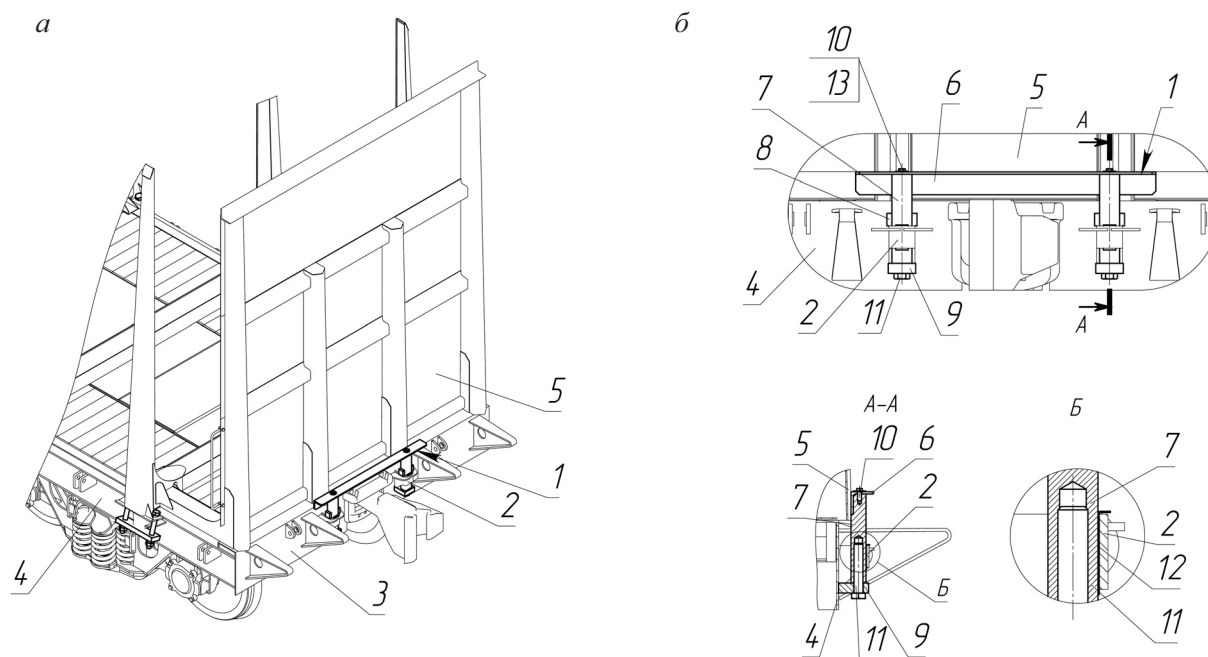


Рис. 4. Торцевой упор для крепления от продольных перемещений торцевой стены съемного оборудования:

а – общий вид крепления на вагоне-платформе; *б* – конструкция торцевого упора.

1 – съемный торцевой упор; 2 – стоечная скоба; 3 – концевая балка; 4 – вагон-платформа;

5 – съемная торцевая стена; 6 – балка; 7 – стойка (штырь); 8 – ограничитель; 9 – упорка;

10, 11 – резьбовые соединения; 12 – регулировочная пластина; 13 – прокладка

бами. Для компенсации местных зазоров применяются съемные регулировочные пластины.

Доработки требует и крепление лесных рам. С целью ограничения продольных перемещений можно использовать аналогичную штыревую систему, различные резьбовые соединения и другие варианты разъемных соединений.

Еще одной проблемой при перевозке лесоматериалов является обеспечение полного использования грузоподъемности. Плотность различных пород древесины колеблется от 380 до 720 кг/м³ при влажности 15 % и от 730 до 1160 кг/м³ при влажности 100 % [8]. Учитывается также диаметр круглых лесоматериалов [9], который может значительно повлиять на массу перевозимого груза. Из табл. 1 видно, что при перевозке круглых лесоматериалов малой плотности и большого диаметра грузоподъемность вагона будет недоиспользоваться.

Для повышения погрузочного объема применяются стойки, разработанные в очертаниях

зонального габарита, а также надставки, позволяющие осуществлять погрузку с «шапкой» в стандартном габарите. Однако использование зонального габарита ограничивает номенклатуру перевозимых грузов только лесо- и пиломатериалами, а погрузочные работы для формирования «шапки» опасны и даже запрещены в ряде стран [10].

К предлагаемым способам увеличения погрузочного объема относятся лесные стойки с изменяющимся габаритом, которые в порожнем состоянии вписываются в верхнее очертание габарита 1-Т, а в груженом позволяют использовать зональный габарит погрузки [11, 12] разработки АО «НВЦ «Вагоны»». Вагон-платформа, оборудованный такими стойками (рис. 5, *а*), сможет перевозить как лесоматериалы, так и контейнеры.

Изменение габарита осуществляется фиксированием телескопических стоек в нижнем положении (рис. 5, *б*) для перевозки лесомате-

ТАБЛИЦА 1. Масса перевозимых круглых лесоматериалов в зависимости от плотности древесины, влажности, диаметра бревен

Диаметр бревна, мм	Коэффициент использования объема	Пихта сибирская				Лиственница			
		при влажности 15 %		при влажности 100 %		при влажности 15 %		при влажности 100 %	
		Плотность, т/м ³	Масса при объеме 100 м ³ , т	Плотность, т/м ³	Масса при объеме 100 м ³ , т	Плотность, т/м ³	Масса при объеме 100 м ³ , т	Плотность, т/м ³	Масса при объеме 100 м ³ , т
60	0,86	0,38	32,68	0,63	54,18	0,67	57,62	1,1	94,6
200	0,84		31,92		52,92		56,28		92,4

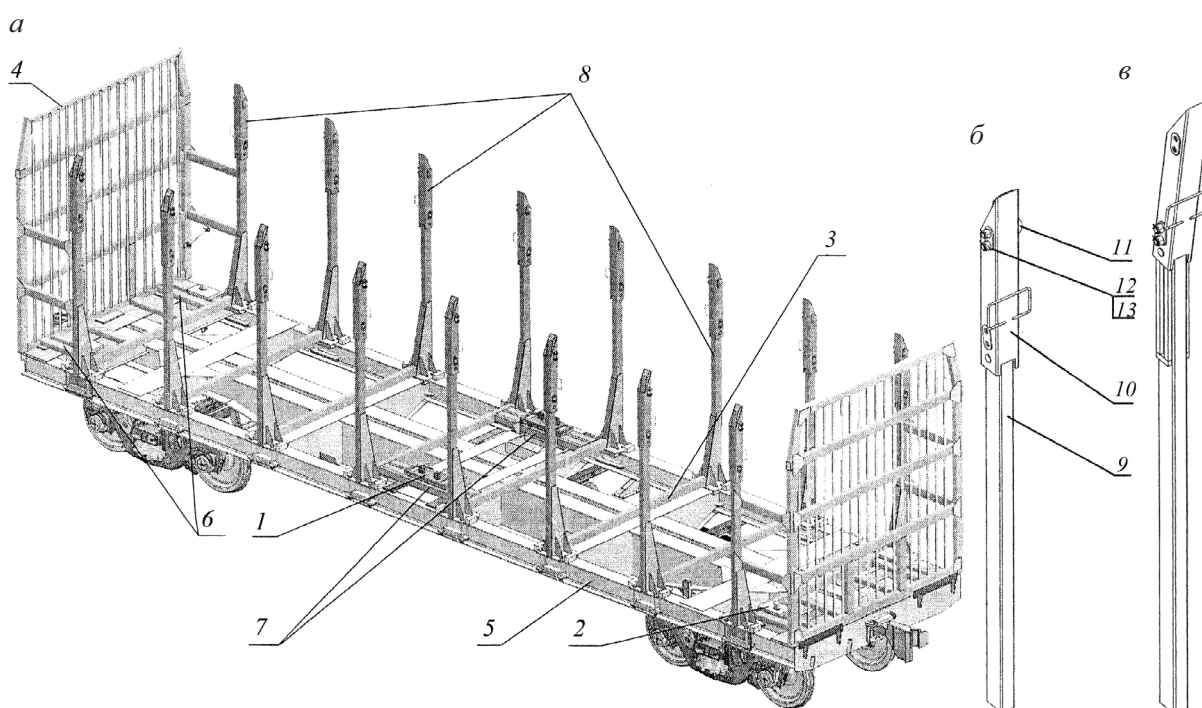


Рис. 5. Вагон-платформа, оборудованный лесными стойками с изменяющимся габаритом:
а – общий вид вагона-платформы с лесными стойками; *б* – стойка в нижнем положении;
в – стойка в верхнем положении.

1 – откидной фитинговый упор; 2 – стационарный фитинговый упор; 3 – лесная рама;
 4 – торцевая стена; 5 – рама вагона; 6, 7 – соединительная двойная продольная балка;
 8 – телескопическая стойка; 9 – основание; 10 – подвижная часть; 11 – замковая вилка;
 12 – корончатая гайка; 13 – шплинт

риалов в габарите 1-Т и перевозки контейнеров или в верхнем положении (рис. 5, *в*) для перевозки лесоматериалов в зональном габарите погрузки.

Использование верхней суженной части габарита погрузки повышает трудоемкость погрузо-

разгрузочных работ. Для решения этой проблемы возможно исполнение стойки с гибкими надставками, которые при выгрузке отгибаются. Надставки можно или приварить к верху стойки (рис. 6), или выполнить по принципу рессоры (рис. 7) [13]. Такие надставки были реализованы

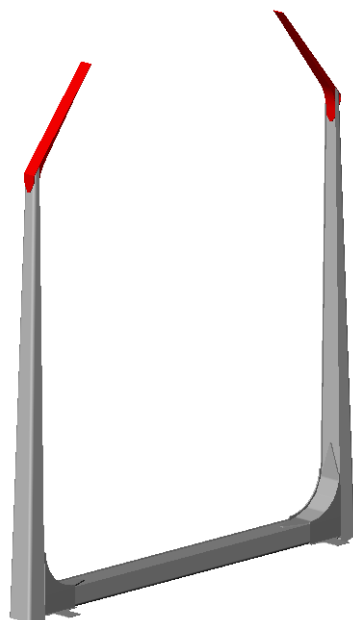


Рис. 6. Лесная рама с надставками (показаны красным цветом) для использования верхней части габарита



Рис. 7. Надставка рессорного типа

в проекте съемного оборудования для перевозки лесоматериалов 401М6-02.00.00.000 разработки АО «НВЦ “Вагоны”».

Применение высокопрочных сталей

Дальнейшим шагом в развитии как конструкций оборудования для перевозки лесоматериалов, так и всего вагоностроения является использование высокопрочных сталей [14, 15] с целью уменьшения массы, повышения надежности и долговечности конструкции.

АО «НВЦ “Вагоны”» имеет опыт применения высокопрочной стали RAEX [13, 16, 17] для подвижного состава, эксплуатирующегося в направлении Россия–Финляндия. Изготовление съемного оборудования таких вагонов из листового проката высокопрочной стали поз-

волило значительно снизить металлоемкость конструкции по сравнению с традиционным оборудованием, выполненным из стали 09Г2С по ГОСТ 19281–2014 [18]. При этом обеспечивались необходимые прочность и надежность конструкции.

Несомненное преимущество стоек, изготовленных из высокопрочных материалов, – возможность значительного перемещения верха стойки, что предотвращает изломы и трещины в их основании.

Есть и другие примеры использования в особо нагруженных элементах конструкций вагонов сталей с классом прочности до 700 МПа [19].

В настоящее время производитель стали RAEX прекратил ее поставки, но, как показал проведенный обзор (табл. 2), на ведущих российских и зарубежных металлургических компаниях освоено производство сталей

ТАБЛИЦА 2. Перспективные марки сталей с повышенной прочностью и высокопрочных сталей, применяемых в вагоно- и машиностроении

Марка стали, страна-производитель	Предел текучести, МПа	Класс прочности, МПа	Нормативный документ	Толщина листового проката, мм	Область применения
Strenx700MC, Швеция	700	750–950	DIN EN 10149-2-2013	2–10	Узлы и детали ответственных высоконагруженных металлоконструкций
S700MC, Россия	700	750–950	DIN EN 10149-2-2013	4–10	Обшивка боковых стен и торцевых стен вагона, рама полувагона
Optim 960QC, Финляндия	960	1000	DIN EN 10149-2-2013	2,5–8,0	Шасси и кузова автотранспорта, стрелы кранов и другое грузоподъемное оборудование
Weldex 1300, Финляндия	1300	1400–1700	DIN EN 10029-2011	4–10	Ковши роторного экскаватора, подъемные краны, прицепы, вилочные погрузчики

с повышенной прочностью и высокопрочных сталей, предназначенных и для вагоностроения.

В результате анализа характеристик высокопрочных сталей и опыта их использования в вагоно- и машиностроении были обнаружены некоторые ограничения:

- высокопрочные стали с классом прочности выше 700 МПа поставляются только в виде листового проката;
- высокопрочные стали имеют ограничения при сварочных работах (предварительный подогрев и последующая термообработка, тип сварочных материалов, обеспечение максимально близкой к прочности свариваемого материала прочности сварочных материалов и т. п.) [14, 15];
- сварные соединения из высокопрочных сталей требуют проведения мероприятий по повышению усталостной прочности [20];
- уменьшение профиля сечения элемента вагона, изготовленного из высокопрочной стали, влечет за собой большие перемещения.

Для компенсации перемещений стоек лесных рам, изготовленных из высокопрочной стали, предлагается применять стойки переменного сечения с предварительным наклоном внутрь вагона [16].

Несмотря на перечисленные ограничения, позитивный опыт применения высокопрочных сталей при изготовлении съемного оборудования для перевозки лесоматериалов свидетельствует о возможности дальнейшего внедрения таких сталей в конструкциях подвижного состава и его элементов.

Заключение

В результате проведенных исследований можно выделить следующие решения:

- для перевозки лесоматериалов требуется разработка съемного многооборотного обо-

дования, обеспечивающего конкурентоспособные технико-экономические характеристики и не изменяющего специализацию вагона;

– для предотвращения продольных перемещений щита торцевого предлагается конструкция съемного упора;

– необходима разработка альтернативных способов крепления лесных рам от продольных перемещений;

– с целью компенсации перемещений стоек лесных рам от действия распорных нагрузок предлагается выполнять их с предварительным наклоном внутрь кузова;

– рекомендуется внедрять в производство подвижного состава нового поколения, в том числе при изготовлении съемного оборудования для перевозки лесоматериалов, высокопрочные стали.

Библиографический список

1. Российские железные дороги. Деятельность. Итоги 2018 г. – URL : http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5234 (дата обращения : 13.10.2019 г.).
2. Ежемесячный дайджест грузовых железнодорожных перевозок. № 5. – URL : http://www.rzd.ru/dbmm/download?vp=1&load=y&col_id=121&id=89189 (дата обращения : 13.10.2019 г.).
3. Лесовозные платформы : спрос превышает списание. Лейсана Коробейникова, главный аналитик НПК ОБК, о росте потребности в лесоматериалах и конкурентных преимуществах новых вагонов. – URL : <http://время.онлайн/view/experts/lesovoznye-platformy/> (дата обращения : 13.10.2019 г.).
4. Бороненко Ю. П. Разработка вагонов со съемными кузовами увеличенной грузоподъемности / Ю. П. Бороненко, А. С. Даукша // Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты : материалы XII Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2017. – С. 48–52.
5. Патент № 189867. Российская Федерация, МПК В61D 3/00, В62D 33/033, В61D 17/00, В65D 88/00. Съемный кузов / Р. А. Савушкин, А. М. Соколов, К. В. Якк, А. М. Орлова, А. Ю. Новоселов, А. С. Кононенко, А. С. Попылькин, Д. В. Шевченко, С. А. Брусенцов. – Заявл. 20.03.2019 г.; опубл. 07.06.2019 г. – Бюл. № 16.
6. Платформы со съемными кузовами способны сбалансировать спрос. – URL : <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/opinions/platformy-so-semnymi-kuzovami-sposobny-sbalansirovat-spros> (дата обращения : 13.10.2019 г.).
7. Заявка на полезную модель № 2019126713 от 23.08.2019 г. Съемный торцевой упор съемного многооборотного оборудования вагона-платформы / Д. Г. Бейн, Е. А. Исполова, Л. В. Цыганская, Н. А. Таничева. – URL : <https://www1.fips.ru/registers-web/action?acName=clickRegister®Name=RUPMAP> (дата обращения : 27.02.2020 г.).
8. ПОТ РО-13153-ЦМ-933-03. Отраслевые правила по охране труда в хозяйстве грузовой и коммерческой работы на федеральном железнодорожном транспорте. – Утв. МПС РФ 20.01.2003 г. – М. : ЦЕНТРАГ, 2019. – 64 с.
9. Общие и специальные правила перевозки грузов. Правила безопасности морской перевозки генеральных грузов 4-М : в 2 т. – СПб. : ЦНИИМФ, 1997. – Т. 2, кн. 2. – 208 с.
10. Федоров И. В. Совершенствование вагонов для перевозки лесоматериалов / И. В. Федоров // Бюл. результатов науч. исследований. – 2018. – Вып. 2. – С. 105–126.
11. Комлев С. А. Вагон-платформа для перевозки лесоматериалов с изменяющимся габаритом / С. А. Комлев, Л. В. Цыганская // Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты : тез. докл. VIII Междунар. науч.-технич. конференции. 3–7 июля 2013 г. – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 170–171.
12. Патент № 142053. Российская Федерация, МПК В61D 3/08. Железнодорожная платформа с изменяющимся габаритом для перевозки лесоматериалов и контейнеров / Ю. П. Бороненко, Л. В. Цыганская, Н. В. Смирнов, Д. Г. Бейн, К. В. Бондаренко, А. И. Бондаренко. – Заявл. 13.03.2014 г.; опубл. 20.06.2014 г. – Бюл. № 17.
13. Патент № 54570. Российская Федерация, МПК В61D 3/08. Платформа со съемным оборудованием для перевозки лесоматериалов, пиломатериалов, контейнеров, труб и металлопроката / Ю. П. Бороненко, В. Виноградов, В. Г. Григорьев, В. А. Гвоздев, И. А. Давыдова, Е. Л. Лопарев, В. Н. Леонтьев, А. В. Пешков,

И. В. Федоров, С. В. Хохлов. – Заявл. 07.02.2006 г.; опубл. 10.07.2006 г. – Бюл. № 19.

14. Бороненко Ю. П. Использование высокопрочных сталей в вагоностроении / Ю. П. Бороненко, И. О. Филиппова // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – № 3 (58). – С. 16–19.

15. Бороненко Ю. П. Выбор конструктивных решений элементов вагонов с малой массой тары / Ю. П. Бороненко, И. О. Филиппова // Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетровськ. нац. ун-ту залізничного транспорту. – 2017. – № 3 (69). – С. 121–129.

16. Патент № 50187. Российская Федерация, МПК В61D 3/08, В60P 3/40. Железнодорожная платформа для перевозки лесоматериалов / Ю. П. Бороненко, И. В. Федоров, Е. М. Попов, Е. Л. Лопарев, А. В. Пешков, О. В. Жаров. – Заявл. 19.04.2005 г.; опубл. 27.12.2005 г. – Бюл. № 36.

17. Патент № 50485. Российская Федерация, МПК В60P 3/40, В61D 3/08. Платформа для перевозки лесоматериалов / Ю. П. Бороненко, И. В. Федоров, Е. М. Попов, Е. Л. Лопарев, А. В. Пешков, О. В. Жаров. – Заявл. 19.04.2005 г.; опубл. 20.01.2006 г. – Бюл. № 2.

18. ГОСТ 19281–2014. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2015. – 47 с.

19. Лобанов Л. М. Расчет на усталость сварных соединений несущих элементов тележки грузового вагона / Л. М. Лобанов, О. В. Махненко, Г. Ю. Сапрыкина, А. Д. Пустовой // Автоматическая сварка. – 2014. – № 10. – С. 32–36.

20. Hobbacher A. Recommendations for fatigue design of welded joints and components / A. Hobbacher. – Cham : Springer International Publishing AG, 2016. – 143 p.

Дата поступления: 13.01.2020

Решение о публикации: 04.02.2020

Контактная информация:

ТАНИЧЕВА Наталия Андреевна – канд. техн. наук, доцент; nataly_tanicheva@mail.ru

ФЕДОРОВ Игорь Владимирович – ст. преподаватель; fedorov281973@yandex.ru

ФИЛИПОВА Ирина Олеговна – мл. науч. сотрудник; filippova.io@yandex.ru

Removable equipment designed to transport timber: new engineering solutions and application of high-yield-stress steel

N. A. Tanicheva¹, I. V. Fedorov¹, I. O. Filippova²

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

² JSC “Research and innovation center “Cars”, 2, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Tanicheva N. A., Fedorov I. V., Filippova I. O. Removable equipment designed to transport timber: new engineering solutions and application of high-yield-stress steel. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 1, pp. 117–128. (In Russian)
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-117-128

Summary

Objective: To propose new engineering solutions, including the use of high-yield-stress steel, for the design of demountable returnable facilities to transport timber on all-purpose flat cars. **Methods:** The analysis of railway timber inner traffic as well as for export from 2014 to 2018 was applied. The comparison of current flat cars and facilities for timber traffic as well as the analysis of their strengths and weaknesses was carried out. A survey on high-yield-stress steel application in machine and car building

was conducted. **Results:** Due to seasonal prevalence of timber traffic in Russia it is essential to develop the design of demountable returnable facilities to transport the goods in question on all-purpose flat cars. The absence of the facilities in question which provide for versatility of flat cars was determined. Directions for the development of demountable equipment designed to transport timber were proposed allowing for safe fastening on a flat car as well as being durable and low-weight. **Practical importance:** The necessity to develop new demountable returnable facilities designed to transport timber on all-purpose flat cars was demonstrated. The former included the use of high-yield-stress steel making it possible to improve technical and economic features of flat cars. It is essential to elaborate regulatory and technical base for the implementation of new high-yield-stress steel in the production of demountable returnable equipment applied in car building.

Keywords: Rolling stock, demountable returnable equipment, transportation of timber, equipment securing, high-yield-stress steel.

References

1. Rossiyskiye zhelezniye dorogi. Deyatelnost. Itogy [Russian Railways. Operations. Results. 2018]. Available at: http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5234 (accessed: 13.10.2019). (In Russian)
2. Ezhemesyachniy daidzhest gruzovykh zhelezno-dorozhnykh perevozok no. 5 [Monthly digest of railway freight operation. N 5]. Available at: http://www.rzd.ru/dbmm/download?vp=1&load=y&col_id=121&id=89189 (accessed: 13.10.2019). (In Russian)
3. Lesovozniye platformy: spros prevyshaet spisanie. Leisan Korobeinikova, glavniy analitik NPK OVK, o roste potrebnosti v lesomaterialakh i konkurentnykh preimushchestvakh novykh vagonov [Timber-carrying platforms: demand outruns writing off. Leisan Korobeinikova, chief analyst of Research and Production Corporation United Wagon Company, speaks on the growth in lumber demand and competitive strengths of the new cars]. Available at: <http://времяок.online/view/experts/lesovoznye-platformy/> (accessed: 13.10.2019). (In Russian)
4. Boronenko Yu. P. & Dauksha A. S. Razrabotka vagonov so syemnymi kuzovami uvelichennoy gruzopodъемnosti [Design of cars with demountable bodies of increased capacity]. Podvizhnyy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty [The rolling stock of the 21st century: ideas, requirements, projects]. Materialy XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Proceedings of the 12th International Research and Training Conference]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, pp. 48–52. (In Russian)
5. Savushkin R. A., Sokolov A. M., Kyakk K. V., Orlova A. M., Novoselov A. Yu., Kononenko A. S., Popylkin A. S., Shevchenko D. V. & Brusentsov S. A. Patent no. 189867. Rossiyskaya Federatsiya, MPK B61D 3/00, B62D 33/033, B61D 17/00, B65D 88/00. Syemniy kuzov [Patent N 189867. Russian Federation. IPC B61D 3/00, B62D 33/033, B61D 17/00, B65D 88/00. Demountable body]. Application March 20th, 2019; published June 7th, 2019. Bull. N 16. (In Russian)
6. Platformy so syemnymi kuzovami sposobny sbalansirovat spros [Platforms with demountable bodies can balance the demand]. Available at: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/opinions/platformy-so-semnymi-kuzovami-sposobny-sbalansirovat-spros/> (accessed: 13.10.2019). (In Russian)
7. Bein D. G., Ispolova E. A., Tsyganskaya L. V. & Tani-cheva N. A. Zayavka na poleznyuyu model no. 2019126713 ot 23.08.2019 g. Syemniy tortsevoy upor syemnogo mnogooborotnogo oborudovaniya vagona-platformy [Useful model application N 2019126713 dated August 23rd, 2019. Detachable end support for the demountable returnable flat-car equipment]. Available at: <https://www1.fips.ru/register-web/action?acName=clickRegister®Name=RUPMAP> (accessed: 27.02.2020). (In Russian)
8. POT RO-13153-TsM-933-03. Otrastleviye pravila po okhrane truda v khozyaistve gruzovoy i kommercheskoy raboty na federalnom zheleznodorozhnom transporte [POT RO-13153-TsM-933-03. Sectoral occupational health and safety rules for freight operation and commercial work facilities of federal railroad transport]. Approved by MPS RF [The Russian Federation Ministry of Railways] dated January 1st, 2003. Moscow, TSENTRMAG Publ., 2019, 64 p. (In Russian)
9. Obshchiye i spetsialniye pravila perevozky gruzov. Pravila bezopasnosti morskoy perevozky generalnykh

gruzov 4-M [General and special rules on goods traffic. Safety specifications for maritime traffic of general cargo 4-M]. In 2 vol. Saint Petersburg, TsNIIMF [Central Scientific Research Institute of Marine Fleet] Publ., 1997, vol. 2, book 2, 208 p. (In Russian)

10. Fedorov I. V. Sovershenstvovaniye vagonov dlya perevozky lesomaterialov [The improvement of cars for timber transportation]. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of research results], 2018, iss. 2, pp. 105–126. (In Russian)

11. Komlev S.A. & Tsyganskaya L. V. Vagon-platforma dlya perevozky lesomaterialov s izmenyayushchimsya gabaritom [Flat car designed to transport timber with changeable clearance]. *Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty* [The rolling stock of the 21st century: ideas, requirements, projects]. Abstracts of the 8th International Research and Training Conference. July 3–7th, 2013. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2013, pp. 170–171. (In Russian)

12. Boronenko Yu. P., Tsyganskaya L. V., Smirnov N. V., Bein D. G., Bondarenko K. V. & Bondarenko A. I. Patent no. 142053. Rossiyskaya Federatsiya, MPK B61D 3/08. Zheleznodorozhnaya platforma s izmenyayushchimsya gabaritom dlya perevozky lesomaterialov i konteynerov [Patent N 142053. Russian Federation, IPC B61D 3/08. Flat car with changeable clearance designed to transport timber and containers]. Application March 13th, 2014; published June 20th, 2014. Bull. N 17. (In Russian)

13. Boronenko Yu. P., Vinogradov V., Grigoriev V. G., Gvozdev V. A., Davydova I. A., Loparev E. L., Leontiev V. N., Peshkov A. V., Fedorov I. V. & Khokhlov S. V. Patent no. 54570. Rossiyskaya Federatsiya, MPK B61D 3/08. Platforma so syemnym oborudovaniyem dlya perevozky lesomaterialov, pilomaterialov, konteynerov, trub i metalloprokata [Patent N 54570. Russian Federation, IPC B61D 3/08. Platform with demountable equipment designed to transport timber, lumber, containers, pipes and metal-roll]. Application February 7th, 2006; published July 10th, 2006. Bull. N 19. (In Russian)

14. Boronenko Yu. P. & Filippova I. O. Ispolzovaniye vysokoprochnykh staley v vagonostroyenii [Application of high-yield-stress steel in car building]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2015, no. 3, pp. 16–19. (In Russian)

15. Boronenko Yu. P. & Filippova I. O. Vyborkonstruktivnykh resheniy elementov vagonov s maloy massoy tary [The selection of design solutions for low-weight tare cars]. *Nauka ta prozres transportu. Visn. Dnipropetrovsk. naц. un-tu zalizничного transportu*, 2017, no. 3 (69), pp. 121–129. (In Russian)

16. Boronenko Yu. P., Fedorov I. V., Popov E. M., Loparev E. L., Peshkov A. V. & Zhatrov O. V. Patent no. 50187. Rossiyskaya Federatsiya, MPK B61D 3/08, B60P 3/40. Zheleznodorozhnaya platforma dlya perevozky lesomaterialov [Patent N 50187. Russian Federation, IPC B61D 3/08, B60P 3/40. Flat car designed to transport timber]. Application April 19th, 2005; published December 27th, 2005. Bull. N 36. (In Russian)

17. Boronenko Yu. P., Fedorov I. V., Popov E. M., Loparev E. L., Peshkov A. V. & Zhatrov O. V. Patent no. 50485. Rossiyskaya Federatsiya, MPK B60P 3/40, B61D 3/08. Platforma dlya perevozky lesomaterialov [Patent N 50485. Russian Federation, IPC B60P 3/40, B61D 3/08. Platform designed to transport timber]. Application April 19th, 2005; published January 20th, 2006. Bull. N 2. (In Russian)

18. GOST 19281–2014. Prokat povyshennoy prochnosti. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya [GOST 19281–2014. Increased strength rolling. General technical specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 47 p. (In Russian)

19. Lobanov L. M., Makhnenko O. V., Saprykina G. Yu. & Pustovoy A. D. Raschet na ustalost svarnykh soeydineniy nesushchikh elementov telezhky gruzovogo vagona [Fatigue strength calculation of the welded joints of the freight-car truck supporting members]. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding], 2014, no. 10, pp. 32–36. (In Russian)

20. Hobbacher A. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. Cham, Springer International Publishing AG, 2016, 143 p.

Received: January 13, 2020

Accepted: February 04, 2020

Author's information:

Nataly A. TANICHEVA – PhD in Engineering, Associate Professor; nataly_tanicheva@mail.ru
Igor V. FEDOROV – Senior Lecturer; fedorov281973@yandex.ru
Irina O. FILIPPOVA – Junior Researcher; filippova.io@yandex.ru



УДК 621.316+658.345:652

Использование интеллектуальных цифровых технологий при эксплуатации электроподвижного состава с позиции электробезопасности

К. К. Ким¹, Е. Л. Рыжова²

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

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Великолукский филиал, Российская Федерация, 182100, Великие Луки, Гагарина пр., 95

Для цитирования: Ким К. К., Рыжова Е. Л. Использование интеллектуальных цифровых технологий при эксплуатации электроподвижного состава с позиции электробезопасности // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 129–135. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-129-135

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос о необходимости использования интеллектуальных цифровых технологий при эксплуатации электроподвижного состава (ЭПС) с позиции электробезопасности. Выявить основные закономерности и наметить важнейшие мероприятия по предупреждению поражения током персонала ЭПС, анализируя статистику несчастных случаев при эксплуатации ЭПС, а также степень опасности поражения током в зависимости от местонахождения электрооборудования на ЭПС. Обосновать проведение дополнительных мероприятий для реализации учебного процесса по обучению персонала ЭПС безопасным методам работы, применяя современные технологии обучения и тестирования усвоенных обучающимися знаний по электробезопасности, обеспечивающих достоверную оценку и эффективное управление профессиональными рисками на рабочих местах. Показать необходимость обновления информационных автоматизированных систем, действующих в настоящее время, для повышения электробезопасности. **Методы:** Проводятся сравнение топографии электротравматизма на ЭПС, а также анализ общих закономерностей и статистики электротравм, связанных с эксплуатацией магистрального ЭПС. **Результаты:** Установлена необходимость использования интеллектуальных цифровых технологий, с помощью которых в комплексе с исходной и статистической информацией можно добиться снижения уровня электропоражений и выходов из строя электрооборудования на ЭПС. **Практическая значимость:** Показана необходимость дальнейшего развития инноваций в области профилактики электробезопасности на ЭПС, которые позволят улучшить систему подготовки персонала в области охраны труда, благодаря тренинговым и компьютерным методам. Предложенные интеллектуальные цифровые технологии при эксплуатации ЭПС в области электробезопасности могут быть рекомендованы к практическому использованию.

Ключевые слова: Информационные технологии, интеллектуальные цифровые технологии, электроподвижной состав, электробезопасность, электротравматизм.

Введение

Продолжающаяся техническая реконструкция железнодорожного транспорта, в основе

которой лежит концепция использования инновационных техники и технологий, связана с исключением ряда опасных для персонала электроподвижного состава (ЭПС) технологических

операций. Отмеченное приводит к необходимости кардинально изменить характер трудовых функций многих работников, но вместе с тем следует отметить, что полностью исключить пребывание и работу персонала в опасной зоне в современных условиях невозможно. Проблема обеспечения электробезопасности во время эксплуатации и ремонта ЭПС обусловлена необходимостью своевременного выявления и предупреждения возникновения опасных ситуаций при эксплуатации разнотипного оборудования на ЭПС. Технические и организационные системы, используемые в области электробезопасности, основаны на упрощенных подходах, средствах и методах, не соответствуют современному уровню сложности и междисциплинарному характеру условий труда на ЭПС [1–4].

Внедрение новых интеллектуальных цифровых технологий (ИЦТ), механизация и автоматизация производственных процессов предъявляют повышенные требования к системе электробезопасности при эксплуатации ЭПС и обуславливают необходимость модернизации и совершенствования действующих технических и организационных мероприятий, применения более эффективных защитных средств [5]. Поэтому требуется продолжить исследования в данной области для решения практических задач по использованию ИЦТ при оценке влияния факторов системы «человек–ЭПС–проводимая операция–окружающая среда» на электробезопасность при эксплуатации ЭПС, что является актуальной научно-технической задачей.

Объект и методика

Из практики эксплуатации ЭПС известно, что к разработке эффективных предупреждающих электротравматизм мероприятий следует привлекать результаты объективного анализа причин и условий получения электротравм персоналом. Действующие в настоящее время формы учета заболеваний и несчастных случаев не способны обеспечить необходимых полноты и достоверности информации, скорости ее передачи к устройствам обработки и хранения ее в

информационных базах компьютерной техники, адаптации для непосредственного взаимодействия со средствами автоматизации.

Отметим, что при переходе на электрическую тягу были улучшены условия труда сотрудников железнодорожной отрасли, особенно работающих на ЭПС. Рабочие места на электровагонах стали чистыми и комфортными, а рабочие функции персонала в основном сконцентрированы на контроле работы оборудования. Одновременно с этим появилась вероятность поражения персонала электрическим током. Так, электротравмы составляют 12–14 % от общего количества несчастных случаев. Причем на долю магистрального ЭПС приходится значительная доля электротравм. Недостатки в обучении персонала безопасным приемам труда (до 26 %) – одна из основных причин электротравматизма на ЭПС от поражения электрическим током (рисунк).

Для выявления общих закономерностей и определения приоритетных путей предупреждения электротравматизма были проведены статистические исследования несчастных случаев при эксплуатации ЭПС. С этой целью выполнен анализ топографии электротравматизма на ЭПС за последние 15 лет в депо и в пути следования [6–8]. Было выявлено, что:

- примерно 50 % несчастных случаев наблюдались в высоковольтной камере,
- около 30 % зафиксированы на крыше электровагона в результате непосредственного контакта работника с контактной сетью или с токоприемником,
- в пути следования вероятность поражения электрическим током почти в 2 раза выше, чем в депо (ремонт, осмотр, экипировка).

Устранение отказа электрооборудования в пути следования связано с дефицитом времени, отводимого на него. Ситуацию усугубляет необходимость резкой смены рода деятельности: активный поиск и устранение неисправности заменяют наблюдение за сигналами операций, связанными с соблюдением графика движения поездов. Все эти факты приводят к повышению вероятности ошибочных действий по обеспечению личной безопасности персонала.



Причины электротравматизма работников на ЭПС

В ходе исследований была установлена зависимость степени опасности поражения электрическим током от месторасположения оборудования в различных зонах электровоза (таблица). Зоны, чаще всего посещаемые машинистами, характеризуются меньшей степенью опасности. В противоположном случае (зона с большей сте-

пенью опасности) наблюдается меньшее число посещений и больший травматизм. Данная качественная оценка опасности с учетом количества случаев электротравмирования и вероятности пребывания персонала в опасной зоне необходима для принятия мер по обеспечению электробезопасности при обслуживании различных

Относительная опасность обслуживания оборудования электровоза

Группа оборудования	Доли электротравм	Доли отказов в пути следования	Относительная опасность обслуживания
Крышное оборудование	0,41	0,14	13,5
Пускорегулирующая аппаратура силовых цепей	0,20	0,28	3,3
Вспомогательные машины	0,16	0,09	8,2
Быстродействующие выключатели	0,12	0,06	9,2
Тяговые двигатели	0,06	0,20	1,4
Электрические цепи управления и контрольно-измерительные приборы	0,05	0,23	1,0

групп электрооборудования. При анализе частоты электротравмирования учитывались электротравмы, полученные при устранении отказов электрооборудования как в зоне его месторасположения, так и в зоне, в которой осуществлялись поиск и устранение неисправности отказавшего оборудования. Так, для устранения неисправности главного выключателя на крыше электровоза в ряде случаев нужно, чтобы персонал пребывал в высоковольтной камере.

В соответствии с результатами статистических исследований можно утверждать, что наименьшее количество травм приходится на обслуживание электрических цепей управления и контрольно-измерительных приборов, расположенных за пределами опасных зон и огражденных с использованием блокирующих устройств (к указанному оборудованию имеется практически свободный доступ независимо от наличия напряжения).

Максимальная опасность при обслуживании крышевого оборудования, связанная с устранением его отказа, более чем в 13 раз превышает опасность устранения отказа в контурах управления и контрольно-измерительных приборах. С помощью блокирующих устройств и других конструктивных инноваций (при которых уменьшается необходимость захода персонала в эту опасную зону) электробезопасность может быть повышена. Принципиально снизить электротравматизм при обслуживании крышевого оборудования позволяют комплексное решение, включающее детальное исследование технологии обслуживания, и анализ ситуаций, связанных с поражением персонала электрическим током, а также меры по повышению электробезопасности при обслуживании оборудования, расположенного на крыше ЭПС. Они сводятся к дальнейшим модернизации и совершенствованию систем технического обучения локомотивных бригад.

Результаты исследования

В соответствии с мероприятиями по обеспечению электробезопасности локомотивных

бригад ЭПС могут быть выделены группы инновационных способов и технологий создания безопасных условий труда, которые должны отвечать главному требованию – спасению жизни людей и нормализации условий труда в зоне их пребывания на производственных объектах.

К инновационным техническим средствам защиты персонала от электротравматизма могут быть отнесены средства с ранее не реализованными функциональными возможностями: эффективные стационарные, переносные и временные заземляющие устройства, многофункциональные аппараты для автоматического отключения питания электроустановок, устройства защитного электрического разделения цепей, установки разделения взаимноопасных технологических циклов и процессов. В области обязательных конструктивных элементов агрегатов и установок – это новые эффективные электро- и иные изоляционные материалы, технологичные съемные и неснимаемые ограждения, оболочки и блокировки, предотвращающие сближение с опасными объектами и их воздействие в нештатных ситуациях.

Вызывает особый интерес применение нанотехнологических средств индивидуальной защиты, которые представляют собой оболочки, удобные в применении, устойчивые от воздействия любых опасных и вредных факторов, предотвращающие электропоражения при прикосновении к токоведущим и токопроводящим частям, термические ожоги, радиоактивное и бактерицидное воздействия, легкие экранирующие комплекты для защиты от влияния электромагнитных и электростатических полей из инновационных прочных и экологически чистых материалов. Все это позволяет сохранить здоровье работающего персонала.

В области организации безопасного производства к таким средствам относятся коммуникационные ИЦТ, которые содержат обучающие методики и технические средства, предусматривающие оперативное принятие безошибочных решений, учитывающие особенности работ с повышенными требованиями безопасности труда и имитирующие процесс непрерывного

взаимодействия работника с производственной средой.

ИЦТ инициируют революцию в системе оперативного учета в цифровой форме полной и достоверной информации о несчастных случаях при эксплуатации ЭПС, в порядке разработки мероприятий по их профилактике и предупреждению, улучшению условий труда, в вопросе повышения качества подготовки и аттестации работников по безопасности производства.

ИЦТ обеспечения безопасности производства состоят из интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ИСППР) и автоматизированных информационных циклов обучения и тестирования знаний (интерактивные шаблоны с использованием формализованных знаний) персонала по электробезопасности на ЭПС путем имитационного моделирования. ИСППР можно позиционировать как эффективную объединенную инфокоммуникационным процессом совокупность технических и программных продуктов, которая способна с учетом данных и знаний синтезировать цели и получать рациональные решения по повышению и профилактике электробезопасности при эксплуатации ЭПС. С практической точки зрения, ИЦТ являются системами, которым свойственна автоматизация процессов оперативного сбора в базе данных, транспортировки, обмена и обработки достоверной информации об уровне электробезопасности, организации производства и условиях труда [9–11].

Заключение

При практической реализации новых технических решений, обуславливающих качественно новую основу эффективных ИЦТ, естественен переход от пассивного восприятия эмпирических данных к активным знаниям, что вносит определенный вклад в решение глобальной проблемы экологической безопасности производственных процессов.

Создание эффективных систем обеспечения электробезопасности на ЭПС с применением автоматизированных тренинго-компьютерных

технологий, наделенных способностью к накоплению, обобщению и использованию знаний по электробезопасности, принятию выбранных решений, объективной оценке компетентности, качественной интеллектуальной подготовке безопасным приемам труда и аттестации персонала, – весьма важная проблема обеспечения безопасности при эксплуатации ЭПС.

Компьютерные тренажеры-имитаторы, содержащие специальные программы, имитирующие выполнение наиболее травмоопасных операций технологического процесса с функциями воспитания принципов безопасного поведения, концентрации внимания, отработки навыков выполнения работ, целесообразно использовать не только непосредственно в процессе обучения, но и как элемент с функцией тестирования психоэмоционального состояния работников перед выполнением работ с высокой вероятностью получения электротравм.

Для построения таких систем имеются необходимые условия: достаточные по объему оперативная и долговременная памяти на компьютерной технике, возможность внедрения программных мощных (по информационно-интеллектуальному потенциалу) устройств и комплексов, эксплуатация которых адаптирована на среднего по подготовке пользователя, а также применение инновационных технических решений.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 58355–2019. Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Электронное обучение безопасности производства. Информационная модель компетенций работника по безопасности производства. – М. : Стандартинформ, 2019. – 16 с.
2. Гордон Г. Ю. Электротравматизм и его предупреждение / Г. Ю. Гордон. – М. : Энергоатомиздат, 2006. – 258 с.
3. Халин Е. В. Электрическая безопасность / Е. В. Халин. – М. : НИИПФ ТЕХИНТЕЛЛ, 2017. – 454 с.
4. Халин Е. В. Системы электронного обучения безопасности производства / Е. В. Халин. – М. : НИИПФ ТЕХИНТЕЛЛ, 2019. – 152 с.

5. Пышный И. М. Информационные технологии и системы диагностирования при эксплуатации и обслуживании электроподвижного состава : конспект лекций / И. М. Пышный. – Екатеринбург : УрГУПС, 2016. – 65 с.

6. Руководство по эксплуатации электровоза ЭП20. Описание и работа. Система управления и диагностики. – Новочеркасск : ООО «ТРТранс», 2012. – 121 с.

7. Воронова Н. И. Локомотивные устройства безопасности : учебник / Н. И. Воронова, Н. Е. Разинкин, Г. Б. Сарафанов. – М. : Academia, 2014. – 208 с.

8. Автоматизированные системы контроля. – URL : <https://ask-glonass.ru> (дата обращения : 10.11.2019 г.).

9. Компьютерра. Легендарный журнал о современных технологиях. – URL : <https://www.computerra.ru> (дата обращения : 10.11.2019 г.).

10. Гвоздева В. А. Основы построения автоматизированных информационных систем : учебник / В. А. Гвоздева, И. Ю. Лаврентьева. – М. : ИД ФОРУМ ; НИЦ ИНФРА-М, 2013. – 320 с.

11. Ким К. К. Сигнализаторы напряжения на воздушных ЛЭП 6–35 кВ / К. К. Ким, А. А. Красных // Безопасность жизнедеятельности. – 2003. – № 6. – С. 24–27.

Дата поступления: 28.01.2020

Решение о публикации: 10.02.2020

Контактная информация:

КИМ Константин Константинович – д-р техн. наук, профессор; kimkk@inbox.ru

РЫЖОВА Елена Львовна – канд. техн. наук, доцент; elena-astanovskaja@rambler.ru

Smart digital technologies in the operation of electric rolling stock from the electrical safety perspective

K. K. Kim¹, E. L. Ryzhova²

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

² Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 95, Gagarina pr., Velikiye Luki, 182100, Russian Federation

For citation: Kim K. K., Ryzhova E. L. Smart digital technologies in the operation of electric rolling stock from the electrical safety perspective. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 1, pp. 129–135. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-129-135

Summary

Objective: To consider the need for the use of smart digital technologies in the operation of electric rolling stock (ERS) from the electrical safety perspective. To identify the main patterns and outline the most important measures to prevent electric shock to ERS personnel by analyzing the statistics of accidents during the ERS operation, as well as the electrical hazard depending on the location of the ERS electrical equipment. To substantiate the additional measures for training the ERS personnel in safe working methods, using up-to-date technologies for training and testing the electrical safety knowledge acquired by students that provides reliable assessment and effective management of professional risks in the workplace. To demonstrate the need to update the current automated information systems to improve electrical safety. **Methods:** Electrical injuries at ERS are compared in terms of topography, while the general trends and statistics of electrical injuries associated with the operation of the trunk electric rolling stock are analyzed. **Results:** It has been established that the use of smart digital technologies is necessary, which, together with the source and statistical information, would allow reducing the level of electric shock and electrical equipment failures on the ERS. **Practical importance:** The necessity of further development of innovations in electrical safety maintenance at ERS has been shown, which will improve

the personnel labor protection training system through practical training and computer methods. The proposed smart digital technologies to be applied in the operation of ERS as regards electrical safety can be recommended for practical use.

Keywords: Information technologies, smart digital technologies, electric rolling stock, electrical safety, electrical injuries.

References

1. GOST R 58355–2019. *Informatsionno-kommunikatsionnyye tekhnologii v obrazovanii. Elektronnoye obucheniye bezopasnosti proizvodstva. Informatsionnaya model' kompetentsiy rabotnika po bezopasnosti proizvodstva* [Information and communication technologies in education. E-learning production safety. Information model of employee competency for production safety]. Moscow, Standartinform Publ., 2019, 16 p. (In Russian)
2. Gordon G. Yu. *Elektrotravmatizm i ego preduprezhdeniye* [Electrical injuries and their prevention]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2006, 258 p. (In Russian)
3. Khalin E. V. *Elektricheskaya bezopasnost'* [Electrical safety]. Moscow, TECHINTELL Research and Production Company Publ., 2017, 454 p. (In Russian)
4. Khalin E. V. *Sistemy elektronmogo obucheniya bezopasnosti proizvodstva* [E-learning production safety systems]. Moscow, TECHINTELL Research and Production Company Publ., 2019, 152 p. (In Russian)
5. Pyshnyy I. M. *Informatsionnyye tekhnologii i sistemy diagnostirovaniya pri ekspluatatsii i obsluzhivanii elektropodvizhnogo sostava: konspekt lektsiy* [Information technologies and diagnostic systems for electric rolling stock operation and maintenance: lecture notes]. Yekaterinburg, UrGUPS [Ural' State University of Railway Transport] Publ., 2016, 65 p. (In Russian)
6. *Rukovodstvo po ekspluatatsii elektrovoza EP20. Opisanie i rabota. Sistema upravleniya i diagnostiki* [Operation manual for electric locomotive EP20 (ЭП20). Description and operation. Control and diagnostic system]. Novocherkassk, OOO TRTrans Publ., 2012, 121 p. (In Russian)
7. Voronova N. I., Razinkin N. E. & Sarafanov G. B. *Lokomotivnyye ustroystva bezopasnosti* [Locomotive safety devices]. Textbook. Moscow, Academia Publ., 2014, 208 p. (In Russian)
8. *Avtomatizirovannyye sistemy kontrolya* [Automated control systems]. Available at: <https://ask-glonass.ru/> (accessed: 10.11.2019). (In Russian)
9. *Komp'yuterra. Legendarnyy zhurnal o sovremennykh tekhnologiyakh* [Computerra. The legendary magazine about modern technologies]. Available at: <https://www.computerra.ru/> (accessed: 10.11.2019). (In Russian)
10. Gvozdeva V. A. & Lavrent'yeva I. Yu. *Osnovy postroyeniya avtomatizirovannykh informatsionnykh sistem* [Fundamentals of automated information systems building]. Textbook. Moscow, FORUM PH, Research and Publishing Center INFRA-M, 2013, 320 p. (In Russian)
11. Kim K. K. & Krasnykh A. A. *Signalizatory napryazheniya na vozdukhnykh L·EP 6–35 kV* [Voltage signaling devices on overhead power lines of 6–35 kV]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life Safety], 2003, no. 6, pp. 24–27. (In Russian)

Received: January 28, 2020

Accepted: February 10, 2020

Author's information:

Konstantin K. KIM – D. Sci. in Engineering, Professor; kimkk@inbox.ru

Elena L. RYZHOVA – PhD in Engineering, Associate Professor; elena-astanovskaja@rambler.ru

УДК 656.212.3

Экологические аспекты технологии распределенного реестра на примере алгоритма консенсуса Proof-of-Work

А. Ю. Попадюк^{1,2}, Е. К. Коровяковский¹, Т. С. Титова¹

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

² ОАО «Российские железные дороги», Российская Федерация, 184209, Апатиты, Промышленная ул., 1

Для цитирования: Попадюк А. Ю., Коровяковский Е. К., Титова Т. С. Экологические аспекты технологии распределенного реестра на примере алгоритма консенсуса Proof-of-Work // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 136–143. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-136-143

Аннотация

Цель: Изучение влияния алгоритма консенсуса Proof-of-Work, используемого в технологии распределенного реестра, на мировую экологическую систему. Определение причин возникновения негативных факторов и предложение рациональных путей решения существующих проблем. **Методы:** Выполнен первичный сбор среднегодовых значений потребления электроэнергии в различных странах мира и показателей загрязнения электронными отходами. Произведена обработка полученной информации и сравнительный анализ обработанных данных. **Результаты:** Определены и графически иллюстрированы повышенное электропотребление, возникающее в результате выполнения компьютерными устройствами сложнейших математических вычислений, а также образование электронных отходов, создаваемых вследствие применения узкоспециализированного оборудования в процессе подтверждения транзакций. В качестве альтернативы рассмотрен более энергоэффективный алгоритм консенсуса Proof-of-Stake, используемый в блокчейне Ethereum. Проведен статистический анализ потребления электроэнергии технической платформой, применяющей алгоритм консенсуса Proof-of-Stake, в результате которого продемонстрированы положительные экологические аспекты в рамках технической системы распределенного реестра данных. **Практическая значимость:** С целью снижения экологических загрязнений, возникающих в результате внутренних процессов технологии распределенного реестра, предложен альтернативный алгоритм консенсуса Proof-of-Stake, не требующий использования специализированных компьютерных устройств для подтверждения транзакций, что способствует уменьшению количества потребляемой электроэнергии и создаваемых электронных отходов.

Ключевые слова: Экология, децентрализация, блокчейн, консенсус, Proof-of-Work, Proof-of-Stake, загрязнение, распределенный реестр, электронные отходы, электропотребление, биткоин, эфириум.

В настоящее время широко освещаются вопросы мировой экологии [1–4]. Правительства многих стран вынуждены проводить мероприятия, направленные на защиту и охрану окру-

жающей среды, в связи с наличием большого количества производственных факторов, оказывающих негативное воздействие на экосистему нашей планеты. Существенное влияние на

мировую экологическую обстановку оказывает технология распределенного хранения и передачи данных, называемая блокчейном [5]. Для обеспечения высокого уровня защищенности системы блокчейны используют алгоритмы консенсуса, позволяющие достигать единого решения среди всех участников сети. Существует множество алгоритмов, успешно применяющихся в различных типах распределенных сетей, однако наибольшую популярность получил консенсус Proof-of-Work [6]. Его ключевым достоинством является обеспечение повышенного уровня безопасности системы, который достигается за счет выполнения сложнейших математических алгоритмов [7]. Подобная структура действительно обладает высокой надежностью, но платой за использование консенсуса Proof-of-Work выступает повышенное потребление электроэнергии.

Согласно отчету платформы «*Digiconomist*», среднегодовое энергопотребление, возникающее в результате майнинга, составляет 73,17 ТВт·ч в год (рис. 1), что сопоставимо с

годовым потреблением электроэнергии всей Австрии [8].

На основании данных статистического ежегодника мировой энергетики 2019 г. можно графически изобразить годовую долю электропотребления блокчейна Биткоин относительно общего потребления электричества различными странами мира [9]. Из выборки, представленной на рис. 2, становится понятно, что количество электроэнергии, расходуемое в процессе майнинга, превышает совокупное годовое электропотребление таких стран как Австрия, Румыния, Узбекистан и др.

Помимо повышенного электропотребления, блокчейн Биткоин приводит к значительному количеству электронных отходов. Под электронными понимаются отходы, содержащие выброшенные электронные и прочие электрические устройства, а также их части [10]. Проблема электронных отходов возникает по причине применения специального оборудования, необходимого для майнинга [11]. Подобное оборудование имеет строгую специа-

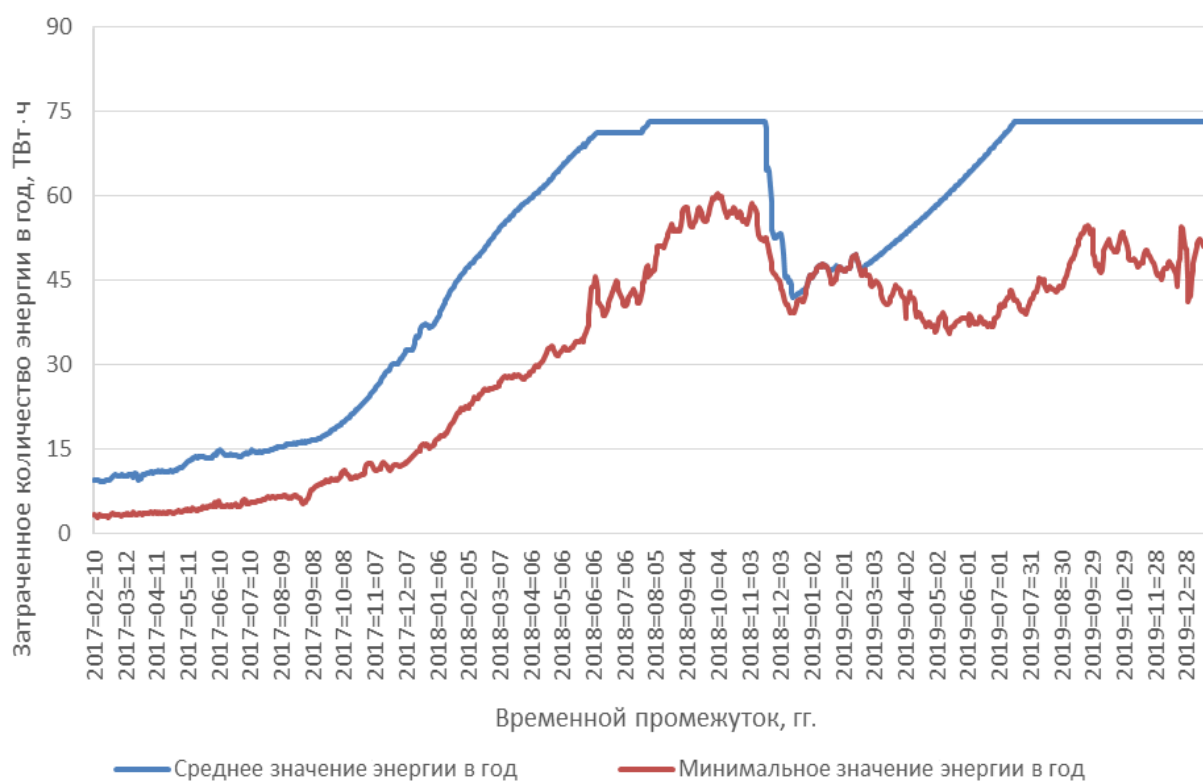


Рис. 1. Графическое изображение индекса энергопотребления блокчейна Биткоин в 2017–2020 гг.

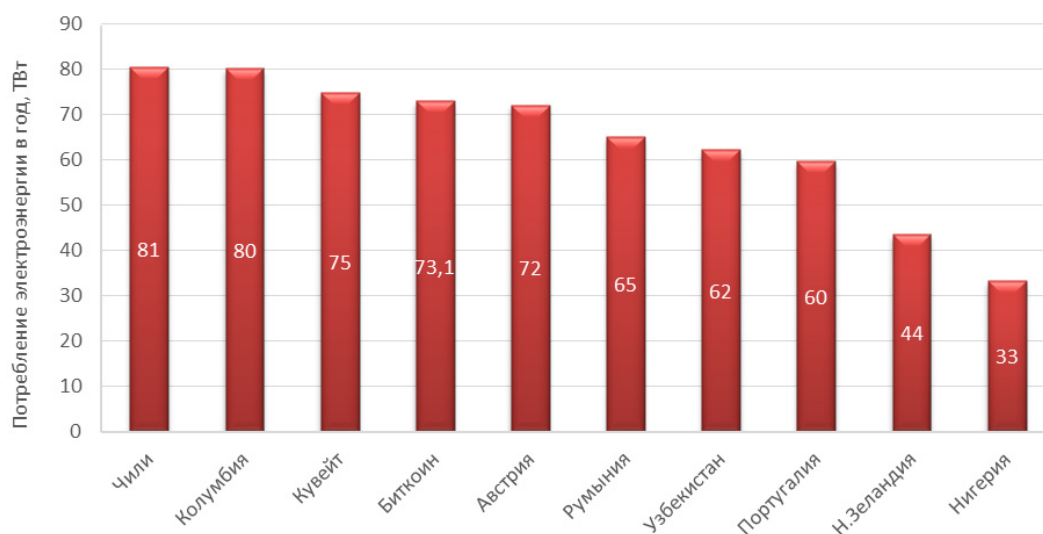


Рис. 2. Сравнение среднегодового электропотребления в различных странах и блокчейна Биткоин в 2018 г.

лизацию и не может использоваться в иных целях. В результате «гонки вооружений», присущей алгоритму Proof-of-Work, устройства, применяемые для майнинга, устаревают в среднем каждые 1,5 года [12]. Таким образом, среднегодовое значение электронных отходов на начало 2020 г. составляет 11,065 кТ в год (рис. 3).

Следует обратить внимание на низкую экологическую эффективность алгоритма Proof-

of-Work в сравнении с другими источниками загрязнения. Так, количество электронных отходов, создаваемых одной транзакцией в блокчейне Биткоин, более чем в 2 раза выше, чем возникающих в результате 10 000 транзакций в платежной системе VISA (рис. 4).

Таким образом, конечным результатом использования алгоритма Proof-of-Work является масштабное экологическое загрязнение, появляющееся в результате повышенного потребления

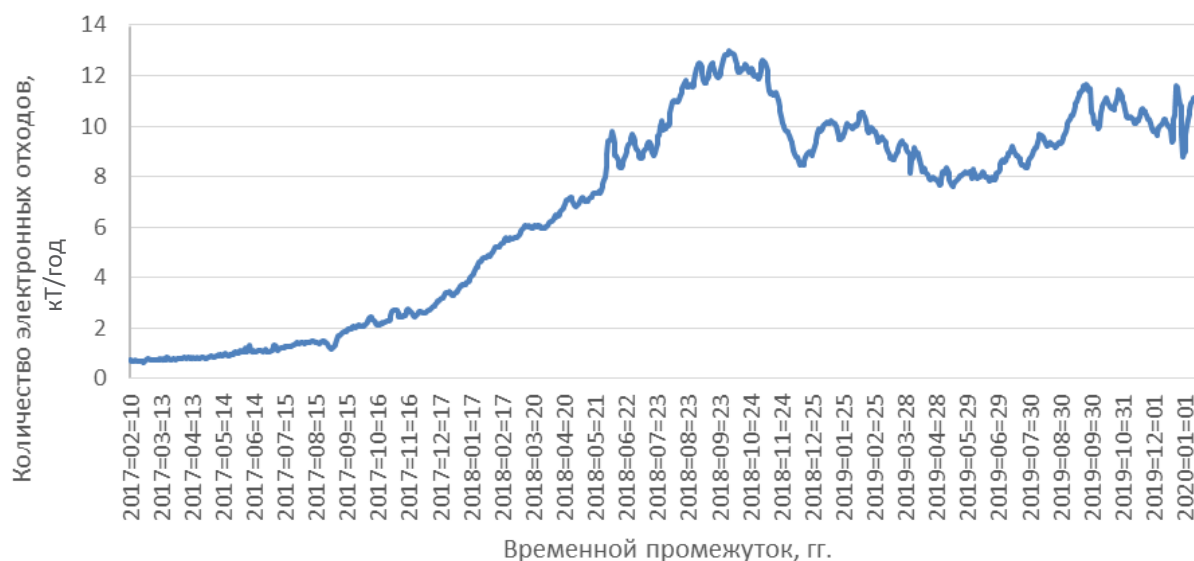


Рис. 3. Изменение среднегодовых произведенных электронных отходов при использовании алгоритма Proof-of-Work в 2017–2020 гг.

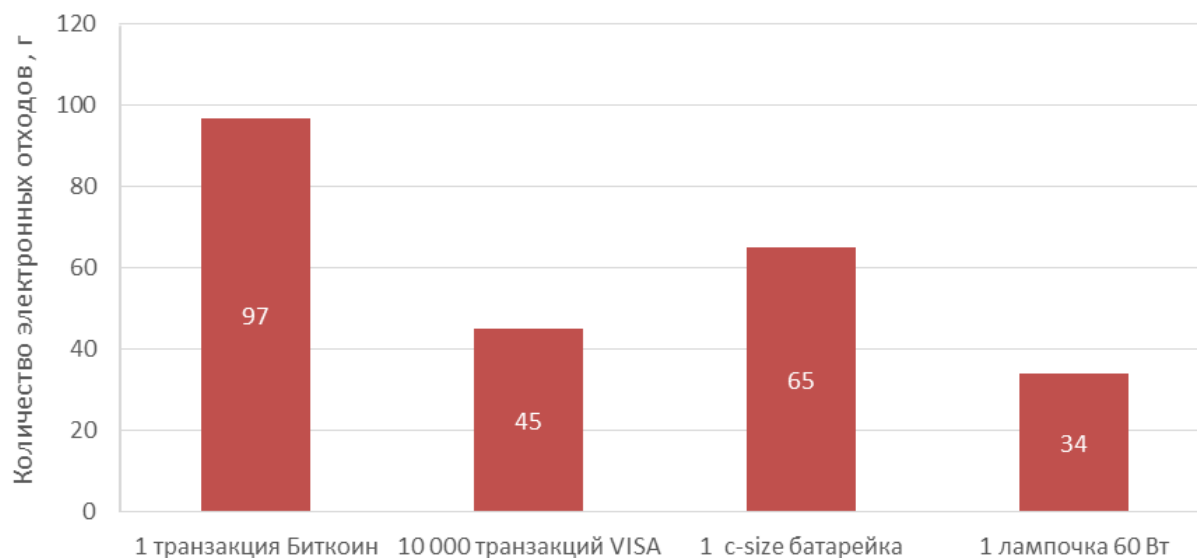


Рис. 4. Количество электронных отходов при различных видах загрязнений

электроэнергии и образования электронных отходов, оставляющих свой след в существующей экосистеме. На рис. 5 представлены экологические аспекты применения алгоритма консенсуса Proof-of-Work как в рамках одной транзакции, так и в границах среднегодовых значений.

По результатам проведенного анализа можно сделать вывод об экологической несостоятельности блокчейнов, использующих алгоритм Proof-of-Work. В качестве альтернативы консенсусу Proof-of-Work следует обратить внимание на алгоритм Proof-of-Stake, ключевое достоинство которого – отсутствие необходимости



Рис. 5. Экологические последствия использования алгоритма Proof-of-Work

в применении большого количества компьютерных мощностей, потребляющих электроэнергию. Процесс принятия решения в такой системе называется «форджинг» или «минтинг» и выполняется посредством операций с криптовалютами, не привлекая аппаратную составляющую. Наиболее известным блокчейном, использующим алгоритм Proof-of-Stake, является Ethereum. Согласно отчету «Digiconomist», среднегодовое значение энергопотребления, возникающего в результате «форджинга», составляет 7,65 ТВт·ч в год (рис. 6), что практически на 90 % меньше, чем при алгоритме консенсуса Proof-of-Work [8]. Таким образом, среднегодовое электропотребление сети Ethereum можно сопоставить с потреблением таких стран как Боливия, Люксембург, Зимбабве и др. (рис. 7).

При использовании алгоритма консенсуса Proof-of-Stake экологические издержки, связанные с электронными отходами, значительно снижаются в связи с отсутствием необходимости в наличии специального компьютерного оборудования, применяемого в алгоритме Proof-of-Work для подтверждения транзакций.

Для процесса консенсуса в алгоритме Proof-of-Stake достаточно обладать одним компьютером, не имеющим строгой специализации, что оказывает позитивное влияние на экологическую ситуацию в целом [13].

Подводя итоги, следует обратить внимание, что проведенное исследование позволяет взглянуть на технологию распределенного реестра с точки зрения экологических аспектов технических систем. Обоснована экологическая несостоятельность алгоритма консенсуса Proof-of-Work, заключающаяся в указании существующих проблем, среди которых можно выделить повышенное электропотребление компьютерными мощностями в процессе подтверждения транзакций и создание электронных отходов, негативно влияющих на мировую экологическую ситуацию в целом. Поэтому предлагается переход на более «энергоемкий» алгоритм консенсуса Proof-of-Stake, для которого не требуется большое количество специализированных аппаратных устройств, вызывающих экологическое загрязнение. В результате перехода на альтернативный алгоритм консенсуса ожидается снижение финансовых издержек, связанных



Рис. 6. Изменение индекса электропотребления блокчейна при использовании алгоритма Proof-of-Stake в 2017–2020 гг.

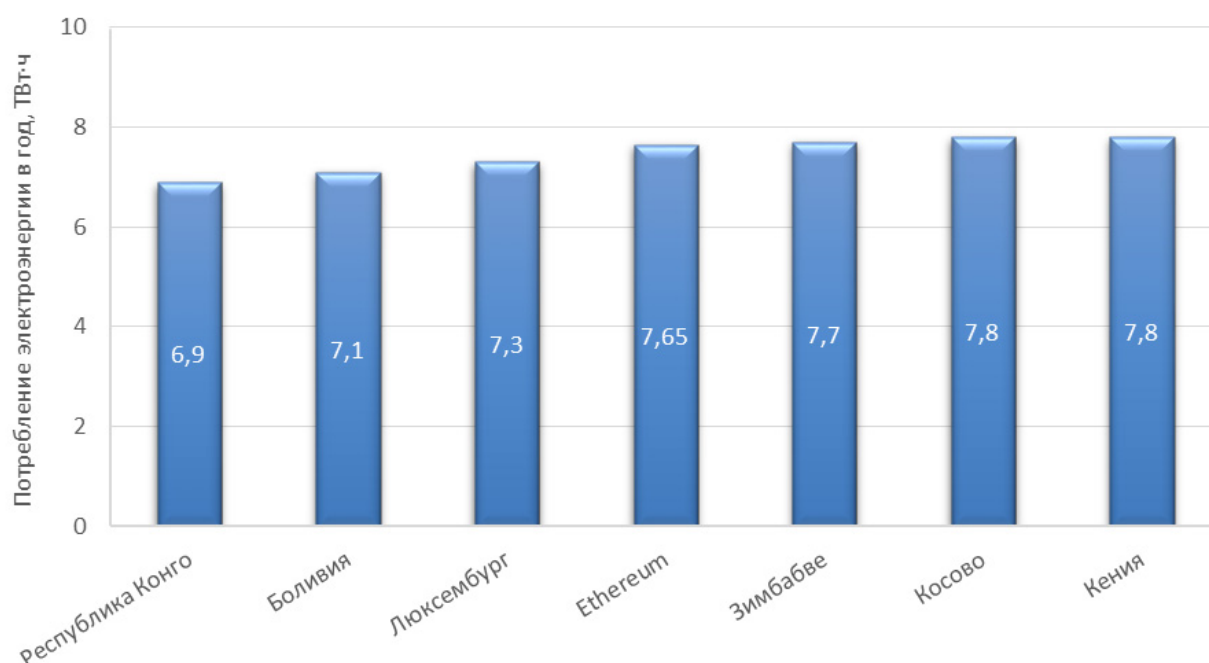


Рис. 7. Сравнение среднегодового электропотребления в различных странах и блокчейна Ethereum в 2018 г.

с оплатой электроэнергии, и улучшение экологической ситуации не только в России, но и во всем мире.

Библиографический список

1. Национальный проект «Экология». – URL : <https://strategy24.ru/rf/ecology/projects/natsionalnyy-proyekt-ekologiya> (дата обращения : 22.01.2020 г.).
2. Комовкина Н. С. Определение ущерба от воздействия железнодорожных припортовых станций на земельные ресурсы / Н. С. Комовкина // Международные науч.-исслед. журн. – 2013. – С. 50–52.
3. Заболоцкая К. А. Автоматизация учета «зеленого» аспекта в работе грузового терминала / К. А. Заболоцкая, О. Д. Покровская // Цифровизация транспорта и образования. – 2019. – С. 346–350.
4. Пронин А. П. Влияние железнодорожного транспорта на окружающую природную среду / А. П. Пронин // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 4. – С. 610–623.
5. Финанс.-эконом. журн. Forbes. – URL : [https://www.forbes.ru/tehnologii/366885bitkoin-na-ugle-](https://www.forbes.ru/tehnologii/366885bitkoin-na-ugle)

[kak-kriptovalyuty-gubyat-planetu](#) (дата обращения : 22.01.2020 г.).

6. Попадюк А. Ю. Технические аспекты публичной распределенной сети на примере блокчейна Биткойн / А. Ю. Попадюк, Е. К. Коровяковский // Russian Journal of Logistics & Transport Management. – 2019. – P. 126–133.

7. Дрешер Д. Основы блокчейна : вводный курс для начинающих в 25 небольших главах ; пер. с англ. А. В. Снастина. – М. : ДМК Пресс, 2018. – 312 с.

8. Официальный сайт проекта «Digiconomist». – URL : <https://digiconomist.net/bitcoinenergy-consumption> (дата обращения : 22.01.2020 г.).

9. Стат. ежегодник мировой энергетики. – 2019. – URL : <https://yearbook.enerdata.ru/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html> (дата обращения : 22.01.2020 г.).

10. Официальный сайт сервиса для поиска по базе словарей. – URL : <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1685975> (дата обращения : 22.01.2020 г.).

11. White Paper BitFury Group «Public versus Private Blockchains». – URL : <https://bitfury.com/content/downloads/public-vs-private-pt1-1.pdf> (дата обращения : 22.01.2020 г.).

12. Офиц. сайт проекта «Digiconomist». – URL : <https://digiconomist.net/ethereumenergy-consumption> (дата обращения : 22.01.2020 г.).

13. White Paper Bitfury Group «Proof-of-Stake vs. Proof-of-Work». – URL : <https://bits.media/images/news/290915/PoS%20vs%20PoW%201.0-ru.pdf> (дата обращения : 22.01.2020 г.).

Дата поступления: 31.01.2020

Решение о публикации: 11.02.2020

Контактная информация:

ПОПАДЮК Антон Юрьевич – аспирант;

antonpopadyuk1997@yandex.ru

КОРОВЯКОВСКИЙ Евгений Константино-

вич – канд. техн. наук, доцент;

ekorsky@mail.ru

ТИТОВА Тамила Семеновна – д-р техн. наук,

профессор, первый проректор –

проректор по научной работе;

titova@pgups.ru

Environmental aspects of blockchain technology illustrated through the example of the Proof-of-Work consensus algorithm

A. Yu. Popadyuk^{1,2}, E. K. Korovyakovskiy¹, T. S. Titova¹

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

² Russian Railroads OJSC, 1, Promyshlennaya ul., Apatity, 184209, Russian Federation

For citation: Popadyuk A. Yu., Korovyakovskiy E. K., Titova T. S. Environmental aspects of blockchain technology illustrated through the example of the Proof-of-Work consensus algorithm. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 1, pp. 136–143 (In Russian)

DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-136-143

Summary

Objective: Studying the influence of the Proof-of-Work consensus algorithm used in blockchain technology on the global environmental system. Determining the causes of threats and suggesting rational solutions to existing problems. **Methods:** Initial collection of average annual power consumption values in various countries around the world and electronic waste pollution data has been carried out. The received information has been processed and a comparative analysis of the processed data has been performed. **Results:** The increased power consumption resulting from the complex mathematical calculations performed by computing devices, as well as the generation of electronic waste by the use of highly specialized equipment in the process of transaction confirmation, have been identified and graphically illustrated. As an alternative, the more energy-intensive Proof-of-Stake consensus algorithm used in the Ethereum blockchain has been considered. A statistical analysis of power consumption by a technical platform using the Proof-of-Stake consensus algorithm has been carried out with positive environmental aspects demonstrated within the blockchain engineering system. **Practical importance:** To reduce environmental pollution resulting from the blockchain technology internal processes, an alternative Proof-of-Stake consensus algorithm is proposed that does not require specialized computer devices to confirm transactions, which provides for reduction of the amount of electricity consumed and electronic waste generated.

Keywords: Ecology, decentralization, blockchain, consensus, Proof-of-Work, Proof-of-Stake, pollution, distributed ledger, electronic waste, power consumption, Bitcoin, Ethereum.

References

1. National project "Ecology". Available at: <https://strategy24.ru/rf/ecology/projects/natsional-nyy-proyekt-ekologiya> (accessed: 22.01.2020). (In Russian)
2. Komovkina N. S. Opredeleniye ushcherba ot vozdeystviya zheleznodorozhnykh priportovykh stantsiy na zemel'nyye resursy [Determination of damage from railway port stations on land resources]. *Mezhdunarodnyye nauch.-issled. zhurnaly* [International scientific research journals], 2013, pp. 50–52. (In Russian)
3. Zabolotskaya K. A. & Pokrovskaya O. D. Avtomatizatsiya ucheta "zelenogo" aspekta v rabote gruzovogo terminala [Automation of accounting for the "green" aspect in the cargo terminal operation]. *Tsifrovizatsiya transporta i obrazovaniya* [Digitalization of Transport and Education], 2019, pp. 346–350. (In Russian)
4. Pronin A. P. Vliyaniye zheleznodorozhnogo transporta na okruzhayushchuyu prirodnuyu sredu [Impact of railway transport on the environment]. *Avtomatika na transporte* [Automatic Equipment in Transport], 2016, vol. 2, no. 4, pp. 610–623. (In Russian)
5. *Forbes financial and economic magazine*. Available at: <https://www.forbes.ru/tehnologii/366885bitkoin-na-ugle-kak-kriptoalyuty-gubyat-planetu> (accessed: 22.01.2020). (In Russian)
6. Popadyuk A. Yu. & Korovyakovskiy E. K. Tekhnicheskiye aspekty publichnoy raspredelennoy seti na primere blokcheyna Bitkoin [Technical aspects of a public distributed network with the Bitcoin blockchain as an example]. *Russian Journal of Logistics & Transport Management*, 2019, pp. 126–133. (In Russian)
7. Drescher D. Blockchain basics. A non-technical introduction in 25 steps. Translated from English by A. V. Snastin. Moscow, DMK Press Publ., 2018, 312 p. (In Russian)
8. "Digiconomist" official website. Available at: <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption> (accessed: 22.01.2020). (In Russian)
9. *Statisticheskiy ezhegodnik mirovoy energetiki* [Statistical Yearbook of World Power Industry]. Available at: <https://yearbook.enerdata.ru/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html> (accessed: 22.01.2020). (In Russian)
10. The official website of the dictionary database searching service. Available at: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1685975> (accessed: 22.01.2020). (In Russian)
11. White Paper BitFury Group "Public versus Private Blockchains". Available at: <https://bitfury.com/content/downloads/public-vs-private-pt1-1.pdf> (accessed: 22.01.2020).
12. "Digiconomist" official website. Available at: <https://digiconomist.net/ethereumenergy-consumption> (accessed: 22.01.2020).
13. White Paper Bitfury Group "Proof-of-Stake vs. Proof-of-Work". Available at: <https://bits.media/images/news/290915/PoS%20vs%20PoW%201.0-ru.pdf> (accessed: 22.01.2020).

Received: January 31, 2020

Accepted: February 11, 2020

Author's information:

Anton Yu. POPADYUK – Postgraduate Student;
antonpopadyuk1997@yandex.ru
Evgeny K. KOROVYAKOVSKIY –
PhD in Engineering, Associate Professor;
ekorsky@mail.ru
Tamila S. TITOVA – D. Sci. in Engineering,
Professor, First Vice-rector, Vice-rector for
Research; titova@pgups.ru

УДК 626.862.1

Гидравлический расчет бесполостных дрен треугольного профиля, усиленных дренажной трубой

В. И. Штыков, А. Б. Пономарев

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

Для цитирования: Штыков В. И., Пономарев А. Б. Гидравлический расчет бесполостных дрен треугольного профиля, усиленных дренажной трубой // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 144–156.
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-144-156

Аннотация

Цель: Разработать метод расчета бесполостных дрен треугольного профиля, усиленных дренажной трубой, в случае двухстороннего впадения в коллектор. **Методы:** Бесполостные дрены по сравнению с трубчатыми обладают более высокой водозахватной способностью, но уступают трубчатым по отводящей способности. Водоотводящая способность бесполостных дрен может быть увеличена путем введения в них дренажной трубы. Практически на всей длине бесполостной части дрены имеет место переходный режим движения воды, а в трубчатой – турбулентный. Приближенным методом решено дифференциальное уравнение фильтрации для бесполостной части дрены. Также решено дифференциальное уравнение движения жидкости для трубчатой части, имеющей уклон и впадающей в коллектор с двух сторон. **Результаты:** В результате совместного решения двух дифференциальных уравнений, описывающих движение воды в бесполостной и трубчатой частях дрены, получены расчетные зависимости, позволяющие определить параметры дрен. Приведен пример расчета. **Практическая значимость:** Данный метод расчета позволяет рассчитать предлагаемую конструкцию. Ранее методики для этого случая в литературе не приводились.

Ключевые слова: Бесполостной дренаж, трубчатый дренаж, треугольное поперечное сечение, гидравлический расчет, переходный режим движения.

Введение

Теоретические и лабораторные исследования движения воды в крупнозернистых материалах как в нашей стране, так и за рубежом проводятся с 70-х годов XX в. и продолжают в настоящее время [1–4]. Также изучается фильтрация воды в крупнопористом бетоне [5–7]. Все эти работы нашли свое развитие при обосновании конструкций бесполостного дренажа. Большой интерес представляют конструкции бесполостного дренажа периодического профиля для осушения слабоводопроницаемых грунтов в сельском хозяйстве [8], а также для осушения участков с грунтово-напорным питанием [9].

В 2007 г. была поставлена задача повышения пропускной способности железных дорог, в том числе за счет повышения массы грузовых поездов. В связи с этим проводились исследования по поиску эффективных решений по увеличению несущей способности земляного полотна для обеспечения движения тяжеловесных составов [10–17].

По сравнению с трубчатым дренажом бесполостной дренаж обладает рядом преимуществ:
– не разрушается под воздействием отрицательных температур;

- сохраняет работоспособность при просадках и пучении грунтов;
- характеризуется высокой водозахватной способностью;
- в весенний период вступает в действие раньше из-за значительных по сравнению с трубчатым дренажом размеров поперечного сечения;
- долговечен;
- имеет более высокую самоочищающую способность;
- отличается простотой конструкции, отсутствием стыков и сложных узлов сопряжения;
- простотой контроля качества выполняемых работ по устройству бесполостных дрен;
- возможностью совмещения функции бесполостной дрены с функцией подбетонки (использование беспесчаного фильтрующего бетона), например под линейные несущие конструкции.

Особенно перспективно применение бесполостного дренажа в слабоводопроницаемых грунтах при заложении в зону сезонного промерзания.

Однако у бесполостного дренажа есть недостатки. Из-за высокой материалоемкости бесполостных дрен важное значение имеет обоснование рациональных геометрических параметров и форм. Кроме того, при существенно более высокой по сравнению с трубчатым дренажом водозахватной способности его водоотводящая способность ниже. Исследованиями движения воды в трещинных и зернистых средах В. Н. Жиленковым (см. [18]) было показано, что разница водоотводящей способности этих сред обусловлена различием их гидравлических сопротивлений.

По состоянию на сегодняшний день получены расчетные зависимости для гидравлического расчета бесполостных дрен трапециoidalного, прямоугольного и треугольного сечений [18–20]. Водоотводящая способность бесполостной дрены может быть существенно увеличена путем введения в нее дренажной трубы.

Метод исследования

Цель статьи – получение на основе аналитического метода расчетных зависимостей для определения глубины воды в бесполостной части дрены, расстояния между коллекторами в случае бесполостных дрен треугольного профиля, закладываемых с уклоном, при двухстороннем впадении в коллектора и расходов воды, отводимых как бесполостной частью дрены, так и дренажной трубой.

Примем, что в бесполостной части дрены имеет место переходный режим движения воды [20], а в трубчатой – турбулентный, включающий в себя все три области гидравлического сопротивления. Расчетная схема (а) и поперечное сечение (б) бесполостной дрены с трубой представлены на рисунке.

К дренам идет непрерывный приток интенсивностью q , причем

$$q = q_1 + q_2,$$

где q_1 – удельная приточность, приходящаяся на бесполостную часть дрены; q_2 – удельная приточность к дренажной трубе.

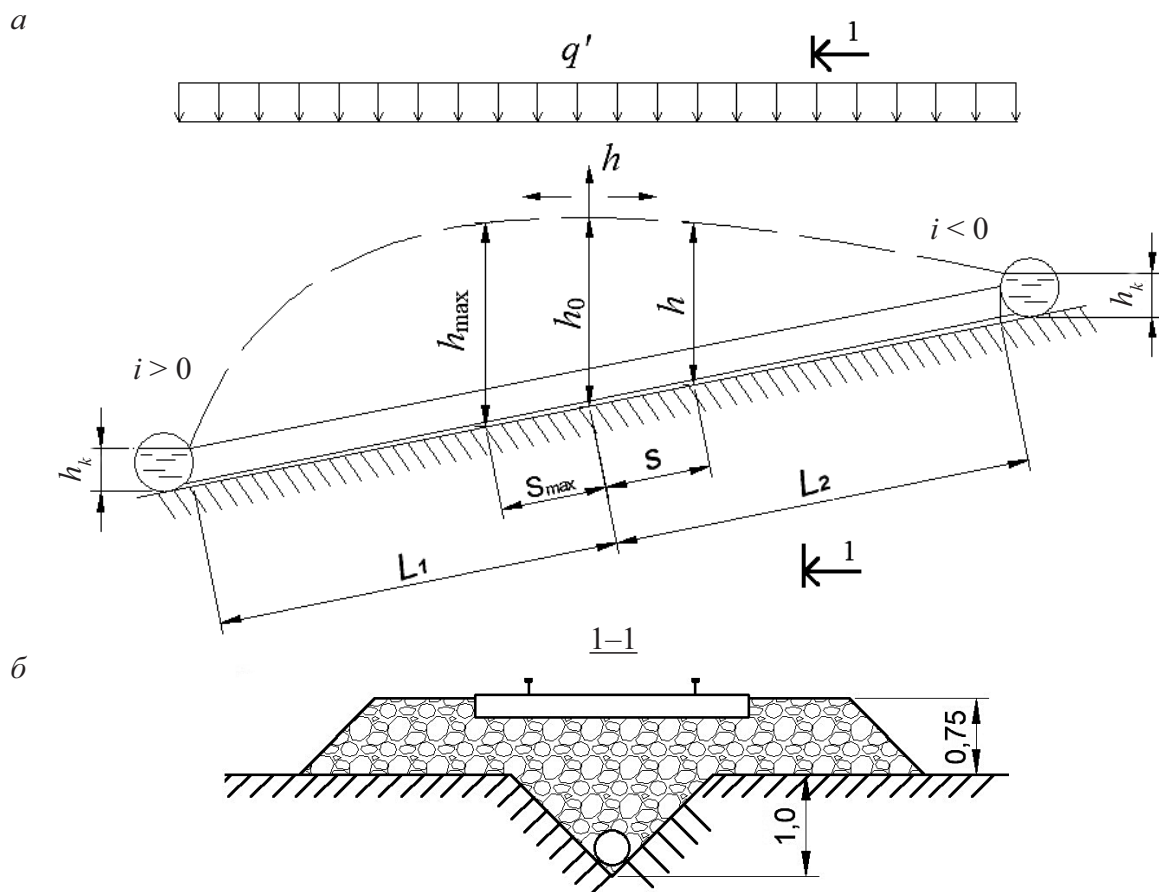
В бесполостной и трубчатой частях дрены движение воды плавно изменяющееся, и для всей длины трубчатой дрены свойственен напорный режим.

Запишем уравнение движения воды в дифференциальной форме для произвольного сечения 1–1 бесполостной части дрены с двухсторонним впадением в коллектора (рисунок) [19]:

$$\frac{dh}{ds} = \pm i - \left[\frac{q_1 \cdot S}{K_l \cdot \omega} + \frac{q_1^2 \cdot S^2}{K_l^2 \cdot \omega^2} \right], \quad (1)$$

здесь S – расстояние от начала координат до рассматриваемого живого сечения; ω – площадь живого сечения бесполостной части дрены в рассматриваемом сечении

$$\omega = \left(mh^2 - \frac{\pi d^2}{4} \right).$$



Продольный разрез и поперечное сечение дрены с трубой в нижней части

Как и ранее, заменим треугольное живое сечение на эквивалентное по площади прямоугольное поперечное сечение с шириной b_e :

$$\omega = b_e \cdot h - \frac{\pi d^2}{4} = b_e \left(h - \frac{\pi d^2}{4b_e} \right). \quad (2)$$

Величина b_e вычисляется по формуле

$$b_e = m \cdot \beta \cdot h_0,$$

где β учитывает изменение глубины фильтрационного потока вдоль дрены, принимаемое равным 0,68 [18]; h_0 – искомая величина глубины воды в бесполостной части дрены в начале координат.

Введем обозначение $Y = \left(h - \frac{\pi d^2}{4b_e} \right)$ и с учетом выражения (2) перепишем уравнение (1) в следующем виде:

$$\frac{dY}{dS} = \pm i - \left[\frac{q_1 \cdot S}{K_l \cdot b_e \cdot Y} + \frac{q_1^2 \cdot S^2}{K_l^2 \cdot b_e^2 \cdot Y^2} \right].$$

Таким образом, уравнение (1) преобразовали к тому виду, решение которого было получено ранее в [18]. Воспользуемся этим решением для случая $i > 0$, и тогда после некоторых преобразований получим зависимость для определения h_0

$$h_0 = L_1 \sqrt{\frac{(t_k^3 - i \cdot t_k^2 + U_l \cdot t_k + U_t)^{(1-\Phi_1)}}{(t_k - K_1)^{(1-3\Phi_1)}}} \cdot \exp \left[-\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2t_k + K_1 - i}{\sqrt{N_1}} \right) \right],$$

где

$$t_k = \frac{h_k}{L_1}; \quad \Phi_1 = \frac{K_1^2}{3K_1^2 - 2K_1 \cdot i + U_l};$$

$$M = (1 - \Phi_1) \frac{U_l}{K_1} + (1 - 3\Phi_1) \frac{U_t}{K_1^2};$$

$$N_1 = 4(K_1^2 + U_l) - (K_1 + i)^2;$$

$$K_1 = \frac{i}{3} - 2r \cdot \operatorname{sh} \left(\frac{1}{3} \operatorname{Arsh} \frac{P}{r^3} \right);$$

$$r = \sqrt{\frac{U_l}{3} - \left(\frac{i}{3} \right)^2};$$

$$P = -\left(\frac{i}{3} \right)^3 + \frac{i \cdot U_l}{6} + \frac{U_t}{2}.$$

При расчете правой части дрены с обратным уклоном дна ($i < 0$) в формулах, содержащих уклон дна, знак перед i меняется на противоположный.

Расчет дренажной трубы, заложенной внутри бесполостной дрены с уклоном при одностороннем впадении в коллектора, был проведен ранее в [20]. При этом было принято, что напорная линия для бесполостной части дрены и перфорированной трубчатой части практически совпадают, так как скорости перетекания из бесполостной части в трубчатую составляют менее 0,1 м/с и местными потерями напора на отверстиях трубы можно пренебречь.

Тогда дифференциальное уравнение неравномерного движения воды в дренажной трубе с двухсторонним впадением в коллектора, выраженное через глубину воды фильтрационного потока в бесполостной части дрены, будет иметь вид

$$\frac{dh}{ds} = \pm i - \frac{8 \cdot \lambda_{\text{cp}} \cdot q_2^2 \cdot S^2}{\pi^2 \cdot d^5 \cdot g}. \quad (3)$$

Решая уравнение (3), получим

– для левой части трубчатой дрены

$$h_0 = h_k + \frac{8 \cdot \lambda_{\text{cp}} \cdot q_2^2 \cdot L_1^3}{3 \cdot \pi^2 \cdot d^5 \cdot g} - i \cdot L_1,$$

– для правой части трубчатой дрены

$$h_0 = h_k + \frac{8 \cdot \lambda_{\text{cp}} \cdot q_2^2 \cdot L_2^3}{3 \cdot \pi^2 \cdot d^5 \cdot g} + i \cdot L_2.$$

Результаты исследований

Ход расчета рассмотрим на примере.

Дано: материал заполнителя бесполостной дрены – щебень фракции 5–20 мм: $d_{17} = 1,2$ см; коэффициент неоднородности $\eta = 1,9$; пористость $n = 0,48$; коэффициент формы частиц $\psi = 1,68$; коэффициент Шези $C_0 = 78$ см^{0,5}/с; кинематический коэффициент вязкости $\nu = 0,0131$ см²/с; коэффициент откоса $m = 1,0$; удельный приток $q = 0,75 \cdot 10^{-4}$ м²/с; диаметр трубы 0,05 м; $\lambda_{\text{cp}} = 0,045$.

Определить $L_1, h_{\text{max}}, L_2, h_0, q_1, q_2$.

Найдем расчетный диаметр фильтрационного хода [18]

$$d_u = 0,57 \sqrt[6]{\eta} \frac{n}{1-n} \cdot \frac{d_{17}}{\psi} = 0,57 \sqrt[6]{1,9} \frac{0,48}{1-0,48} \cdot \frac{1,2}{1,68} = 0,42 \text{ см.}$$

Вычисляем коэффициенты фильтрации при ламинарном и турбулентном режимах [19]:
при ламинарном режиме:

$$K_l = \frac{n \cdot g \cdot d_u^2}{8 \pi^2 \cdot \nu} = \frac{0,48 \cdot 9,81 \cdot 0,0042^2}{8 \cdot 3,14^2 \cdot 0,0131 \cdot 10^{-4}} = 0,803 \text{ м/с,}$$

при турбулентном режиме

$$K_t = \frac{n \cdot C_0}{\pi^{3/2}} \sqrt{2 d_u} = \frac{0,48 \cdot 78}{3,14^{3/2}} \sqrt{2 \cdot 0,42} = 6,17 \text{ см/с, или } 0,0617 \text{ м/с.}$$

Принимаем в первом приближении $L_1 = 26$ м, $h_0 = 0,3$ м и по формуле (3) находим q_2

$$q_2 = \sqrt{\frac{3 \cdot \pi^2 \cdot d^5 \cdot g (h_0 - h_k + i \cdot L_1)}{8 \cdot \lambda_{\text{cp}} \cdot L_1^3}} =$$

$$= \sqrt{\frac{3 \cdot 3,14^2 \cdot 0,05^5 \cdot 9,81 (0,30 - 0,05 + 0,003 \cdot 26)}{8 \cdot 0,045 \cdot 26^3}} = 0,62 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с.}$$

Определяем величину q_1

$$q_1 = q - q_2 = 0,75 \cdot 10^{-4} - 0,62 \cdot 10^{-4} = 0,13 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Вычисляем следующие параметры: $U_p, U_k, K_1, \Phi_1, M, N_1$ и t_k :

$$t_k = \frac{0,05}{26} = 0,0019, \quad b_e = m \cdot \beta \cdot h_0 = 1 \cdot 0,68 \cdot 0,30 = 0,204 \text{ м},$$

$$U_l = \frac{q_1}{K_l \cdot b_e} = \frac{0,13 \cdot 10^{-4}}{0,803 \cdot 0,204} = 0,793 \cdot 10^{-4},$$

$$U_t = \frac{q_1^2}{K_l^2 \cdot b_e^2} = \frac{(0,13 \cdot 10^{-4})^2}{0,0617^2 \cdot 0,204^2} = 1,066 \cdot 10^{-6},$$

$$r = \sqrt{\frac{U_l}{3} - \left(\frac{i}{3}\right)^2} = \sqrt{\frac{0,793 \cdot 10^{-4}}{3} - \left(\frac{0,003}{3}\right)^2} = 0,504 \cdot 10^{-2},$$

$$P = -\left(\frac{i}{3}\right)^3 + \frac{i \cdot U_l}{6} + \frac{U_t}{2} = -\left(\frac{0,003}{3}\right)^3 + \frac{0,003 \cdot 0,793 \cdot 10^{-4}}{6} + \frac{1,066 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,572 \cdot 10^{-6},$$

$$K_1 = \frac{i}{3} - 2r \cdot \text{sh} \left(\frac{1}{3} \text{Arsh} \frac{P}{r^3} \right) = \frac{0,003}{3} -$$

$$- 2 \cdot 0,504 \cdot 10^{-2} \cdot \text{sh} \left(\frac{1}{3} \text{Arsh} \frac{0,572 \cdot 10^{-6}}{(0,504 \cdot 10^{-2})^3} \right) = -0,708 \cdot 10^{-2},$$

$$\Phi_1 = \frac{K_1^2}{3K_1^2 - 2K_1 \cdot i + U_l} =$$

$$= \frac{(-0,708 \cdot 10^{-2})^2}{3(-0,708 \cdot 10^{-2})^2 + 2 \cdot 0,708 \cdot 10^{-2} \cdot 0,003 + 0,793 \cdot 10^{-4}} = 0,182,$$

$$M = (1 - \Phi_1) \frac{U_l}{K_1} + (1 - 3\Phi_1) \frac{U_t}{K_1^2} = (1 - 0,182) \cdot \frac{0,793 \cdot 10^{-4}}{-0,708 \cdot 10^{-2}} +$$

$$+ (1 - 3 \cdot 0,182) \cdot \frac{1,066 \cdot 10^{-6}}{(-0,708 \cdot 10^{-2})^2} = 0,05 \cdot 10^{-2},$$

$$N_1 = 4 \cdot (K_1^2 + U_l) - (K_1 + i)^2 = 4 \cdot (0,501 \cdot 10^{-4} + 0,793 \cdot 10^{-4}) -$$

$$- (-0,708 \cdot 10^{-2} + 0,3 \cdot 10^{-2})^2 = 5,011 \cdot 10^{-4},$$

$$\begin{aligned}
L_1 &= h_0 \sqrt{\frac{(t_k - K_1)^{(1-3\Phi_1)}}{(t_k^3 - i \cdot t_k^2 + U_l \cdot t_k + U_t)^{(1-\Phi_1)}}} \cdot \exp \left[\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{2t_k + K_1 - i}{\sqrt{N_1}} \right) \right] = \\
&= 0,3 \sqrt{\frac{(0,0019 + 0,708 \cdot 10^{-2})^{(1-3 \cdot 0,182)}}{[0,0019^3 - 0,3 \cdot 10^{-2} \cdot 0,0019^2 + 0,793 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0019 + 1,066 \cdot 10^{-6}]^{(1-0,182)}}} \times \\
&\times \exp \left[\frac{0,05 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{5,011 \cdot 10^{-4}}} \left(\frac{3,14}{2} - \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot 0,0019 - 0,708 \cdot 10^{-2} - 0,3 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{5,011 \cdot 10^{-4}}} \right) \right] = 26 \text{ м.}
\end{aligned}$$

Принимаем $L_1 = 26 \text{ м}$.

Максимальная глубина воды $h_{\max}$ в бесполостной дрене будет в сечении, расположенном на расстоянии $s_{\max}$ от начала координат в левой части дрены. Величина $s_{\max}$ может быть вычислена по следующей формуле [18]:

$$s_{\max} = h_0 \sqrt{\frac{(t_{\max} - K_1)^{(1-3\Phi_1)}}{(t_{\max}^3 - i \cdot t_{\max}^2 + U_l \cdot t_{\max} + U_t)^{(1-\Phi_1)}}} \cdot \exp \left[\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{2t_{\max} + K_1 - i}{\sqrt{N_1}} \right) \right],$$

в которой

$$\begin{aligned}
t_{\max} &= \frac{h_{\max}}{s_{\max}} = \frac{U_l}{2i} \left(1 + \sqrt{1 + 4i \frac{U_t}{U_l^2}} \right) = \\
&= \frac{0,793 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-2}} \left(1 + \sqrt{1 + 4 \cdot 0,3 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1,066 \cdot 10^{-6}}{(0,793 \cdot 10^{-4})^2}} \right) = 0,036,
\end{aligned}$$

$$h_{\max} = t_{\max} \cdot s_{\max},$$

$$\begin{aligned}
s_{\max} &= h_0 \sqrt{\frac{(t_{\max} - K_1)^{(1-3\Phi_1)}}{(t_{\max}^3 - i \cdot t_{\max}^2 + U_l \cdot t_{\max} + U_t)^{(1-\Phi_1)}}} \cdot \exp \left[\frac{M}{\sqrt{N_1}} \left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{2t_{\max} + K_1 - i}{\sqrt{N_1}} \right) \right] = \\
&= 0,3 \sqrt{\frac{(0,036 + 0,708 \cdot 10^{-2})^{(1-3 \cdot 0,182)}}{(3,6^3 \cdot 10^{-6} - 0,3 \cdot 10^{-2} \cdot 0,036^2 + 0,793 \cdot 10^{-4} \cdot 3,6 \cdot 10^{-2} + 1,066 \cdot 10^{-6})^{(1-0,182)}}} \times \\
&\times \exp \left[\frac{0,05 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{5,011 \cdot 10^{-4}}} \left(\frac{3,14}{2} - \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot 0,036 - 0,708 \cdot 10^{-2} - 0,003}{\sqrt{5,011 \cdot 10^{-4}}} \right) \right],
\end{aligned}$$

$$s_{\max} = 8,74 \text{ м,}$$

$$h_{\max} = 0,036 \cdot 8,74 = 0,32 \text{ м,}$$

$$a = \frac{\pi \cdot d^2}{4b_e} = \frac{3,14 \cdot 0,0025}{4 \cdot 0,204} = 0,01 \text{ м},$$

$$h_{\max} = 0,32 + 0,01 = 0,33 \text{ м}.$$

Практически по всей длине бесполостной части дрены, за исключением начального участка, имеющего небольшие размеры, режим движения переходный. Вычислим, какова должна быть предельная величина уклона у бесполостной дрены, чтобы при заложенных выше в примере исходных данных переходный режим сменился турбулентным:

$$i = -2 \cdot r_i \cdot \operatorname{ch} \left(\frac{1}{3} \operatorname{Arch} \frac{\Delta_i}{r_i^3} \right) - \frac{U_i^2}{12 \cdot U_i},$$

где

$$r_i = -\sqrt{\frac{3}{2}U_i + \frac{U_i^4}{144 \cdot U_i^2}}; \quad \Delta_i = \frac{1}{1728 \cdot U_i^3} (U_i^6 - 540 \cdot U_i^2 \cdot U_i^3 - 5832 \cdot U_i^4).$$

Подставляя в формулы величины $U_i = 0,793 \cdot 10^{-4}$ и $U_i = 1,066 \cdot 10^{-6}$, получим $i = 0,026$.

Таким образом, при уклоне дна дрены более 0,026 режим движения в бесполостной части дрены (за исключением начального участка), как и в дренажной трубе, будет турбулентным. В рассматриваемом случае уклон $i = 0,003$ существенно меньше полученного предельного значения при изложенных выше исходных данных.

Теперь возможно уточнить величину коэффициента гидравлического трения $\lambda_{\text{ср}}$, которая в расчетах принималась равной 0,045.

Для участка, где заканчивается ламинарный режим в трубе и начинается область гидравлически гладких труб, $\lambda = 0,046$.

Расчеты показали, что длина участка трубы с ламинарным режимом равна 2,1 м, средняя скорость в этом сечении – 0,06 м/с, а потери напора – 0,02 см.

Вычислим λ для устьевоего участка:

- средняя скорость в устье дренажной трубы равна

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{q_2 \cdot L_1}{\omega} = \frac{4 \cdot q_2 \cdot L_1}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,62 \cdot 10^{-4} \cdot 28}{3,14 \cdot 0,05^2} = 0,88 \text{ м/с},$$

- число Рейнольдса в устьевом участке

$$\operatorname{Re} = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{0,88 \cdot 0,05}{0,0131 \cdot 10^{-4}} = 33\,588.$$

Тогда на этом участке [15]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \lg \left(\frac{\Delta}{13,68 \cdot R} + \frac{d_2}{\operatorname{Re}} \right) = -2 \cdot \lg \left(\frac{0,06}{13,68 \cdot 1,25} + \frac{20}{33\,588} \right),$$

откуда $\lambda = 0,044$. Таким образом, $\lambda_{\text{ср}} = 0,045$, т. е. соответствует принятому в расчетах значению.

Для определения L_2 поступаем так же, как и при нахождении L_1 , не забывая, что при расчете правой части дрены с обратным уклоном дна ($i < 0$) в формулах, содержащих уклон дна, знак пе-

ред i меняется на противоположный. При этом величина b_e остается без изменения, а все остальные параметры пересчитываются заново, так как изменяются q_1 и q_2 .

В результате расчета для правой части дрены получаем

$$q_1 = 0,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}, \quad q_2 = 0,61 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}, \quad L_2 = 21,8 \text{ м}.$$

Таким образом, расстояние между коллекторами равно $L = L_1 + L_2 = 49,8 \text{ м}$.

Заключение

Бесполостные дрены по сравнению с трубчатыми обладают более высокой водозахватной способностью, что очень важно при осушении слабоводопроницаемых грунтов, но уступают трубчатым дренам по отводящей способности. Водоотводящая способность бесполостных дренажей может быть существенно увеличена путем введения в них дренажной трубы.

Установлено, что за исключением небольшого начального участка в бесполостной части дрены имеет место переходный режим движения воды, а в трубчатой – турбулентный режим, включающий все три области гидравлического сопротивления. При этом напорные линии совпадают, так как скорости перетекания из бесполостной части дрены в трубчатую составляют менее 0,1 м/с и местными потерями напора на отверстиях трубы можно пренебречь.

В результате совместного решения двух дифференциальных уравнений, описывающих движение воды в бесполостной и трубчатой частях дрены, получены расчетные зависимости, позволяющие определить расстояние между коллекторами при двухстороннем впадении в них дрена, глубины воды в бесполостной дрине, а также удельные приточности к дренам. Порядок расчета рассмотрен на примере.

Библиографический список

1. Избаш С. В. Вопросы турбулентной фильтрации в наброске / С. В. Избаш, Н. М. Леляева // Гидротехническое строительство. – 1971. – № 5. – С. 39–41.
2. Antohe B. V. A general two-equation macroscopic turbulence model for incompressible flow in porous media / B. V. Antohe, J. L. Lage // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1997. – N 40 (13). – P. 3013–3024.
3. Kuwahara F. Numerical modeling of turbulent flow in porous media using a spatially periodic array / F. Kuwahara, Y. Kameyama, S. Yamashita, A. Nakayama // Journal of Porous Media. – 1998. – Vol. 1 (1). – P. 47–55. DOI: 10.1615/JPorMedia.v1.i1.40
4. Pauthenet M. Inertial sensitivity of porous microstructures / M. Pauthenet, Y. Davit, M. Quintard, A. Bottaro // Transport in Porous Media. – 2018. – Vol. 125 (2). – P. 211–238.
5. Yao-hui C. H. Research of durability of filtering concrete-filled steel tube with formwork / C. H. Yao-hui // Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition). – 2009. – Vol. 6. – P. 21.
6. Bonicelli A. Experimental study on the effects fine sand addition on differentially compacted pervious concrete / A. Bonicelli, F. Giustozzi, M. Crispino // Construction and Building Materials. – 2015. – Vol. 91. – P. 102–110.
7. Арын Б. А. Обоснование применения пористого бетона в качестве основания и дренажа сооружений / Б. А. Арын // Изв. ВНИИГ им Б. Е. Веденеева. – 2016. – Т. 281. – С. 101–108.
8. Штыков В. И. Бесполостный дренаж периодического профиля / В. И. Штыков, Ю. Г. Янко // Мелиорация и водное хозяйство. – 2009. – № 4. – С. 35–37.
9. Штыков В. И. Гидравлический расчет бесполостного дренажа при грунтовом напорном пита-

нии / В. И. Штыков, А. В. Козлова // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2007. – Т. 247. – С. 84–90.

10. Соколовский И. К. Укрепления балластного слоя геоматериалами на участках с тяжеловесным движением поездов / И. К. Соколовский // Вестн. современных исследований. – 2019. – № 2.18 (29). – С. 69–71.

11. Скутин А. И. Повышение устойчивости земляного полотна с помощью армирования геосинтетическими материалами / А. И. Скутин, Д. А. Скутин, О. Л. Скутина, А. И. Табынщиков // Проектирование развития региональной сети железных дорог. – 2016. – № 4. – С. 351–354.

12. Brown S. F. Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast / S. F. Brown, J. Kwan, N. H. Thoma // Geotextiles and Geomembranes. – 2007. – Vol. 25 (6). – P. 326–352.

13. Ibrahim S. F. Reinforcement effect of geogrid in ballast and sub-ballast of the railway track / S. F. Ibrahim, A. J. Kadhim, H. B. Khalaf // International Journal of Geomate. – 2018. – Vol. 15 (48). – P. 22–27.

14. Блажко Л. С. Техничко-экономическая оценка воздействия вагонов с повышенной осевой нагрузкой на железнодорожный путь / Л. С. Блажко, Е. В. Черняев, В. Б. Захаров, А. В. Романов, В. В. Соловьев // Конструкция и техническое обслуживание железнодорожного пути при организации тяжеловесного движения поездов : сб. трудов науч.-практич. семинара. – СПб. : ПГУПС, 2017. – С. 3–9.

15. Захаров В. Б. К вопросу о выборе оптимальной конструкции железнодорожного пути для реализации скорости 400 км/ч в России / В. Б. Захаров, Е. В. Черняев // Вестн. Ин-та проблем естественных монополий. Техника железных дорог. – 2017. – № 3 (39). – С. 24–30.

16. Бушуев Н. С. Особенности проектирования трассы железной дороги в условиях вечной мерзлоты / Н. С. Бушуев, С. В. Шкурников, В. А. Герасимов, В. А. Голубцов, О. С. Морозова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск : ИрГУПС, 2019. – Т. 63. – № 3. – С. 135–142.

17. Русанова Е. В. Геоэкозащитные строительные конструкции / Е. В. Русанова, М. С. Абу-Хасан // Августин Бетанкур : от традиций к будущему инженерного образования : материалы Междунар. науч.-практич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2018. – С. 167–170.

18. Штыков В. И. Гидравлический расчет бесполостных дрена трапецидального поперечного сечения, закладываемых с уклоном / В. И. Штыков // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2014. – Т. 274. – С. 14–22.

19. Штыков В. И. Гидравлический расчет бесполостных дрена треугольного поперечного сечения при переходном режиме / В. И. Штыков, А. Б. Пономарев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2019. – Т. 16. – Вып. 3. – С. 523–532. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-523-532

20. Штыков В. И. Гидравлический расчет бесполостной дрена, усиленной дренажной трубой, заложеной с уклоном / В. И. Штыков, Е. В. Булганин, Б. А. Арын // Научная жизнь. – 2017. – № 11. – С. 26–40.

Дата поступления: 17.01.2020

Решение о публикации: 07.02.2020

Контактная информация:

ШТЫКОВ Валерий Иванович – д-р техн. наук, профессор; shtykov41@mail.ru

ПОНОМАРЕВ Андрей Борисович – канд. техн. наук, доцент; pol1nom@yandex.ru

Hydraulic calculation of triangular-profile non-cavity drains reinforced by water drain pipe

V. I. Shtykov, A. B. Ponomarev

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

For citation: Shtykov V. I., Ponomarev A. B. Hydraulic calculation of triangular-profile non-cavity drains reinforced by water drain pipe. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 1, pp. 144–156. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-1-144-156

Summary

Objective: Develop a method for calculation of triangular-profile non-cavity drains reinforced by water drain pipe in case of two-way discharging into a collector drain. **Methods:** Non-cavity drains, compared to drainage pipes, have higher water procuring capability but have lower diversion capacity. Water-diversion capacity of non-cavity drains can be increased by introducing a water drain pipe in them. Practically throughout the length of non-cavity section of the drain transient water movement occurs, and turbulent flow occurs in the pipe section. Differential equation for filtration in non-cavity section of the drain is solved by approximation method. Differential equation for fluid movement is also solved for the pipe section which is set at a slant and has two-way discharges to the collector drain. **Results:** As a result of coordinated solution of two differential equations describing water movement in non-cavity and pipe section of the drain, calculation dependencies allowing calculating drain parameters were obtained. An example of calculation is provided. **Practical importance:** This calculation method allows calculating the design proposed. Previously, the literature did not have a method for this case.

Keywords: Non-cavity draining, pipe draining, triangular cross-section, hydraulic calculation, transient movement regime.

References

1. Izbash S. V. & Lelyaeva N. M. Voprosy turbulentnoi fil'tratsii v nabroske [The problems of turbulent filtration in draft]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]*, 1971, no. 5, pp. 39–41. (In Russian)
2. Antohe B. V. & Lage J. L. A general two-equation macroscopic turbulence model for incompressible flow in porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, no. 40 (13), pp. 3013–3024.
3. Kuwahara F., Kameyama Y., Yamashita S. & Nakayama A. Numerical modeling of turbulent flow in porous media using a spatially periodic array. *Journal of Porous Media*, 1998, vol. 1 (1), pp. 47–55. DOI: 10.1615/JPorMedia.v1.i1.40
4. Pauthenet M., Davit Y., Quintard M. & Bottaro A. Inertial sensitivity of porous microstructures. *Transport in Porous Media*, 2018, vol. 125 (2), pp. 211–238.
5. Yao-hui C. H. Research of durability of filtering concrete-filled steel tube with formwork. *Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)*, 2009, vol. 6, p. 21.
6. Bonicelli A., Giustozzi F. & Crispino M. Experimental study on the effects fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 91, pp. 102–110.
7. Aryn B. A. Obosnovanie primeneniia poristogo betona v kachestve osnovaniia i drenazha sooruzhenii [Justification for using porous concrete as foundation and drainage of structures]. *Izvestiia VNIIG im. B. E. Ve-*

deneeva [Proceedings of the Vedeneev VNIIG], 2016, vol. 281, pp. 101–108. (In Russian)

8. Shtykov V.I. & Ianko Iu. G. Bepolostnyi drenazh periodicheskogo profil'ia [Non-cavity deformed-bar draining]. *Melioratsiia i vodnoe khoziaistvo* [Irrigation engineering and water management], 2009, no. 4, pp. 35–37. (In Russian)

9. Shtykov V.I. & Kozlova A. V. Gidravlicheskii raschet bespolostnogo drenazha pri gruntovom napornom pitanii [Hydraulic calculation of non-cavity drainage in case of ground-water pressure feed]. *Izvestiia VNIIG im. B. E. Vedeneeva* [Proceedings of the Vedeneev VNIIG], 2007, vol. 247, pp. 84–90. (In Russian)

10. Sokolovskii I. K. Ukrepleniia ballastnogo sloia geomaterialami na uchastkakh s tiazhelovesnym dvizheniem poezdov [Strengthening of ballast layer by geomaterial at sections with heavy train movement]. *Vestnik sovremennykh issledovaniy* [Modern research herald], 2019, no. 2.18 (29), pp. 69–71. (In Russian)

11. Skutin A. I., Skutin D. A., Skutina O. L. & Tabynshchikov A. I. Povyshenie ustoychivosti zemliannogo polotna s pomoshch'iu armirovaniia geosinteticheskimi materialami [Increasing stability of earth work by reinforcing with geosynthetic materials]. *Proektirovanie razvitiia regional'noi seti zheleznykh dorog* [Designing development of regional railway network], 2016, no. 4, pp. 351–354. (In Russian)

12. Brown S. F., Kwan J. & Thoma N. H. Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, vol. 25 (6), pp. 326–352.

13. Ibrahim S. F., Kadhim A. J. & Khalaf H. B. Reinforcement effect of geogrid in ballast and sub-ballast of the railway track. *International Journal of Geomate*, 2018, vol. 15 (48), pp. 22–27.

14. Blazhko L. S., Cherniaev E. V., Zakharov V. B., Romanov A. V. & Solov'ev V. V. Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka vozdetsviia vagonov s povyshennoi osevoi nagruzkoi na zheleznodorozhnyi put' [Technical and economic assessment of impact of wagons with increased axial loading on railway track]. *Konstruktsiia i tekhnicheskoe obsluzhivanie zheleznodorozhnogo puti pri organizatsii tiazhelovesnogo dvizheniia poezdov*. Sbornik trudov nauchno-prakticheskogo seminar [Design and technical maintenance of railway track in organization of heavy train movement. Coll. papers of scientific and

practical seminar]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, pp. 3–9. (In Russian)

15. Zakharov V. B. & Cherniaev E. V. K voprosu o vybere optimal'noi konstruktsii zheleznodorozhnogo puti dlia realizatsii skorosti 400 km/ch v Rossii [On selecting the optimum design for railway track to implement the 400 km/h speed in Russia]. *Vestnik instituta problem estestvennykh monopolii. Tekhnika zheleznykh dorog* [Herald of the Institute of Natural Monopolies' Problems. Railway equipment], 2017, no. 3, pp. 24–30. (In Russian)

16. Bushuev N. S., Shkurnikov S. V., Gerasimov V. A., Golubtsov V. A. & Morozova O. S. Osobennosti proektirovaniia trassy zheleznoi dorogi v usloviakh vechnoi merzloty [Specific features of designing railway track under permafrost conditions]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modelling]. Irkutsk, IrGUPS [Irkutsk State Transport University] Publ., 2019, vol. 63, no. 3, pp. 135–142. (In Russian)

17. Rusanova E. V. & Abu-Khasan M. S. Geoekozashchitnye stroitel'nye konstruktsii [Geocoprotective engineering structures]. *Avustin Betankur: ot traditsii k budushchemu inzhenernogo obrazovaniia. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Agustin de Betancourt: from traditions to the future of engineering education. Proceedings of International scientific and practical conference]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, pp. 167–170. (In Russian)

18. Shtykov V. I. Gidravlicheskii raschet bespolostnykh dren trapetseidal'nogo poperechnogo secheniia, zakladyvaemykh s uklonom [Hydraulic calculation of non-cavity trapezoid cross-section drains set at a slant]. *Izvestiia VNIIG im. B. E. Vedeneeva* [Proceedings of the Vedeneev VNIIG], 2014, vol. 274, pp. 14–22. (In Russian)

19. Shtykov V. I. & Ponomarev A. B. Gidravlicheskii raschet bespolostnykh dren treugol'nogo poperechnogo secheniia pri perekhodnom rezhime [Hydraulic calculation of non-cavity triangular cross-section drains in transient regime]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [Proceedings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, vol. 16, iss. 3,

pp. 523–532. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-523-532 (In Russian)

20. Shtykov V.I., Bulganin E.V. & Aryn B.A. Gidravlicheskiy raschet bespolostnoi dreny, usilennoi drenazhnoi truboi [Hydraulic calculation of a non-cavity drain reinforced by drain pipe set at a slant]. *Nauchnaya zhizn'* [Scientific life], 2017, no. 11, pp. 26–40. (In Russian)

Received: January 17, 2020

Accepted: February 07, 2020

Author's information:

Valerii I. SHTYKOV – D. Sci. in Engineering, Professor; shtykov41@mail.ru

Andrei B. PONOMAREV – PhD in Engineering, Associate Professor; pol1nom@yandex.ru