

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 17, выпуск 4, 2020

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Учредитель

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

Издатель

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

Адрес учредителя

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

Адрес издателя

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

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

Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

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

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется

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

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

А. К. Канаев, д-р техн. наук, доцент

Научный редактор

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

Выпускающий редактор

Э. А. Горелик

Перевод на английский язык

Д. И. Иванов, У. Л. Романова

Верстка

А. А. Стуканова

Редактор

В. Е. Филиппова

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

Ситаж Марек, профессор, Силезский технический
университет, Польша

Христов Христо, профессор, Технический университет,
София, Болгария

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Сапожников Валерий Владимирович, д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель редколлегии
Бадёр Михаил Петрович, д-р техн. наук, профессор, МГУПС
(МИИТ), Москва, Россия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Титова Тамара 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 15.12.2020.

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

Усл. печ. л. 21,75. Уч.-изд. л. 9,5625. Установочный тираж 300 экз.

Заказ . Цена свободная.

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

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY, volume 17, issue 4, 2020

ISSN (Print) 1815-588X

ISSN (Online) 2658-6851

Founder

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

Publisher

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

Founder's address

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

Publisher's address

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

Mass media registration certificate number

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

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

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

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

The journal has the Peer-review division

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

JOURNAL STAFF

Editor-in-chief

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

Deputy chief editor

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

Science editor

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

Executive editor

E. Gorelik

English translation

D. Ivanov, U. Romanova

Layout

A. Stukanova

Editor

V. Philippova

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

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

© Petersburg State Transport University, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

М. Ю. Обухов, Н. П. Калинин

Повышение энергоэффективности электропоезда за счет установки накопителей электрической энергии 449

Г. О. Панов, С. М. Толстов, Л. В. Цыганская, И. О. Морозова

Особенности проектирования и испытаний сменных кузовов 465

А. В. Песляк, Н. А. Битюцкий, М. Н. Сувернев, А. Н. Фомин

Повышение универсальности вагонов-цистерн для перевозки нефтехимических грузов 477

И. В. Федоров, А. А. Воробьев, О. А. Конограй

Модернизация осей типа РУ1 с целью обеспечения их дальнейшего использования 490

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

Ю. П. Бороненко, Б. А. Абдуллаев

Экспериментальные исследования новых конструктивных решений ограждения кузовов рефрижераторных вагонов и контейнеров 498

А. В. Грищенко, О. Р. Хамидов

Мониторинг и диагностика технического состояния асинхронного тягового электродвигателя локомотивов с применением искусственных нейронных сетей на железных дорогах Республики Узбекистан 514

Д. И. Загорский, М. Г. Мяделец

Сравнительная оценка динамической нагруженности длиннобазных вагонов-платформ 525

А. Н. Марикин, В. А. Мирощенко

Исследование энергетических характеристик устройства компенсации реактивной мощности с регулируемой индуктивностью в электротяговой сети на экспериментальной установке 534

Г. И. Никифорова

Построение дескриптивной модели логистической цепи доставки грузов при взаимодействии железнодорожного и морского транспорта 545

П. А. Плеханов

Обеспечение комплексной безопасности на железнодорожном транспорте в контексте стратегического развития 552

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. И. Хисматулин**

Электромеханическая система отопления пассажирского вагона 566

В. И. Смирнов, С. А. Видюшенков

О равновесном уклоне станционного профиля 575

Чжуншэн Тан

Сравнительный анализ законодательства в области охраны труда в России и Китае 583

CONTENTS

→ PROBLEMATIC OF TRANSPORT SYSTEM

M. Yu. Obukhov, N. P. Kalinin

Increasing the energy efficiency of an electric train by installing electric energy storage units 449

G. O. Panov, S. M. Tolstov, L. V. Tsyganskaia, I. O. Morozova

Specific features of designing and testing interchangeable bodies 465

A. V. Pesliak, N. A. Bitiutskii, M. N. Suvernev, A. N. Fomin

Increasing universality of tank wagons designed to transport petrochemical cargoes 477

I. V. Fedorov, A. A. Vorob'ev, O. A. Konograi

Modernisation of type RU1 axles with the objective of assuring their further use 490

→ HIGH TECHNOLOGIES FOR TRANSPORT

Yu. P. Boronenko, B. A. Abdullaev

Experimental studies of new design solutions for the fencing of refrigerated car and container bodies 498

A. V. Grishchenko, O. R. Khamidov

Monitoring and diagnostics of the technical condition of the asynchronous traction motor of locomotives using artificial neural networks on the railways of the Republic of Uzbekistan 514

D. I. Zagorsky, M. G. Myadelets

Comparative assessment of dynamic loading long-base flat wagons 525

A. N. Marikin, V. A. Miroshchenko

Investigation of the energy characteristics of a reactive power compensating device with adjustable inductance in an electric traction network on an experimental setup 534

G. I. Nikiforova

Construction of a descriptive model of the logistics chain for the delivery of goods in the interaction of rail and sea transport 545

P. A. Plekhanov

Ensuring integrated safety in railway transport in the context of strategic development 552

→ GENERAL TECHNICAL PROBLEMS AND SOLUTION APPROACH**K. K. Kim, S. N. Ivanov, M. I. Khismatulin**

Electromechanical heating system for a passenger car 566

V. I. Smirnov, S. A. Vidiushenkov

On equilibrium slope of station gradient 575

Zhongsheng Tan

Comparative analysis of legislation in the field of labor protection in Russia and China 583



УДК 629.01:629.03

Повышение энергоэффективности электропоезда за счет установки накопителей электрической энергии

М. Ю. Обухов, Н. П. Калинин

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

Для цитирования: Обухов М. Ю., Калинин Н. П. Повышение энергоэффективности электропоезда за счет установки накопителей электрической энергии // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 449–464.
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-449-464

Аннотация

Цель: Повышение энергетической эффективности российского моторвагонного подвижного состава железных дорог путем установки накопителей электрической энергии. **Методы:** Цель достигается методом комплексного подхода к проблеме энергетической эффективности моторвагонного подвижного состава, ориентированного на практическую значимость и экономическую обоснованность результатов. **Результаты:** Разработанные решения могут служить базовой концепцией для модернизации отечественного подвижного состава. **Практическая значимость:** На базе российских электропоездов разработаны концепции совершенствования конструкции электропоезда с накопителями электрической энергии, с целью повышения этой энергии.

Ключевые слова: Энергоэффективность, электропоезда, накопители энергии, гибридный моторвагонный подвижной состав.

Введение

В настоящее время развитие технологий и необходимость повышения экологичности транспорта ставят перед инженерами задачу создания энергоэффективных и экологичных вариантов электроподвижного состава (ЭПС), способных двигаться без контактной сети. К возможным вариантам решения подобной задачи относится установка накопителей электрической энергии на электропоезде, что дает ему возможность на некоторый промежуток своего маршрута обхо-

диться без питания от контактной сети и, таким образом, стать полуавтономным [1].

Установка накопителей энергии на ЭПС для ее использования при трогании и разгоне уже применяется за рубежом [2–4]. На железных дорогах стран Европы и Китая широко ведутся работы по разработке и внедрению ЭПС, который не нуждается в контактной сети и токосъемных устройствах, что снижает затраты на электрификацию и позволяет использовать ЭПС даже в районах, где электрификация невозможна [5, 6].

Описание сути концепции

Одним из возможных технических решений, благодаря которым электропоезд получает возможность автономного хода, является размещение на электросекции дополнительных тяговых аккумуляторных батарей [2]. Подобное решение с 1957 по 1981 г. применялось на Прибалтийской железной дороге МПС СССР. Специально для этого научно-исследовательским бюро электрического подвижного состава ЛИИЖТа совместно с конструкторами Рижского вагоностроительного и Рижского электромашиностроительного заводов был разработан и реализован проект оборудования некоторых опытных секций электропоездов серии Ср3 аккумуляторными батареями ТЖН-250 (позднее ТЖН-350) [7, 8]. Вес секции по сравнению со стандартным серийным электропоездом увеличился на 40 т и был равен 182,6 т, из которых 32 т составили аккумуляторные батареи. Запас энергии в аккумуляторной батарее был 475 кВт·ч, напряжение 2200 В, что на тот момент было вполне достаточно [9, 10].

В настоящее время условия и развитие техники требует схожих технических решений, но применяемых на современном ЭПС. Началом, как и в 1950-е годы, послужила потребность в перевозках пассажиров на участках, не имеющих контактной сети. Один из таких участков протяженностью 100 км входит в маршрут Санкт-Петербург–Финляндский–Приморск–Выборг–Пассажирский (общая протяженность 168 км), на котором целесообразна эксплуатация полуавтономного подвижного состава. В связи с широкой распространенностью неавтономный МВПС серии ЭД4М является наиболее оптимальным для создания на его основе полуавтономного варианта, однако требуется определить необходимую для эксплуатации на данном участке емкость накопителей электрической энергии, исходя из расхода этой энергии и ее возможной отдачи в накопитель при рекуперативном торможении [11–14].

Схемотехника гибридного моторвагонного подвижного состава с накопителем энергии

предполагает наличие тягово-зарядного преобразователя, состоящего из полупроводниковых приборов, выбор которых обосновывается техническими требованиями [5, 11].

Изучение возможности разгона от накопителя гибридного моторвагонного подвижного состава

С целью изучения возможности разгона подвижного состава от накопителей энергии необходимы расчет и моделирование тягового привода электросекции, подключенной к тяговой аккумуляторной батарее [6–20].

Моделирование произведено при питании тяговых электродвигателей МВПС от аккумуляторной батареи, разрядные характеристики и параметры которой приведены на рис. 1, 2.

Для исследования процесса возможности разгона электропоезда с использованием накопителей энергии в среде Matlab разработана модель (рис. 3).

Конструкционные постоянные ТЭД типа 1ДТ-003 вычисляются по формулам

$$C = \frac{pN}{2\pi a} = \frac{2 \cdot 644}{2 \cdot \pi \cdot 2} = 102,5,$$

$$C_n = C \cdot \frac{\pi}{30} = 102,5 \cdot \frac{\pi}{30} = 10,73 \text{ (1/(об/мин)·с)}.$$

Здесь a – число параллельных ветвей обмотки якоря, $a = 2$; p – число пар полюсов ТЭД, $p = 2$; N – число активных проводников обмотки якоря, $N = 644$.

Параметры обмоток ТЭД:

- активное сопротивление обмотки якоря (модель представлена на рис. 4, а) – $r_{\text{я}} = 0,1611 \text{ Ом}$;
- активное сопротивление обмотки главных полюсов (эту модель см. на рис. 4, б) – $r_{\text{гп}} = 0,2831 \text{ Ом}$;
- активное сопротивление обмотки добавочных полюсов – $r_{\text{дпо}} = 0,034 \text{ Ом}$;

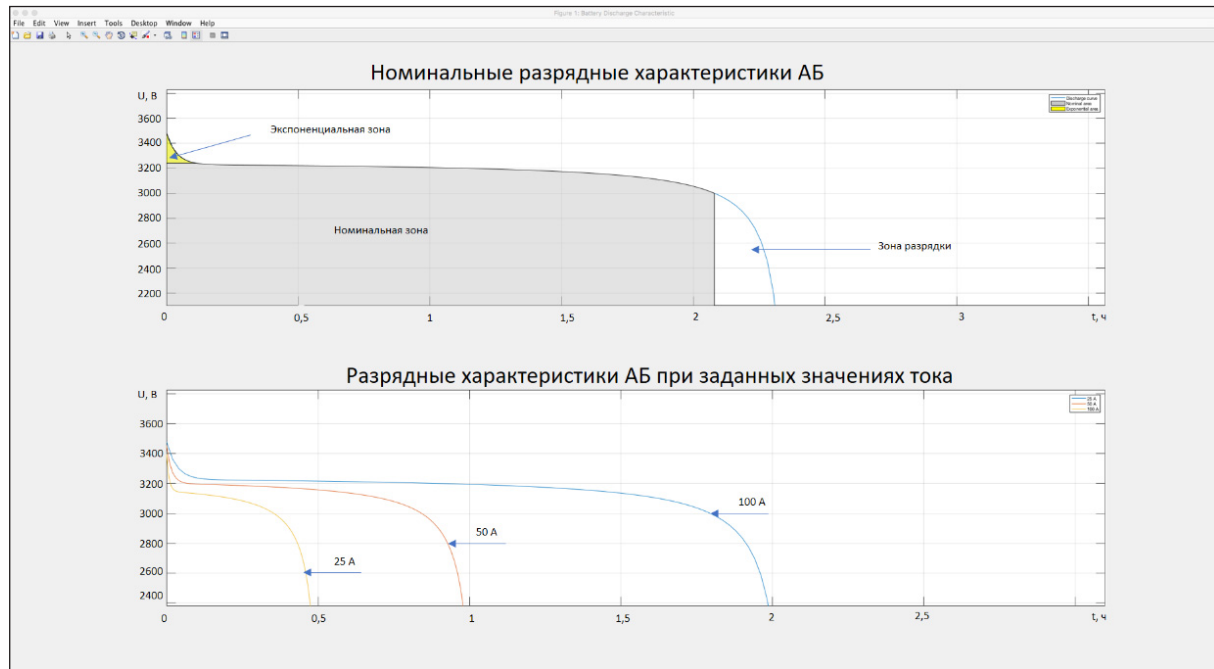


Рис. 1. Разрядные характеристики аккумуляторной батареи (АБ)

– индуктивное сопротивление обмотки до-
бавочных полюсов – $L_{\text{дп}} = 1$ мГн;

– индуктивное сопротивление обмотки яко-
ря – $L_{\text{я}} = 14$ мГн.

Определим номинальный магнитный поток
(в Вб):

$$\Phi_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} - (r_{\text{я}} + r_{\text{дпко}} + r_{\text{гп}}) \cdot I_{\text{я}}}{C_{\text{н}} \cdot n_{\text{н}}} =$$

$$= \frac{1500 - (0,1611 + 0,2831 + 0,034) \cdot 190}{10,73 \cdot 1270} =$$

$$= 0,1034,$$

где $n_{\text{н}}$ – номинальная частота двигателя, $n_{\text{н}} = 1270$ об/мин; $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение ТЭД, $U_{\text{н}} = 1500$ В; $I_{\text{н}}$ – номинальный ток двигателя, $I_{\text{н}} = 190$ А.

Момент инерции на валу ТЭД получим по формуле (в кН·м²):

$$\Phi_{\text{н}} = \frac{9,81 \cdot (1 + \gamma) \cdot G \cdot D_{\text{к}}^2}{4 \cdot N_{\text{д}} \cdot \mu^2} =$$

$$= \frac{9,81 \cdot (1 + 0,07) \cdot 122 \cdot 1,05^2}{4 \cdot 4 \cdot 3,41^2} = 7,59,$$

где γ – коэффициент инерции вращающихся ча-
стей. Принято, что $1 + \gamma = 1,07$; суммарная мас-
са моторного вагона, прицепных и масса пас-
сажиров в трех вагонах $G = 209$ т; $D_{\text{к}}$ – диаметр
колесной пары, $D_{\text{к}} = 1050$ мм, $N_{\text{д}}$ – количество
ТЭД моторного вагона $N_{\text{д}} = 4$, μ – передаточное
число редуктора, $\mu = 3,41$.

Для расчета сопротивления движению элект-
ропоезда, отнесенного к валу ТЭД, введено по-
нятие постоянной составляющей момента со-
противления на валу (в кН·м):

$$M_{\text{сп}} = 1,9 \cdot \frac{9,81 \cdot G \cdot D_{\text{к}}}{2 \cdot N_{\text{д}} \cdot \mu} =$$

$$= 1,9 \cdot \frac{9,81 \cdot 209 \cdot 1,05}{2 \cdot 4 \cdot 3,41} = 149,94.$$

Рассчитаем магнитный поток ТЭД:

$$C\Phi = 0,83 \cdot C\Phi_{\text{н}} \cdot \arctg\left(\frac{2,6 \cdot I_{\text{в}}}{I_{\text{н}}}\right),$$

где $\Phi_{\text{н}}$ – номинальный магнитный поток; $I_{\text{в}}$ –
ток возбуждения.

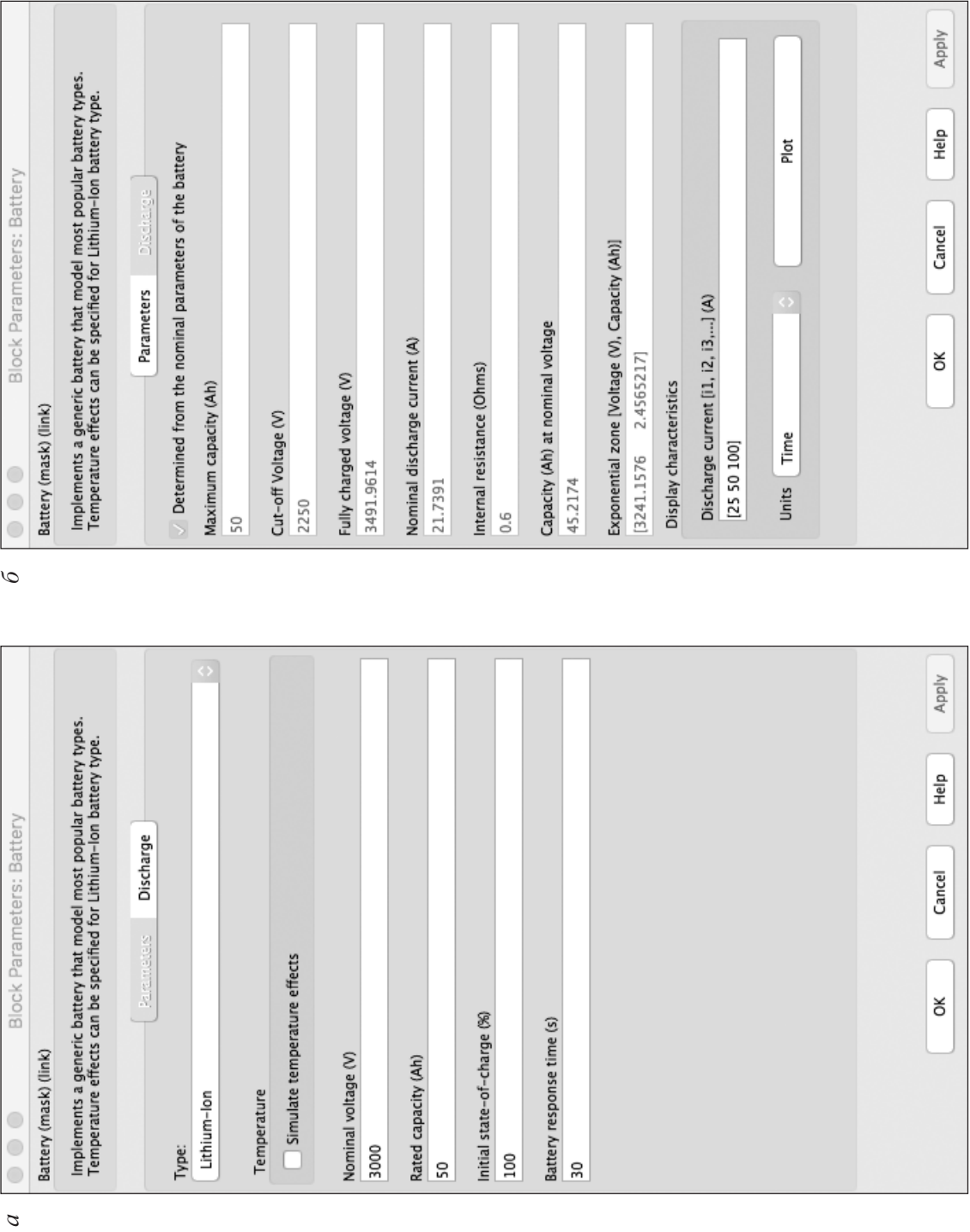


Рис. 2. Параметры модели АБ:
а – разрядные характеристики батареи; б – разрядные характеристики батареи при заданных значениях тока

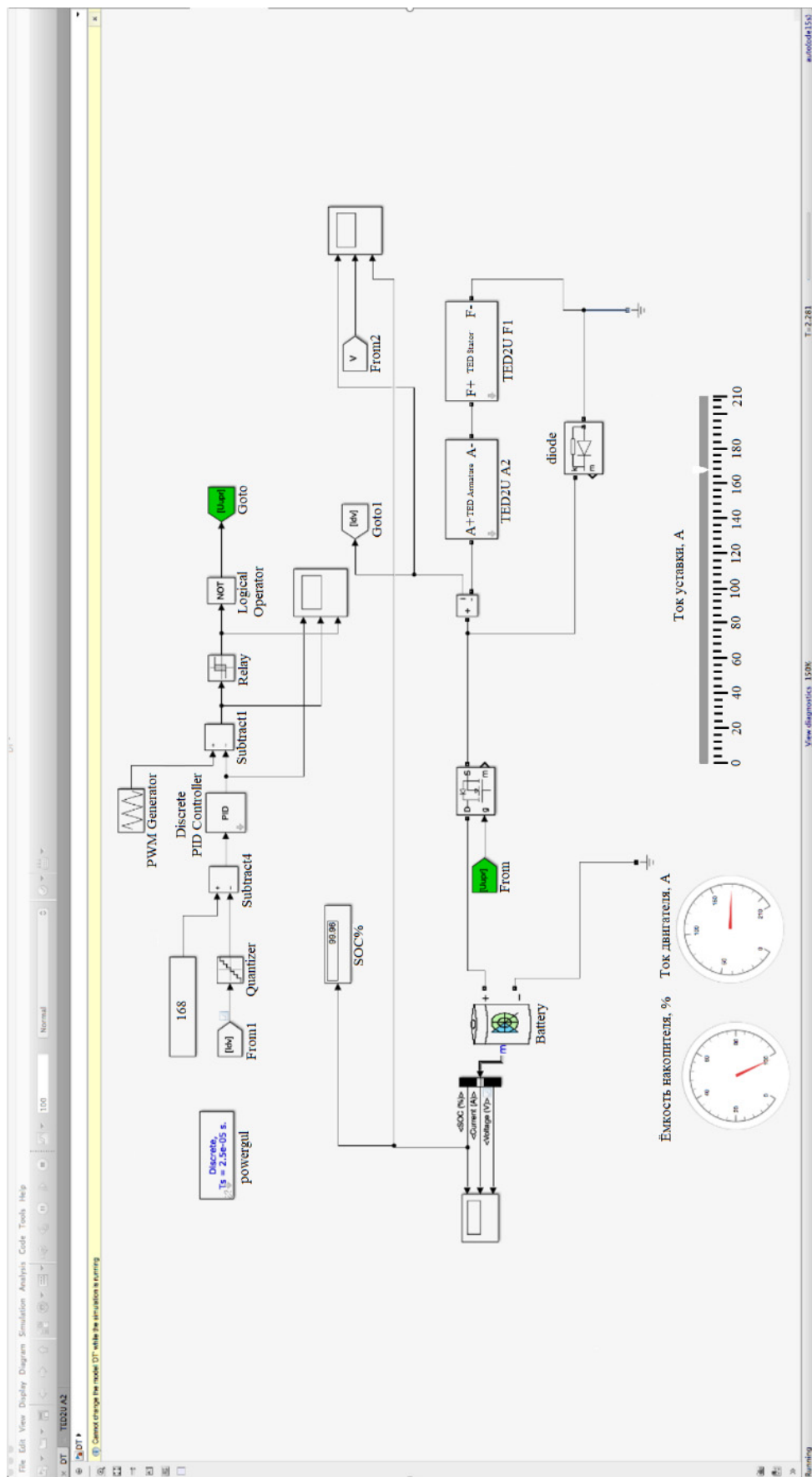
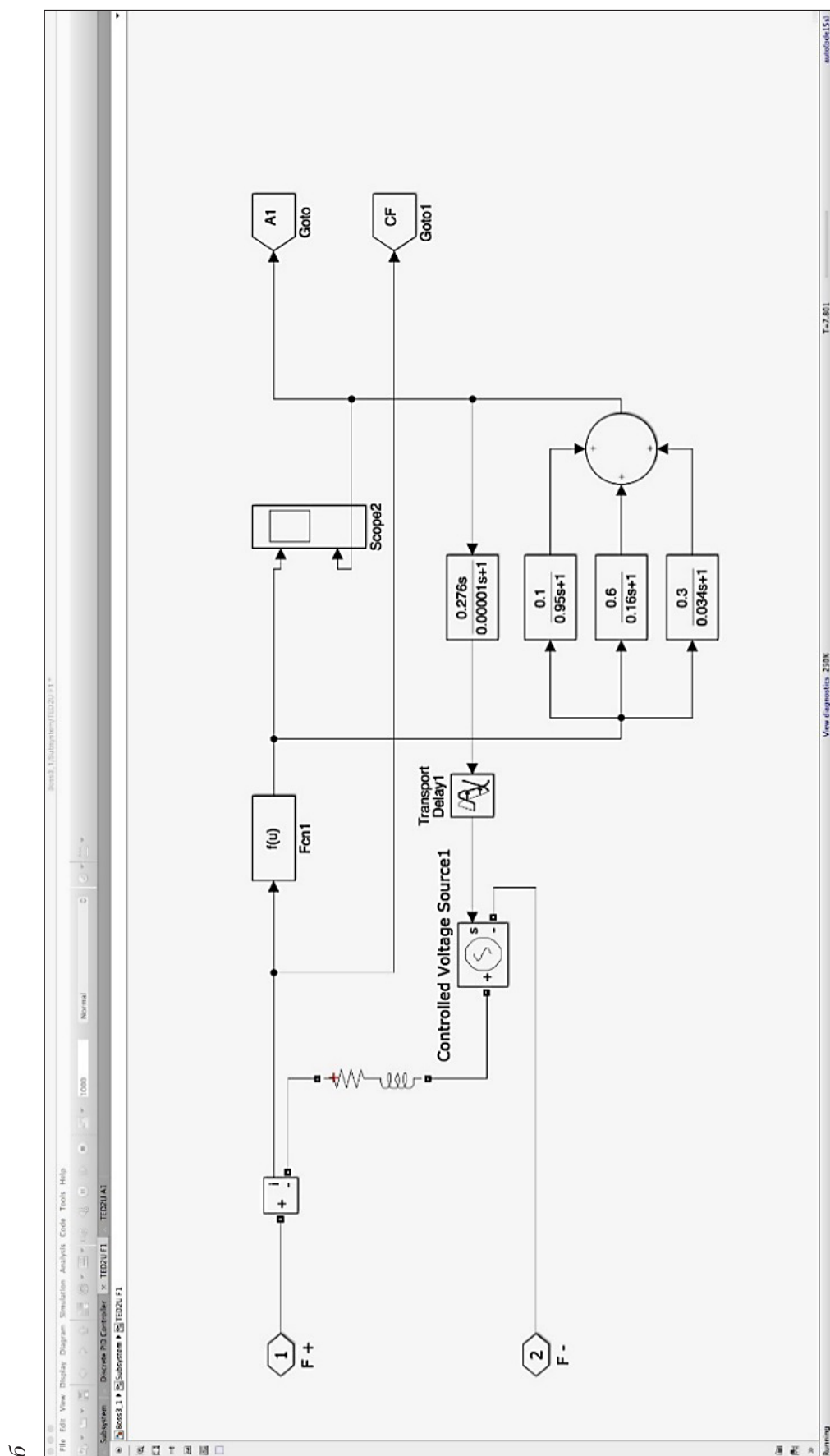


Рис. 3. Модель тягового привода электропоезда с накопителями энергии





Переведем угловую скорость в линейную:

$$\frac{D_k \cdot 3,6}{2 \cdot \mu} = \frac{1,05 \cdot 3,6}{2 \cdot 3,41} = 0,554.$$

Найдем коэффициент усиления дифференцирующего звена, отображающего э. д. с. в обмотке возбуждения индуктивности рассеяния:

$$K_w = \frac{2 \cdot p \cdot W_b}{C} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 58}{102,5} = 2,26,$$

здесь число активных витков $W_b = 58$.

Результаты моделирования показывают возможность воплощения концепции, а также то, что АБ как тяговый источник эффективно обеспечивает питание силовых цепей и разгон электропоезда, как показано на рис. 5.

Определение параметров энергопотребления электропоезда

Для определения параметров энергопотребления в программной среде КОРТЭС было смоделировано движение по маршруту Санкт-Петербург-Финляндский-Приморск-Выборг-

Пассажирский электропоезда постоянного тока наиболее распространенной серии ЭД4М (примеры расчета для участка Ермилово-Попово для движения в нечетном направлении приведены на рис. 6, результаты моделирования – в таблице).

Данные таблицы позволяют оценить расход электроэнергии на тягу (с учетом собственных нужд) при движении пятисекционного электропоезда серии ЭД4М по маршруту Санкт-Петербург-Финляндский-Приморск-Выборг-Пассажирский. Наибольший интерес представляют участки Зеленогорск-Ермилово и Ермилово-Попово, так как сейчас они неэлектрифицированы. Исходя из данных таблицы, можно определить необходимую емкость накопителя электрической энергии, которая с учетом запаса 30% для одной секции составляет 350 кВт·ч.

Выбор полупроводниковых элементов для тягового преобразователя гибридного моторвагонного подвижного состава с накопителями электрической энергии

Выбор полупроводниковых элементов для тягового преобразователя гибридного моторвагон-

Расчетные энергетические показатели для базовой модели ЭД4М из библиотеки локомотивов программной среды КОРТЭС

Участок движения	Энергетические показатели для состава ЭД4М			
	четного поезда		нечетного поезда	
	Расход, кВт·ч	Рекуперация, кВт·ч	Расход, кВт·ч	Рекуперация, кВт·ч
Санкт-Петербург-Финляндский-Зеленогорск (пригородный)	945,1	293,0	1079,8	368,6
Санкт-Петербург-Финляндский-Зеленогорск (экспресс)	584,9	3,7	542,7	68,8
Зеленогорск-Ермилово	950,9	178,6	1004,7	262,1
Ермилово-Попово	653,0	124,7	612,8	180,1
Попово-Выборг-Пассажирский	273,3	75,0	249,3	29,4
Итого (без учета Санкт-Петербург-Финляндский-Зеленогорск (пригородный))	2462,1	382,0	2409,5	540,4

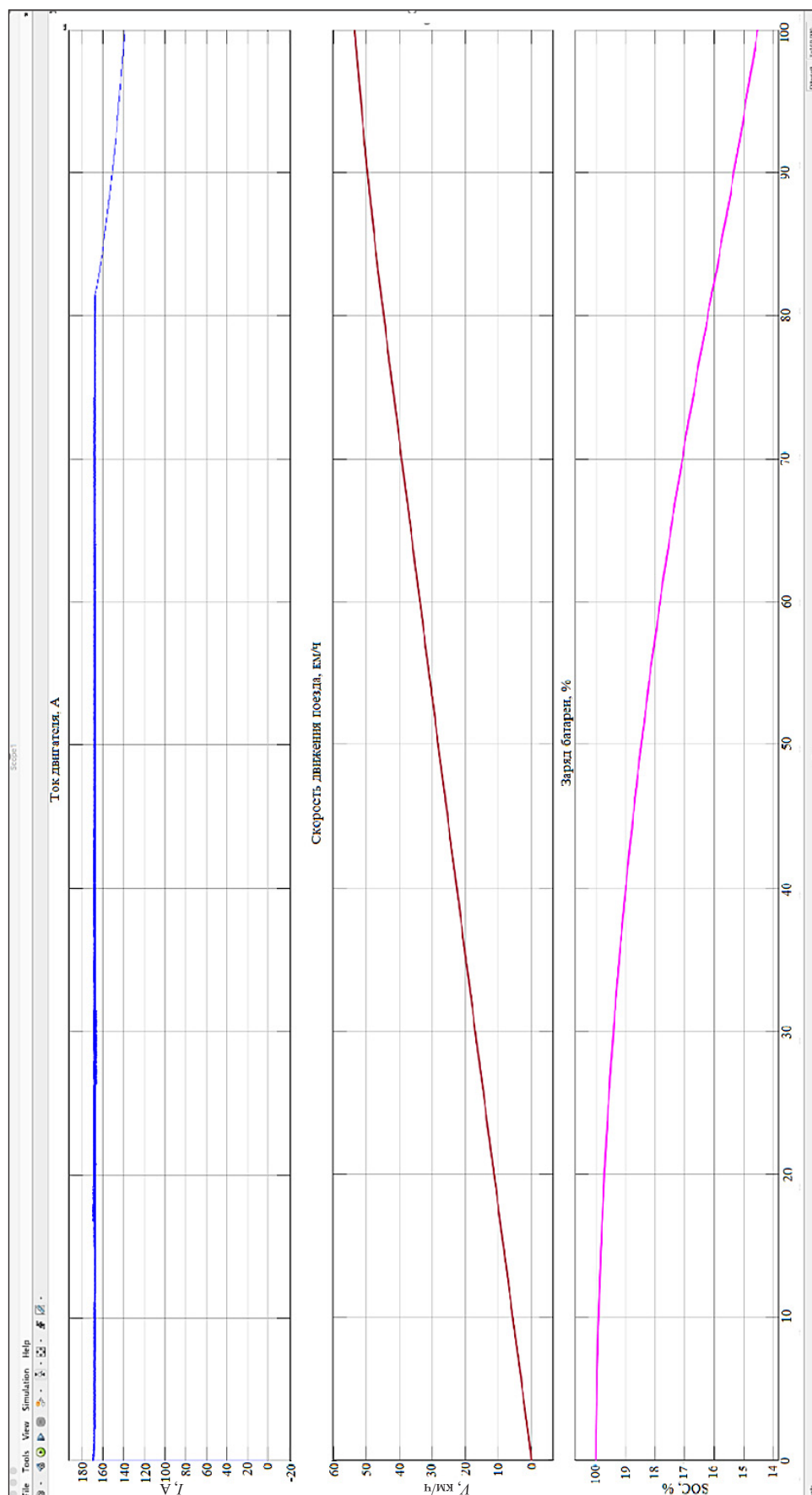


Рис. 5. График пуска электропоезда при питании от накопителя

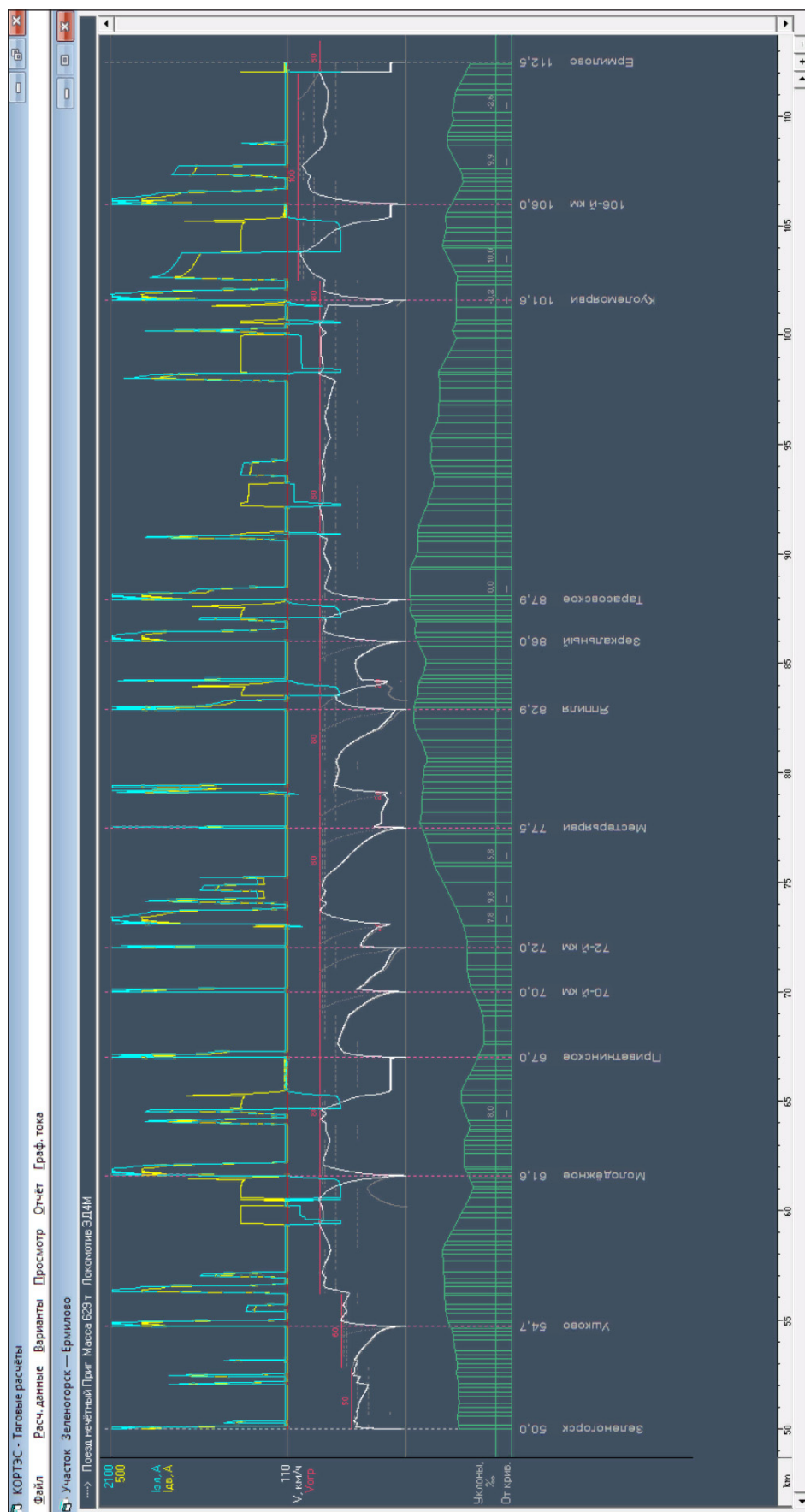


Рис. 6. Пример тягового расчета движения электропоезда серии ЭД4М на участке Зеленогорск–Ермилово с использованием программной среды КОРТЭС

ного подвижного состава с накопителями электрической энергии производится с помощью программы Melcosim, имеющей базу данных реальных полупроводниковых приборов. Для проверки пригодности полупроводниковых приборов используется режим двухуровневого понижающего преобразователя [6], в качестве тока выбран максимальный ток, полученный в программной среде КОРТЭС (рис. 6), модели-

рующей энергопотребление ЭПС на заданном участке, равный 400 А. Напряжение 4500 В и частота 800 Гц выбраны согласно рекомендациям [4], ток постоянный. Эти данные занесены в соответствующие поля окна программы.

В результате программного расчета было установлено соответствие приборов СМ900НС-90Н поставленной задаче, что видно из рис. 7, а, б. При данных токе, напряжении и частоте полу-

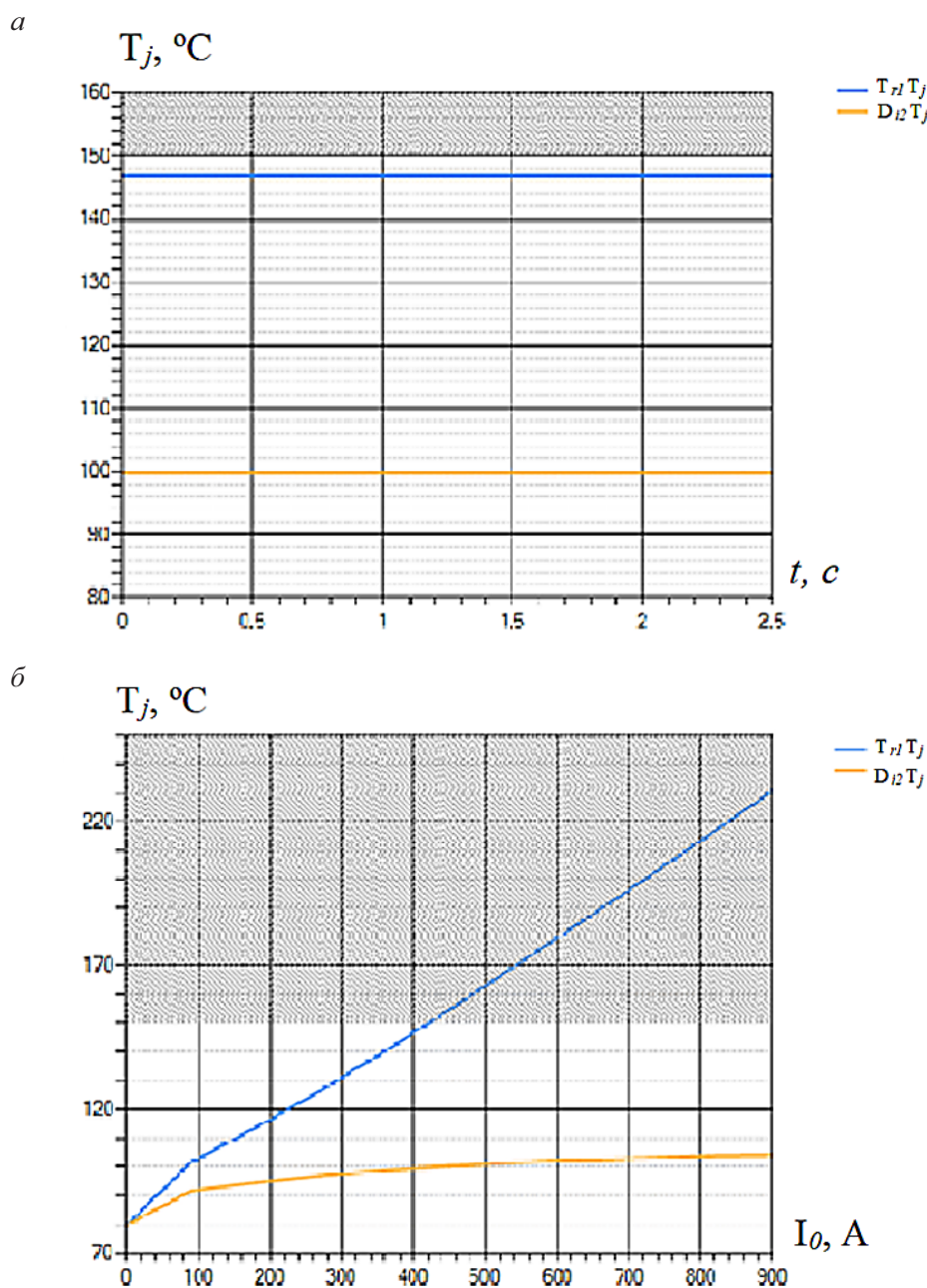


Рис. 7. Зависимость температуры полупроводниковых приборов СМ900НС-90Н от времени (*а*) и тока (*б*)

проводниковые приборы не пересекают критическую отметку 150 °С, что свидетельствует о правильности их выбора.

Стоимость рассмотренного полупроводникового прибора составляет около 120 тыс. руб. Исходя из этого, комплект приборов для двух преобразователей, при пренебрежении стоимостью диода и фильтровых элементов, оценивается в 2 млн руб.

Заключение

Для оснащения всего электропоезда требуются тяговые аккумуляторные батареи, отвечающие требованиям по емкости, а также поддерживающие тяговый и рекуперативный токи. Одной из подходящих является аккумуляторная батарея типа RT-L50-48-LiFePo₄ (литий-железо-фосфатный) со встроенной схемой баланса и защиты. При создании необходимой для преодоления участка в 100 км емкости на каждой секции потребуется установка 146 ячеек аккумуляторной батареи (номинальное напряжение ячейки 48 В). Чтобы оптимизировать энергетические показатели источника, напряжение на батарее увеличено до 3500 В. Стоимость такого блока накопителей составит 20 млн руб., преобразовательной техники к нему – 2 млн руб. Таким образом, стоимость внедрения такого технического решения на 5-секционном электропоезде равна 110 млн руб., что составляет 18 % от стоимости электропоезда в данной компоновке (612 млн руб.).

Однако изменение конструкции электропоезда приводит к увеличению массы прицепного вагона на 3,6 т и электропоезда в целом на 18 т. Расход электрической энергии поездом при этом увеличится на 3 % (если питание силовых цепей производится от источника постоянного тока с напряжением 3000 В). Большее напряжение источника также сказывается на расходе электрической энергии и суммарно с увеличением веса может вызвать рост потребления электрической энергии на отдельных участках.

Использование полуавтономного ЭПС в пригородном сообщении на малопротяженных неэлектрифицированных участках наиболее оптимально, так как при этом наносится меньший вред окружающей среде, относительно применения их автономных аналогов. При этом также будет иметь место снижение общих затрат, так как, исходя из данных компании перевозчика, использование электрической тяги значительно дешевле [1], чем дизельной из-за разницы в стоимости топливо-энергетических ресурсов. Таким образом, разработка аналога на базе электропоезда серии ЭД4 М с накопителями электрической энергии является актуальной задачей и технологически востребованным решением. Затраты, связанные с дооснащением электропоезда, относительно собственной стоимости ЭПС невысоки, а незначительный прирост веса состава оправдывается общими показателями экономии электрической энергии.

Библиографический список

1. Евстафьев А. М. Применение гибридных технологий в тяговом подвижном составе / А. М. Евстафьев // Бюл. результатов науч. исследований. – 2018. – Вып. 3. – С. 27–38.
2. Титова Т. С. Перспективы развития тягового подвижного состава. Ч. 1 / Т. С. Титова, А. М. Евстафьев, М. Ю. Изварин, А. Н. Сычугов // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2018. – № 6 (79). – С. 40–42.
3. Титова Т. С. Повышение энергетической эффективности локомотивов с накопителями энергии / Т. С. Титова, А. М. Евстафьев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Вып. 2. – С. 200–210.
4. Евстафьев А. М. Оценка энергоемкости бортового накопителя энергии для тягового подвижного состава / А. М. Евстафьев // Бюл. результатов науч. исследований. – 2018. – Вып. 2. – С. 7–17.
5. Черемисин В. Т. Оценка потенциала повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров // Изв. Транссиба. – 2013. – № 2 (14). – С. 75–84.

6. Васильев В. А. Анализ возможности применения емкостных накопителей энергии на электрическом подвижном составе / В. А. Васильев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2011. – Вып. 1. – С. 35–44.
 7. Kim K. K. The electromagnetic acceleration of shells and missiles : монография / К. К. Kim, I. M. Karpova. – Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2018. – 82 с.
 8. Евстафьев А. М. Повышение энергетической эффективности гибридного локомотива / А. М. Евстафьев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015. – № 2. – С. 6–10.
 9. Евстафьев А. М. Об использовании суперконденсаторов / А. М. Евстафьев // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 2. – С. 31–32.
 10. Шевлюгин М. В. Энергосбережение на железнодорожном транспорте с помощью сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии / М. В. Шевлюгин // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 2. – С. 67–70.
 11. Павелчик М. Повышение эффективности электрической тяги при помощи накопителей энергии : дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 05.09.03, 05.22.09 / М. Павелчик. – М. : МИИТ, 2000. – 451 с.
 12. Будник В. С. Инерционные механические энергоаккумулирующие системы / В. С. Будник, Н. Ф. Свириденко, В. И. Кузнецов ; под общ. ред. В. С. Будника. – Киев : Наукова думка, 1986. – 175 с.
 13. Бут Д. А. Накопители энергии : учеб. пособие для электроэнергетиков и электромехаников спец. вузов / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин, П. В. Васюкевич. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 398 с.
 14. Черемисин В. Т. Совершенствование системы тягового электроснабжения постоянного тока с накопителями электрической энергии на полигонах обращения тяжеловесных поездов : науч. монография / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Омск : ОмГУПС, 2018. – 282 с.
 15. Мазнев А. С. Применение энергонакопительных устройств на электроподвижном составе / А. С. Мазнев, А. М. Евстафьев // Транспорт Урала. – 2009. – № 2. – С. 83–85.
 16. Евстафьев А. М. Выбор топологии схем тягового привода электрического подвижного состава / А. М. Евстафьев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2010. – Вып. 3 (24). – С. 89–98.
 17. Власьевский С. В. Сравнение энергетической эффективности электровозов переменного тока с коллекторным и асинхронным приводом / С. В. Власьевский, Д. В. Грибенюк, М. С. Алексеева // Вестн. Ин-та тяги и подвижного состава. – 2016. – № 12. – С. 24–27.
 18. Иньков Ю. М. Использование контактно-аккумуляторных электровозов для маневровой работы на станциях / Ю. М. Иньков, А. С. Космодамианский, Г. А. Федяева, В. П. Феокистов // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 4. – С. 9–15.
 19. Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта (основные положения). – Утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 27 декабря 2007 г. № 2459р. – М. : ОАО «РЖД», 2007.
 20. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. – Утв. Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике № ВК 477 от 21 июня 1999 г. – М., 1999.
- Дата поступления: 15.09.2020
Решение о публикации: 19.10.2020
- Контактная информация:**
ОБУХОВ Михаил Юрьевич – инженер, аспирант; mikhail.obukhov.0526@gmail.com
КАЛИНИН Николай Павлович – инженер, аспирант; nikolaykalinin1997@gmail.com

Increasing the energy efficiency of an electric train by installing electric energy storage units

M. Yu. Obukhov, N. P. Kalinin

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

For citation: Obukhov M. Yu., Kalinin N. P. Increasing the energy efficiency of an electric train by installing electric energy storage units. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 4, pp. 449–464. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-449-464

Summary

Objective: To increase the energy efficiency of the Russian multi-unit rolling stock of railways by installing electric energy storage devices. **Methods:** The goal is achieved by applying integrated approach method to the problem of multi-unit rolling stock energy efficiency, with focus on the practical significance and economic feasibility of the results. **Results:** The solutions produced can serve as a basic concept for the modernization of domestic rolling stock. **Practical importance:** Concepts of an electric train with electric energy storage units based on Russian electric trains have been developed in order to increase their energy efficiency.

Keywords: Energy efficiency, electric trains, energy storage units, hybrid multi-unit rolling stock.

References

1. Yevstaf'yev A. M. Primeneniye gibridnykh tekhnologiy v tyagovom podvizhnom sostave [Application of hybrid technologies in traction rolling stock]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Research Results Bulletin], 2018, iss. 3, pp. 27–38. (In Russian)
2. Titova T. S., Yevstaf'yev A. M., Izvarin M. Yu. & Sychugov A. N. Perspektivy razvitiya tyagovogo podvizhnogo sostava. Ch. 1 [Prospects for the development of traction rolling stock. Part 1]. *Transport Rossiyskoy Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* [Transport of the Russian Federation. Journal of Science, Practice, Economics], 2018, no. 6 (79), pp. 40–42. (In Russian)
3. Titova T. S. & Yevstaf'yev A. M. Povysheniye energeticheskoy effektivnosti lokomotivov s nakopitelyami energii [Improving the energy efficiency of locomotives with energy storage]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, iss. 2, pp. 200–210. (In Russian)
4. Yevstaf'yev A. M. Otsenka energoyomkosti bortovogo nakopitelya energii dlya tyagovogo podvizhnogo sostava [Estimation of the energy consumption of the onboard energy storage device for traction rolling stock]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Research Results Bulletin], 2018, iss. 2, pp. 7–17. (In Russian)
5. Cheremisin V. T. & Nikiforov M. M. Otsenka potentsiala povysheniya energeticheskoy effektivnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [Assessment of the potential for increasing energy efficiency of the traction energy system]. *Izvestiya Transsiba* [Transsib proceedings], 2013, no. 2 (14), pp. 75–84. (In Russian)
6. Vasil'yev V. A. Analiz vozmozhnosti primeneniya yomkostnykh nakopiteley energii na elektricheskom podvizhnom sostave [Analysis of the possibility of using capacitive energy storage devices on electric rolling stock]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2011, iss. 1, pp. 35–44. (In Russian)
7. Kim K. K. & Karpova I. M. *The electromagnetic acceleration of shells and missiles*. Monograph.

Saratov, Ay Pi Er Media [IPR Media] Publ., 2018, 82 p.

8. Yevstaf'yev A. M. Povysheniye energeticheskoy effektivnosti gibridnogo lokomotiva [Increasing the energy efficiency of the hybrid locomotive]. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], 2015, no. 2, pp. 6–10. (In Russian)

9. Evstafiev A. M. Ob ispol'zovanii superkondensatorov [On the use of supercapacitors]. *Zheleznodorozhniy transport* [Railway transport], 2010, no. 2, pp. 31–32. (In Russian)

10. Shevlyugin M. V. Energoberezheniye na zheleznodorozhnom transporte s pomoshch'yu sverkhprovodnikovyykh induktivnykh nakopiteley energii [Energy saving on railway transport with the help of superconducting inductive energy storage devices]. *Nauka i tekhnika transporta* [Transport Science and Technology], 2008, no. 2, pp. 67–70. (In Russian)

11. Pavelchik M. Povysheniye effektivnosti elektricheskoy tyagi pri pomoshchi nakopiteley energii. Dis. ... d-ra tekhn. nauk, spetsial'nost': 05.09.03, 05.22.09 [Increasing the efficiency of electric traction using energy storage devices. Doctoral thesis, speciality: 05.09.03, 05.22.09]. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., 2000, 451 p. (In Russian)

12. Budnik V. S., Sviridenko N. F. & Kuznetsov V. I. *Inertsionnyye mekhanicheskiye energoakkumuliruyushiy sistemy*. Pod obshch. red. V. S. Budnika [Inertial mechanical energy storage systems. Ed. by V. S. Budnik]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986, 175 p. (In Russian)

13. But D. A., Aliyevskiy B. L., Mizyurin S. R. & Vasyukevich P. V. *Nakopiteli energii*. Ucheb. posobiye dlya elektroenergetikov i elektromekhanikov spetsializirovannykh vuzov [Energy storage. Textbook for electricians and electromechanics of specialized universities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991, 398 p. (In Russian)

14. Cheremisin V. T., Nezevak V. L. & Shatokhin A. P. *Sovershenstvovaniye sistemy tyagovogo elektroosnabzheniya postoyannogo toka s nakopitelyami elektricheskoy energii na poligonakh obrashcheniya tyazhelovesnykh poyezdov*. Nauchnaya monografiya [Improvement of the DC traction power supply system with electric energy storage units at the sites for the circulation of heavy traffic. Scientific monograph]. Omsk, OmGUPS [Omsk

State Transport University] Publ., 2018, 282 p. (In Russian)

15. Maznev A. S. & Yevstaf'yev A. M. Primeneniye energonakopitel'nykh ustroystv na elektropodvizhnom sostave [Application of energy storage devices on electric rolling stock]. *Transport Urala* [Ural transport], 2009, no. 2, pp. 83–85. (In Russian)

16. Yevstaf'yev A. M. Vybory topologii skhem tyagovogo privoda elektricheskogo podvizhnogo sostava [Choice of topology of traction drive schemes for electric rolling stock]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2010, iss. 3 (24), pp. 89–98. (In Russian)

17. Vlas'yevskiy S. V., Gribenyuk D. V. & Alekseyeva M. S. Sravneniye energeticheskoy effektivnosti elektrovozov peremennogo toka s kollektornym i asinkhronnym privodom [Comparison of energy efficiency of alternating current electric locomotives with collector and asynchronous drive]. *Vestnik Instituta tyagi i podvizhnogo sostava* [Bulletin of the Institute of Traction and Rolling Stock], 2016, no. 12, pp. 24–27. (In Russian)

18. In'kov Yu. M., Kosmodamianskiy A. S., Fedyaeva G. A. & Feoktistov V. P. Ispol'zovaniye kontaktno-akkumulyatornykh elektrovozov dlya manevrovoy raboty na stantsiyakh [Use of contact-accumulator electric locomotives for shunting work at stations]. *Nauka i tekhnika transporta* [Transport Science and Technology], 2014, no. 4, pp. 9–15. (In Russian)

19. *Metodika opredeleniya stoimosti zhiznennogo tsikla i limitnoy tseny podvizhnogo sostava i slozhnykh tekhnicheskikh sistem zheleznodorozhnogo transporta (osnovnyye polozheniya)*. Utv. Rasporyazheniyem OAO "RZHD" ot 27 dekabrya 2007 g. no. 2459p. [Methodology for determining the life cycle cost and limit price of rolling stock and complex technical systems of railway transport (basic provisions). Approved by order of JSC "Russian Railways" dated December 27, 2007]. Moscow, OAO "RZHD" [JSC "Russian Railways"] Publ., 2007. (In Russian)

20. *Metodicheskiye rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh proyektov*. Utv. Ministerstvom ekonomiki RF, Ministerstvom finansov RF, Gosudarstvennym komitetom RF po stroitel'noy, arkhitekturnoy i

zhilishchnoy politike no. VK 477 ot 21 iyunya 1999 g. [*Guidelines for assessing the effectiveness of investment projects*. Approved by the Ministry of Economy of the Russian Federation, the Ministry of Finance of the Russian Federation, the State Committee of the Russian Federation for Construction, Architectural and Housing Policy N VK 477 dated June 21, 1999]. Moscow, 1999. (In Russian)

Received: September 15, 2020

Accepted: October 19, 2020

Author's information:

Mikhail Yu. OBUKHOV – Engineer, Postgraduate Student; mikhail.obukhov.0526@gmail.com

Nikolay P. KALININ – Engineer, Postgraduate Student; nikolaykalinin1997@gmail.com

УДК 629.01

Особенности проектирования и испытаний сменных кузовов

Г. О. Панов¹, С. М. Толстов¹, Л. В. Цыганская², И. О. Морозова³

¹ ООО «Инженерный Центр подвижного состава», Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 108

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

³ АО «Научно-внедренческий центр “Вагоны”», Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, ул. Ефимова, 1/4, лит. А

Для цитирования: Панов Г. О., Толстов С. М., Цыганская Л. В., Морозова И. О. Особенности проектирования и испытаний сменных кузовов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 465–476.

DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-465-476

Аннотация

Цель: Определение и систематизация нагрузок, возникающих при эксплуатации сменных кузовов, для разработки соответствующих нормативных требований к проектированию и испытаниям сменных кузовов. **Методы:** По результатам сравнения конструкции и области применения сменных кузовов с грузовыми (морскими) контейнерами и съемными кузовами определены нагрузки и методы их приложения. **Результаты:** Выявлено отсутствие нормативной базы, регламентирующей требования к прочности сменных кузовов, нагрузкам, возникающим в железнодорожной сфере применения, включая их хранение, погрузо-разгрузочные операции и штабелирование, а также к методам испытаний данных кузовов. Определено отличие кузовов сменных от съемных, заключающееся в отсутствии необходимости транспортирования сменных кузовов речным и морским транспортом. При рассмотрении особенностей эксплуатации сменных кузовов в железнодорожной сфере применения, включая их хранение, погрузо-разгрузочные операции и штабелирование, установлена конструктивная и эксплуатационная схожесть сменных кузовов с грузовыми (морскими) контейнерами и съемными кузовами. Определены и систематизированы нагрузки, прикладываемые к сменным кузовам. **Практическая значимость:** Показана необходимость разработки нормативной базы, регламентирующей требования к прочности сменных кузовов, нагрузкам, действующим при погрузо-разгрузочных операциях и штабелировании. Рассмотренные нагрузки рекомендуется учитывать при разработке нормативно-технических документов, в проведении опытно-конструкторских работ и испытаниях сменных кузовов.

Ключевые слова: Нормативная база, сменные кузова, грузовые (морские) контейнеры, съемные кузова, нагрузки, действующие при погрузо-разгрузочных операциях и штабелировании.

Расширение номенклатуры перевозимых грузов на специализированном железнодорожном подвижном составе является актуальной задачей, от решения которой зависят сокращение порожнего пробега и уменьшение простоя вагонов. Одно из направлений решения этой задачи – использование грузовых вагонов со съемными

кузовами, которые в ряде случаев могут быть наиболее эффективны [1–5]. Съемный кузов представляет собой транспортное оборудование достаточной прочности, сконструированное для перевозки грузов, как правило, на автомобильных и железнодорожных транспортных средствах наземным или водным видом транспорта,

с унифицированными размерами, способами его крепления и перегрузки, чья ширина и/или длина превышает размеры контейнеров ИСО серии 1 [6]. Грузовые вагоны со съемными кузовами известны из мирового опыта железнодорожных перевозок. Ряд зарубежных компаний, например «WASCOSA» (Швейцария) [7], «INNO FREIGHT» (Австрия) [8] и др., выпускают и эксплуатируют съемные кузова, предназначенные для перевозки грузов различной номенклатуры (рис. 1, 2).

Дальнейшим развитием конструкций грузовых вагонов является применение съемных кузовов, которые позволяют в ходе эксплуатации устанавливать на одну и ту же раму вагона различные кузова, т. е. менять их в случае необходимости перевозки разнообразных грузов. Работы по созданию съемных кузовов и соответственно вагонов-платформ, предназначенных для их перевозок, ведутся в Российской Федерации в ООО «ВНИЦТТ» (г. Санкт-Петербург).

На рис. 3 показаны опытные образцы таких кузовов, установленные на вагоны-платформы.

Особенность конструкции съемных кузовов в отличие от съемных заключается в том, что съемные кузова оборудованы элементами крепления к несущей раме вагона и смежным кузовам (при эксплуатации в составе вагонов сочлененного типа). Конструкция съемного кузова в общем случае включает в себя раму, сам кузов (емкость для размещения груза), устройства и приспособления, позволяющие выполнять погрузочно-разгрузочные работы, элементы крепления к раме вагона и другим кузовам (в случае их установки на вагон-платформы сочлененного типа).

При проектировании и испытаниях таких кузовов следует учитывать ряд особенностей, связанных с условиями их эксплуатации, хранения, выполнением погрузо-разгрузочных операций на специализированных терминалах и др. В каждом из этих случаев съемные кузова

а



б

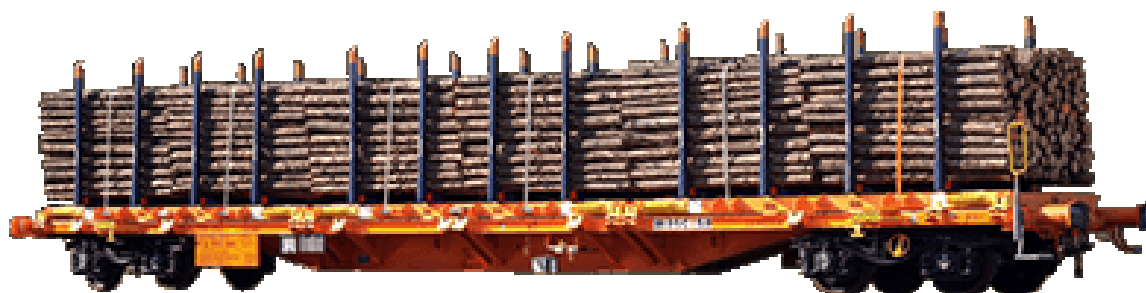


Рис. 1. Съемные кузова компании «WASCOSA»:

а – вагон-платформа со съемным кузовом открытого типа; *б* – вагон-платформа со съемным кузовом для перевозки леса

a*б**в*

Рис. 2. Съемные кузова производства компании INNO FREIGHT:
a – вагон-платформа со съемным кузовом открытого типа; *б* – вагон-платформа со съемным кузовом типа хоппер-дозатор; *в* – съемный кузов открытого типа с возможностью выгрузки через торцевую стену



Рис. 3. Сменные кузова разработки компании ООО «ВНИЦТТ» закрытого типа с разгрузкой через торцевую стену

подвергаются воздействию соответствующих нагрузок.

Основным фактором, определяющим безопасность конструкции сменных кузовов, является их способность выдерживать нагрузки, появляющиеся при их эксплуатации. Потому для подтверждения их безопасности при проектировании и испытаниях ориентируются в первую очередь на эксплуатационные нагрузки.

В настоящее время отсутствуют нормативные документы, регламентирующие требования к прочности сменных кузовов и нагрузкам, имеющим место в эксплуатации. Методы испытаний данных кузовов также отсутствуют. В связи со спецификой конструкции и отсутствием нормативной базы актуальным становится установление требований к испытаниям сменных кузовов в части перечня и значений испытательных нагрузок.

В данной статье рассмотрены и систематизированы виды нагрузок, возникающие при применении сменных кузовов, включая их хранение, погрузо-разгрузочные операции на специализированных терминалах и штабелирование. На рис. 4 показан перечень нагрузок, дей-

ствующих на сменные кузова при эксплуатации на железнодорожном транспорте.

При использовании с вагоном кузова являются съемным оборудованием. Нагрузки, влияющие на вагоны, их величины и требования к прочности конструкции вагонов в целом, отражены в нормативных документах, относящихся к вагонам: ГОСТ 33211–2014 [9], ГОСТ 33788–2016 [10] и «Нормах для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» (далее «Нормы») [11], и поэтому в данной статье не рассматриваются.

Сменные кузова имеют верхние и нижние угловые фитинги, расположение которых идентично расположению в конструкции контейнеров. При хранении, погрузо-разгрузочных операциях на специализированных терминалах и штабелировании испытательные нагрузки следует применять согласно нормативным документам, относящимся к контейнерам: ГОСТ 20527–82 [12], ГОСТ 20259–80 [13], ГОСТ 20260–80 [14], ГОСТ Р 51876–2008 (ИСО 1496–1:1990) [15].

В ходе эксплуатации сменные кузова перемещаются к месту разгрузки/загрузки/хранения и

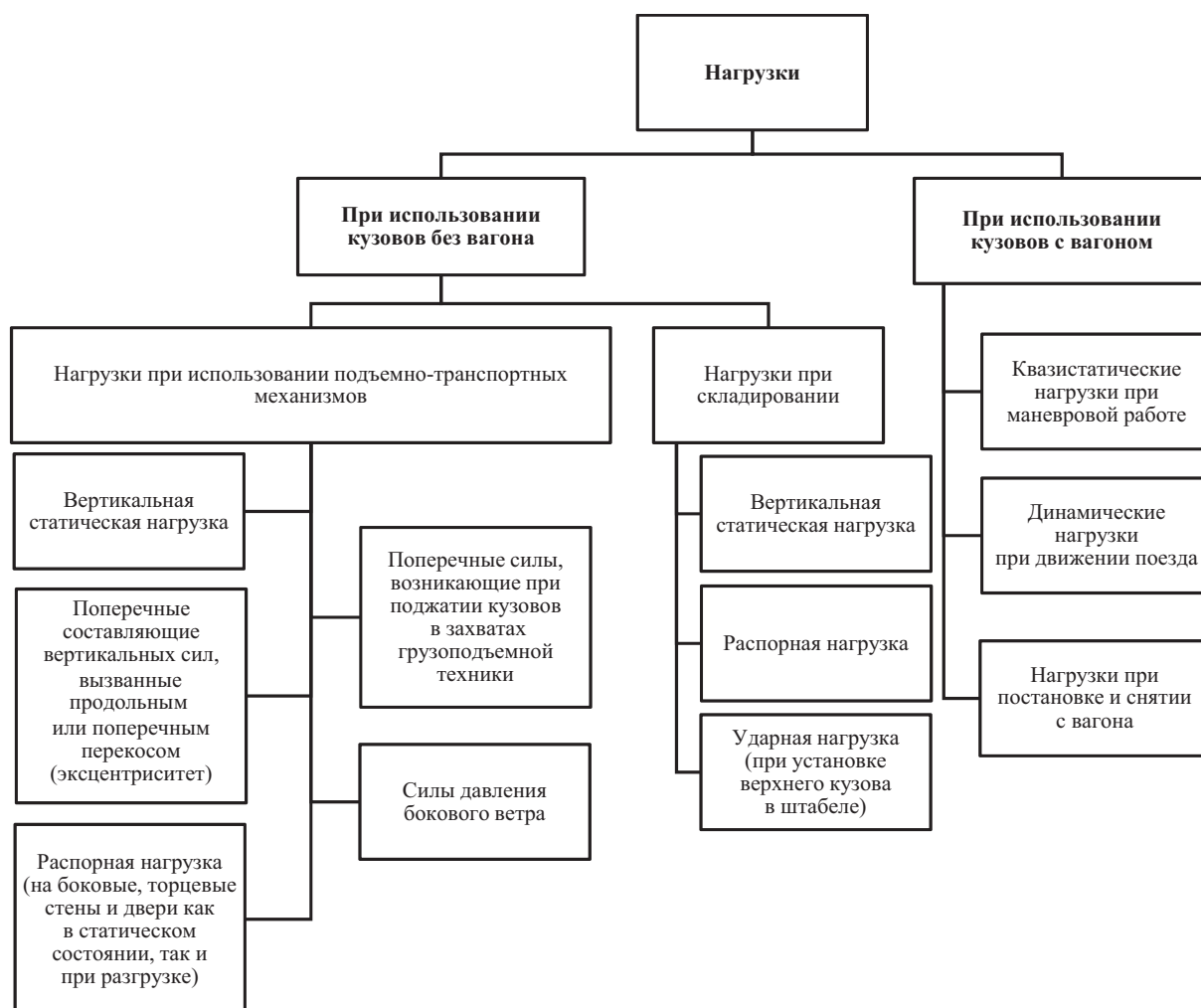


Рис. 4. Нагрузки, действующие на сменные кузова при эксплуатации на железнодорожном транспорте

обратно. В зависимости от области применения и перевозимого груза при погрузо-разгрузочных операциях используются следующие подъемно-транспортные механизмы:

- вилочные погрузчики;
- ричстакеры;
- крановая техника.

Учитывая, что ширина сменных кузовов значительно превышает длину вилок погрузчика (3 и 1,825 м соответственно), испытательную нагрузку при подъеме вилочным погрузчиком целесообразно имитировать балками коробчатого сечения необходимой жесткости с использованием стационарных домкратов (рис. 5). Нагрузку распределяют равномерно по полу ку-

зова, так чтобы масса тары сменного кузова и испытательная нагрузка (вес груза) вместе составляли $1,6R$ в соответствии с [15], где R – максимальная масса брутто сменного кузова.

В верхней части сменного кузова расположены фитинги для его поднятия грузозахватными устройствами (траверсами, спредерными механизмами и т. п.). При испытаниях подъем (опускание) за четыре верхних угловых фитинга следует осуществлять плавно (без рывков), с возможно меньшими ускорениями на высоту, обеспечивающую отрыв основания сменного кузова от поверхности опирания. При испытаниях рекомендуется проводить измерения в режиме непрерывной записи с целью регистра-

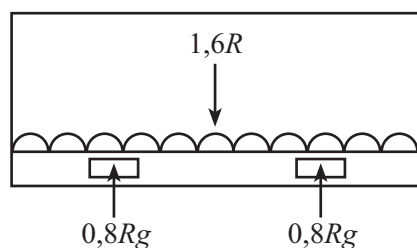


Рис. 5. Нагрузки при подъеме вилочным погрузчиком

ции деформаций при возможных нагрузках от вертикальных ускорений. Испытываемый сменный кузов должен иметь такую равномерно-распределенную по площади пола нагрузку, чтобы собственная его масса тары и вес испытательного груза вместе составляли $2R$ в соответствии с [15].

При подъеме траверсой нагрузки к фитингам должны быть приложены вертикально вверх (рис. 6). Если подъем сменного кузова осуществляют с помощью стропов и крана, то каждую из строп располагают под углом не более 30° к вертикали, согласно [15] (рис. 7).

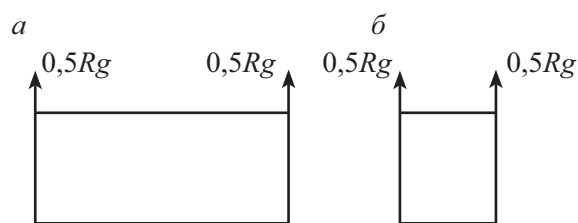


Рис. 6. Нагрузки при подъеме за верхние фитинги: а – вид контейнера спереди; б – вид контейнера сбоку

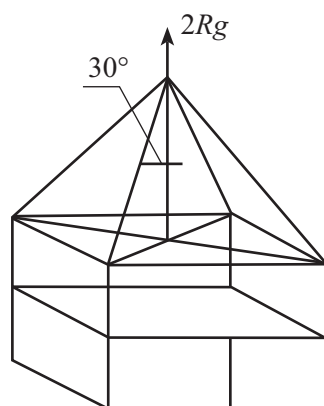


Рис. 7. Нагрузки при подъеме за верхние фитинги с помощью строп

При проведении испытаний сменный кузов выдерживают в поднятом положении в течение 5 мин [15].

При подъеме грузоподъемной техникой на сменный кузов в общем случае действуют нагрузки, приведенные в таблице.

Нагрузка от поперечных сил, возникающих при поджатии сменного кузова в захватах грузоподъемной техники, принимается по данным производителя [16], равной 300 кН, и уточняется в зависимости от грузоподъемной техники других производителей, так как может поджимать кузова с большей силой.

Нагрузка от поперечных составляющих вертикальных сил (эксцентриситет) при штабелировании в случае, когда все четыре верхних угловых фитинга нижнего кузова должны быть смещены относительно нижних угловых фитингов кузова второго яруса на 25,4 мм поперек и 38,0 мм, согласно [15], в продольном направлении, имитируется специальным испытательным оборудованием либо с особыми мерами безопасности постановкой необходимого количества сменных кузовов.

Динамическое давление ветра на груз для кранов всех типов, устанавливаемых в речных и морских портах (а это наиболее предполагаемые места перегрузки и складирования кузовов), составляет 250 Па. Нагрузка от силы давления бокового ветра принимается в соответствии с ГОСТ 1451–77 [17].

Самоуравновешенные нагрузки от давления груза (распорные нагрузки) при перевозке в сменных кузовах насыпных и скатывающихся грузов определяются по формулам ГОСТ 33211–2014 [9] и «Норм...» [11].

Так как разгрузка сменного кузова осуществляется через торцевые или боковые разгрузочные отверстия или путем переворачивания на 180° , то для боковых и торцевых стен прикладываемая равномерно распределенная нагрузка от распора груза должна составлять не менее $0,6 \cdot m_{гр} \cdot g$, где $m_{гр}$ – масса груза, кг; g – ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м/с}^2$. Данная нагрузка установлена требованиями ГОСТ Р 53520–2009 [18] и ГОСТ Р 51876–2008 [15].

Нагрузки, действующие при подъеме сменного кузова грузоподъемной техникой

Действующая нагрузка	Вид грузоподъемной техники		
	Вилочные погрузчики	Ричстакеры	Крановая техника
Вертикальная от действия силы тяжести брутто	+	+	+
От действия вертикального ускорения	+	+	+
От поперечных сил, возникающих при поджатии сменного кузова в захватах грузоподъемной техники	–	+	–
От поперечных составляющих вертикальных сил, вызванных продольным или поперечным перекосом (перекос кранов мостового типа, смещения выносных опор или гусениц самоходных кранов вследствие допустимого уклона рабочей площадки, отклонения от проектного значения размеров и относительного расположения элементов рельсового пути крановой техники и т. п.)	–	–	+
От силы давления бокового ветра	+	+	+
Самоуравновешенные при загрузке насыпных или скатывающихся грузов	+	+	+

Хранение сменного кузова предусматривает складирование как отдельно стоящего кузова, так и в формате штабеля. Штабелирование производится на специализированных площадках с твердым покрытием и в порожнем, и в груженом состоянии, в зависимости от требований, заданных на этапе проектирования. Количество ярусов в штабеле устанавливается конструкторской документацией на конкретный вид кузова и исходя из предполагаемых мест складирования, которые имеют свои требования по ограничению высоты штабеля.

При штабелировании кузовов нижнего яруса испытывает:

- наибольшие нагрузки от веса брутто самого кузова и последующих ярусов;
- самоуравновешенные нагрузки от давления груза (распорные нагрузки);
- ударную нагрузку при неравномерной скорости опускания.

Нагрузка при штабелировании определяется по формуле

$$F = n \cdot R \cdot g,$$

в которой R – масса брутто, кг; n – количество ярусов, шт.

Согласно ГОСТ 20527–82 [12] и ГОСТ 20259–80 [13] нагрузка, приходящаяся на один верхний фитинг нижнего кузова, составляет

$$F = \frac{k \cdot R \cdot g \cdot (n-1)}{4},$$

при этом что и сам нижний кузов должен быть загружен kR , где R – максимальная масса брутто кузова, кг; k – коэффициент, учитывающий величину вертикального ускорения, в зависимости от транспортной базы равный для судов 1,8 в соответствии с [15], для складирования в порту 1.

При штабелировании также следует принимать во внимание конструкцию и зазоры между узлами соединения кузовов для исключения перекоса штабеля.

Испытания проводятся путем установки груженых сменных кузовов в несколько ярусов или благодаря имитации штабелирования приложением эквивалентной вертикальной на-

грузки мерными грузами либо с помощью специального стенда.

Внешнюю вертикальную нагрузку прикладывают одновременно ко всем четырем верхним угловым фитингам или поочередно к каждой паре верхних угловых фитингов.

Для обеспечения безопасности учитывают статическое давление, оказываемое на площадку P , МПа, от штабеля:

$$P = \frac{k \cdot R \cdot g \cdot n}{S_{\text{оп}}} \cdot 10^{-6},$$

где $S_{\text{оп}}$ – площадь опирания одного кузова, м².

Давление P не должно превышать допускаемое давление на площадку складирования, установленное требованиями СП 316.1325800.2017 [19], СП 262.1325800.2016 [20] для площадки (обычно от 49 до 294 кПа).

Помимо статической нагрузки от веса брутто кузовов, установленных сверху, и собственного веса брутто, при штабелировании действует еще и ударная нагрузка, вызванная неравномерной скоростью опускания сменного кузова. Поэтому при тензометрировании следует вести

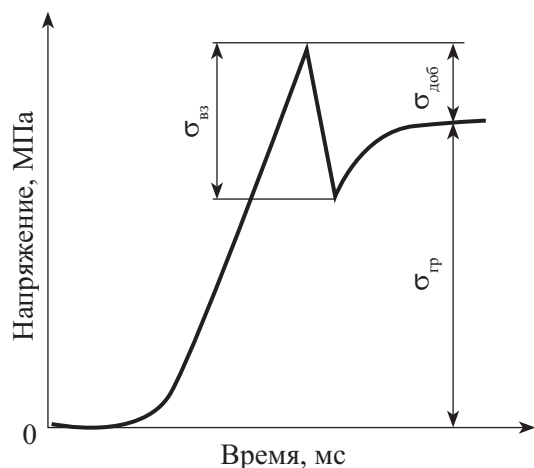


Рис. 8. Зависимость напряжения от времени при неравномерном опускании кузова:

$\sigma_{\text{гр}}$ – напряжение при статическом взаимодействии кузовов; $\sigma_{\text{вз}}$ – напряжение при касании кузовов (напряжение удара при касании); $\sigma_{\text{доб}}$ – добавочное напряжение при неравномерном взаимодействии кузовов

непрерывный процесс записи штабелирования (рис. 8), а при проектировании учитывать данную нагрузку.

Сила F , Н, действующая при установке верхнего яруса при штабелировании, определяется по формуле

$$F = \frac{R \cdot V_{\text{кр}}}{\Delta t},$$

в которой $V_{\text{кр}}$ – максимальная расчетная скорость опускания груза краном, м/с; Δt – время контакта при ударе, с.

Прочность кузовов при штабелировании необходимо оценивать по той же схеме, что и прочность вагонов при соударении.

Для обеспечения безопасности испытаний следует выбирать нивелированную площадку с защитой от ветра и шириной не менее 25 м (при условии штабелирования в 3 яруса), например, контейнерные площадки, которые должны иметь продольный уклон в пределах от 0,4 до 0,6 %.

Таким образом, создание новых сменных кузовов является новым направлением в работе российских разработчиков и испытателей. На первом этапе внедрения на основе анализа условий эксплуатации рассмотрены и систематизированы испытательные нагрузки, которые в дальнейшем могут служить основой при разработке соответствующих нормативных требований к проектированию и испытаниям сменных кузовов.

Библиографический список

1. Кононенко А. С. Сочлененные вагоны-платформы со съёмными кузовами повысят эффективность перевозок / А. С. Кононенко, А. А. Меркулов, А. Ю. Новоселов, Ю. В. Савушкин, А. М. Соколов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2018. – № 4. – С. 36–40.
2. Даукша А. С. Съёмные кузова – инновационный вариант совершенствования конструкции вагонов / А. С. Даукша // Системы автоматизированного проектирования на транспорте : сб. трудов V Между-

нар. науч.-практич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2014. – С. 50–52.

3. Даукша А. С. Совершенствование вагонов на основе использования съемных кузовов / А. С. Даукша, Ю. П. Бороненко // Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты : сб. трудов X Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 45–53.

4. Даукша А. С. Перспективы внедрения вагонов со съемными кузовами увеличенной грузоподъемности / А. С. Даукша, Ю. П. Бороненко // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 14. – Вып. 3. – С. 437–451.

5. Соколов А. М. Разработка сочлененного вагона-платформы со съемными кузовами для повышения эффективности перевозок / А. М. Соколов, К. В. Кякк, А. С. Кононенко // Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты : сб. трудов XII Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2017. – С. 80–83.

6. Правила Российского морского регистра судоходства от 01.10.2019 г. № 2-090201-010. – URL : <https://rs-class.org> (дата обращения : 23.10.2020 г.).

7. WASCOSA's flex freight system. Edition. Switzerland, 2012. – URL : <http://www.wascosa.ch> (дата обращения : 23.10.2020 г.).

8. Inno freight. – URL : <http://www.innofreight.com> (дата обращения : 23.10.2020 г.).

9. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам (с Поправкой). – М. : Стандартинформ, 2016. – 54 с.

10. ГОСТ 33788–2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. – М. : Стандартинформ, 2016. – 41 с.

11. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 317 с.

12. ГОСТ 20527–82 (СТ СЭВ 3334–81). Фитинги угловые крупнотоннажных контейнеров. Конструкция и размеры (с Изменением № 1). – М. : Стандартинформ, 2004. – 9 с.

13. ГОСТ 20259–80. Контейнеры универсальные. Общие технические условия (с Изменениями № 1–4). – М. : Стандартинформ, 2002. – 18 с.

14. ГОСТ 20260–80. Контейнеры универсальные. Правила приемки. Методы испытаний. – М. : Стандартинформ, 1985. – 40 с.

15. ГОСТ Р 51876–2008 (ИСО 1496–1:1990). Контейнеры грузовые серии 1. Технические требования и методы испытаний. Ч. 1. Контейнеры общего назначения. – М. : Стандартинформ, 2011. – 38 с.

16. Ричстакеры : универсалы для обработки контейнеров // Cranes&Access. – 2008. – № 2 (5). – С. 64–69.

17. ГОСТ 1451–77. Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и метод определения (с Поправкой). – М. : Стандартинформ, 2003. – 13 с.

18. ГОСТ Р 53520–2009 (ИСО 1496–4:1991). Контейнеры грузовые серии 1. Технические требования и методы испытаний. Ч. 4. Контейнеры для сыпучих грузов без давления. – М. : Стандартинформ, 2010. – 36 с.

19. СП 316.1325800.2017. Терминалы контейнерные. Правила проектирования. – М. : Стандартинформ, 2018. – 122 с.

20. СП 262.1325800.2016. Контейнерные площадки и терминальные устройства на предприятиях промышленности и транспорта. Правила проектирования и строительства. – М. : Стандартинформ, 2017. – 28 с.

Дата поступления: 07.09.2020

Решение о публикации: 18.09.2020

Контактная информация:

ПАНОВ Геннадий Олегович – ст. инженер;
prgo@engcenter.ru

ТОЛСТОВ Сергей Михайлович – ведущий инженер;
tolstovsm@mail.ru

ЦЫГАНСКАЯ Людмила Валериевна – канд. техн. наук, доцент;
tcyganskaya@gmail.com

МОРОЗОВА Ирина Олеговна – мл. науч. сотрудник;
filippova.io@yandex.ru

Specific features of designing and testing interchangeable bodies

G. O. Panov¹, S. M. Tolstov¹, L. V. Tsyganskaia², I. O. Morozova³

¹ Rolling Stock Engineering Centre LLC, 108, Fontanka River nab., Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

² Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

³ Wagons Research and Innovation Centre JSC, 1/4, lit. A, ul. Efimova, Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Panov G. O., Tolstov S. M., Tsyganskaia L. V., Morozova I. O. Specific features of designing and testing interchangeable bodies. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 4, pp. 465–476. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-465-476

Summary

Objective: Definition and systematisation of loads occurring during operation of interchangeable wagon bodies for development of corresponding regulatory requirements for designing and testing interchangeable bodies. **Methods:** Loads and methods of their application are determined as a result of comparison of design and application area of interchangeable bodies with cargo (maritime) containers and demountable bodies. **Results:** The authors identified a lack of regulatory framework for standardisation of requirements for bearing capacity of interchangeable bodies, for loads that occur in the railway sphere of application, including storage, handling and stockpiling, as well as testing methods for these bodies. The difference between interchangeable and demountable bodies is defined as lack of need for transportation of interchangeable bodies by waterborne transport. In the process of consideration of specific features of operating interchangeable bodies in the railway sphere of application, including storage, handling and stockpiling, design and operational similarity of interchangeable bodies with cargo (maritime) containers and demountable bodies was established. Loads applied to interchangeable bodies were defined and systemised. **Practical importance:** The need for development of a regulatory framework for standardisation of requirements for bearing capacity of interchangeable bodies and for loads that occur during handling and stockpiling operations. The authors recommend that the loads discussed in the paper be taken into account in development of technical standard documents, in conducting research and development work and in testing interchangeable bodies.

Keywords: Regulatory framework, interchangeable wagon bodies, cargo (maritime) containers, demountable bodies, loads occurring during handling and stockpiling.

References

1. Kononenko A. S., Merkulov A. A., Novoselov A. Yu., Savushkin Iu. V. & Sokolov A. M. Sochlenennyye vagonny platformy so s'emnymi kuzovami povysiat effektivnost' perevozok [Articulated platform wagons with demountable bodies will increase efficiency of transportation]. *Vagony i vagonnoe khoziaistvo [Wagons and wagon facilities]*, 2018, no. 4, pp. 36–40. (In Russian)

2. Dauksha A. S. S'emnye kuzova – innovatsionnyi variant sovershenstvovaniia konstruktsii vagonov [Demountable bodies are an innovative option for perfecting wagon design]. *Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniia na transporte*. Sb. trudov V Mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii [Computer-assisted design systems in transport. Coll. papers of the 5th intl. sci.-practical conf.]. St. Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2014, pp. 50–52. (In Russian)

3. Dauksha A. S. & Boronenko Yu. P. Sovershenstvovanie vagonov na osnove ispol'zovaniia s'emnykh kuzovov [Perfecting wagons on the basis of using demountable bodies]. *Podvizhnoi sostav XXI veka: idei, trebovaniia, proekty*. Sb. trudov X Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konferentsii [21st century rolling stock: ideas, requirements, projects. Coll. papers of the 10th intl. sci.-techn. conf.]. St. Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2015, pp. 45–53. (In Russian)
4. Dauksha A. S. & Boronenko Yu. P. Perspektivy vnedreniia vagonov so s'emnymi kuzovami uvelichennoi gruzopod'emnosti [Prospects for introducing wagons with demountable bodies of increased load-carrying capacity]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, vol. 14, iss. 3, pp. 437–451. (In Russian)
5. Sokolov A. M., Kiakk K. V. & Kononenko A. S. Razrabotka sochlenennogo vagona-platformy so s'emnymi kuzovami dlia povysheniia effektivnosti perevozok [Designing articulated platform wagon with demountable bodies for increasing efficiency of transportations]. *Podvizhnoi sostav XXI veka: idei, trebovaniia, proekty*. Sb. trudov XII Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konferentsii [21st century rolling stock: ideas, requirements, projects. Coll. papers of the 12th intl. sci.-techn. conf.]. St. Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, pp. 80–83. (In Russian)
6. *Pravila Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva ot 01.10.2019 g. no. 2-090201-010* [Rules of the Russian Maritime Register of Shipping enacted October 10, 2019, N 2-090201-010]. Available at: <https://rs-class.org> (accessed: October 23, 2020). (In Russian)
7. *WASCOSA's flex freight system. Edition*. Switzerland, 2012. Available at: <http://www.wascosa.ch> (accessed: October 23, 2020).
8. Innofreight. Available at: <http://www.innofreight.com> (accessed: October 23, 2020).
9. *State standard GOST 33211–2014. Vagony gruzovye. Trebovaniia k prochnosti i dinamicheskim kachestvam (s Popravkoi)* [Cargo wagons. Requirements for strength and dynamic properties (Amended)]. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 54 p. (In Russian)
10. *State standard GOST 33788–2016. Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniia na prochnost' i dinamicheskie kachestva* [Cargo and passenger wagons. Methods of testing for strength and dynamic properties]. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 41 p. (In Russian)
11. *Normy dlia rascheta i proektirovaniia vagonov zheleznikh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Norms for calculating and designing wagons of 1520 mm-gauge Transportation Ministry railways (non-self-propelled)]. Moscow, GosNIIV–VNIIZhT Publ., 1996, 317 p. (In Russian)
12. *State standard GOST 20527–82 (ST SEV 3334–81). Fitingi uglovye krupnotonnazhnykh konteinerov. Konstruktsiia i razmery (s Izmeneniiem no. 1)* [Corner fittings for large-tonnage cargo containers. Design and dimensions (with Amendment N 1)]. Moscow, Standartinform Publ., 2004, 9 p. (In Russian)
13. *State standard GOST 20259–80. Konteinery universal'nye. Obshchie tekhnicheskie usloviia (s Izmeneniiami no. 1–4)* [General-purpose containers. General technical conditions (with Amendments N 1–4)]. Moscow, Standartinform Publ., 2002, 18 p. (In Russian)
14. *State standard GOST 20260–80. Konteinery universal'nye. Pravila priemki. Metody ispytanii* [General-purpose containers. Acceptance rules. Test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 1985, 40 p. (In Russian)
15. *State standard GOST R 51876–2008 (ISO 1496–1:1990). Konteinery gruzovye serii 1. Tekhnicheskie trebovaniia i metody ispytanii. Chast' 1. Konteinery obshchego naznacheniiia* [Series 1 cargo containers. Technical requirements and test methods. Part 1. General-purpose containers]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 38 p. (In Russian)
16. Richstakery: universalny dlia obrabotki konteinerov [Reach stackers as universals for handling of containers]. *Cranes&Access*, 2008, no. 2 (5), pp. 64–69. (In Russian)
17. *State standard GOST 1451–77. Krany gruzopod'emnye. Nagruzka vetrovaia. Normy i metod opredeleniia (s Popravkoi)* [Weight-lifting cranes. Wind load capacity. Norms and measuring method (Amended)]. Moscow, Standartinform Publ., 2003, 13 p. (In Russian)
18. *State standard GOST R 53520–2009 (ISO 1496–4:1991). Konteinery gruzovye serii 1. Tekhnicheskie trebovaniia i metody ispytanii. Chast' 4. Konteinery dlia sypuchikh gruzov bez davleniia* [Series 1 cargo containers. Technical requirements and test methods. Part 4. Bulk-carriage no-pressure containers]. Moscow, Standartinform Publ., 2010, 36 p. (In Russian)

19. *Building regulations SP 316.1325800.2017. Terminaly konteiner nye. Pravila proektirovaniia* [Container terminals. Design guidelines]. Moscow, Standartinform Publ., 2018, 122 p. (In Russian)

20. *Building regulations SP 262.1325800.2016. Konteiner nye ploshchadki i terminal' nye ustroistva na predpriiatiakh promyshlennosti i transporta. Pravila proektirovaniia i stroitel'stva* [Container yards and terminal devices at industry and transport enterprises. Design and construction regulations]. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 28 p. (In Russian)

Received: September 07, 2020

Accepted: September 18, 2020

Author's information:

Gennadii O. PANOV – Senior Engineer;
pgo@engcenter.ru

Sergei M. TOLSTOV – Lead Engineer;
tolstovsm@mail.ru

Liudmila V. TSYGANSKAIA – PhD in
Engineering, Senior Lecturer;
tcyganskaya@gmail.com

Irina O. MOROZOVA – Junior Researcher;
filippova.io@yandex.ru

УДК 629.463.32

Повышение универсальности вагонов-цистерн для перевозки нефтехимических грузов

А. В. Песляк¹, Н. А. Битюцкий², М. Н. Сувернев³, А. Н. Фомин³

¹ ООО «БалтТрансСервис», Российская Федерация, 197229, Санкт-Петербург, Лахтинский пр., 85

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

³ ООО «ИЦВС-Сервис», Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 108, лит. А

Для цитирования: Песляк А. В., Битюцкий Н. А., Сувернев М. Н., Фомин А. Н. Повышение универсальности вагонов-цистерн для перевозки нефтехимических грузов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 477–489.

DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-477-489

Аннотация

Цель: Характеристика способов оптимизации парка вагонов-цистерн. Определение преимуществ, которые получает собственник при модернизации вагонов. Установить возможность повышения универсальности подвижного состава на примере модернизации вагонов-цистерн для перевозки нефтехимических грузов. **Методы:** Проводилось сравнение параметров эксплуатирующихся вагонов-цистерн для перевозки нефтехимических грузов и модернизированного вагона. Определялись элементы конструкции вагона, требующие модернизации для приведения в соответствие с действующими нормативными требованиями по перевозке грузов. Анализировались результаты расчетов и испытаний, проведена сертификация вагона. **Результаты:** Показаны пути модернизации вагонов-цистерн. Описаны основные элементы конструкции вагона, требующие модернизации. Проведены расчеты прочности, усталостной прочности и устойчивости. Рассчитана пропускная способность предохранительного клапана и сформированы требования к данному показателю при перевозке нефтехимических грузов. Установлена оптимальная конструкция сливного прибора. Выполнен комплекс натурных испытаний опытных образцов, включая ресурсные испытания, подтвердившие возможность безопасной эксплуатации модернизированного вагона в течение всего срока службы. Произведена сертификация вагона на соответствие требованиям безопасности железнодорожного подвижного состава. **Практическая значимость:** Проведенные исследования подтверждают возможность модернизации нефтебензиновых вагонов-цистерн под перевозку широкой номенклатуры грузов. Это позволит создать проект модернизации вагонов-цистерн. Новая модель вагона включена в Справочник моделей грузовых вагонов. По разработанному проекту модернизации собственник сможет осуществлять модернизацию вагонов.

Ключевые слова: Вагон-цистерна, нефтехимический груз, сливной прибор, предохранительный клапан, тормозная система вагона, перевозка опасных грузов.

После фактического запрета продления срока службы грузовых вагонов в 2014–2018 гг. производство новых вагонов в Российской Федерации неуклонно растет. Одним из массовых и постоянно пополняемых парков вагонов являются вагоны-цистерны для перевозки нефти и нефте-

продуктов – около 170 000 вагонов, или почти 70 % от общего числа вагонов-цистерн в РФ.

В то же время погрузка нефти и нефтепродуктов на железнодорожном транспорте из года в год снижается. Так, в 2019 г. она составила 232,0 млн т, что меньше, чем в 2018 г., на 1,9 %

(или 4,4 млн т), а за январь–август 2020 г. показатель падения составил 9%.

На понижение объемов погрузки нефтяных грузов влияет рост конкуренции со стороны альтернативных видов транспорта, прежде всего трубопроводного. Например, в 2019 г. в дополнение к имеющимся трубопроводам были введены в эксплуатацию нефтепродуктопровод до Комсомольского нефтеперерабатывающего завода и первый этап нефтепродуктопровода «Юг», что негативно отразилось на объемах перевозки сырой нефти и дизельного топлива железнодорожным транспортом. Таким образом, по оценкам специалистов, в ближайшие годы от движения будут отставлены до 20 000 вагонов-цистерн для перевозки нефти и нефтепродуктов.

Для сохранения баланса грузооборота и сокращения простоя подвижного состава собственникам и операторам необходима оптимизация парка вагонов-цистерн, находящихся в эксплуатации. Одним из примеров такой работы является постановка на производство проекта модернизации вагонов-цистерн моделей 15-150-21, 15-156 и 15-740-20 (далее – вагоны базовых моделей) для перевозки широкой номенклатуры грузов (нефти, нефтепродуктов и нефтехимических грузов).

Вагоны базовых моделей, изготовленные в 2002–2003 гг., эксплуатировались собственником ООО «БалтТрансСервис» в соответствии с их назначением для перевозки нефтепродуктов. В 2018 г. в связи с высвобождением части парка было принято решение об оптимизации парка вагонов-цистерн и их модернизации под перевозку широкой номенклатуры грузов. Проект модернизации был разработан Группой Компаний (ГК) «Инженерный Центр вагоностроения» (г. Санкт-Петербург) и поставлен на производство на производственных мощностях депо Иваново (ООО «БалтТрансСервис»).

Для реализации данного проекта, помимо традиционного комплекса работ, были поставлены и решены следующие задачи:

- проведен анализ технических параметров и конструктивных особенностей базовых моделей с целью подтверждения их идентичности;

- сформирован перечень грузов для перевозки в вагоне-цистерне после модернизации;

- осуществлен обзор вагонов-цистерн для перевозки нефтехимических грузов;

- выполнен анализ конструкций сливных приборов с тремя степенями защиты;

- разработана конструкция предохранительного клапана для установки на модернизированный вагон;

- проведена модернизация тормозной рычажной передачи вагона.

С целью установления идентичности вагонов-цистерн базовых моделей для модернизации вагонов по единому проекту на первом этапе были проанализированы их технические параметры и конструктивные особенности. Анализ конструктивных особенностей показал, что вагоны оборудованы парообогревательным кожухом, слив груза осуществляется через универсальный сливной прибор с двумя степенями защиты и на вагонах установлен предохранительный клапан. Вагоны-цистерны имеют схожие технические параметры, за исключением незначительных отличий по массе тары и грузоподъемности. Это связано с тем, что вагоны могли изготавливаться с применением несущих элементов (платформ и котлов) различных производителей, а также с тем, что вагоны моделей 15-150-21 и 15-740-20 уже проходили модернизацию (установка парообогревательного кожуха котла). Состав базовых моделей вагонов-цистерн в соответствии с конструкторской документацией 150.00.00.000, 156.00.00.000 и ГГ 780.00.000 представлен в табл. 1.

Анализ парка вагонов-цистерн позволил выявить, что в собственности ООО «БалтТрансСервис» находятся только вагоны, изготовленные с применением платформ по чертежу 149.14.00.000 (АО «НПК «Уралвагонзавод») и котлов по чертежу ГГ 740.00.00.000 (АО «Рухимаш»). На основании выполненной работы были установлены требования по отбору вагонов-цистерн в модернизацию с идентичными несущими элементами и присвоением

ТАБЛИЦА 1. Несущие элементы конструкции базовых моделей

Наименование элемента	Обозначение чертежа несущего элемента вагона-цистерны модели		
	15-150-21	15-156	15-740-20
Платформа	149.14.00.000 или 149.14.00.000-01		149.14.00.000 или 1220.00.00.000-04 или 3064.00.00.000-1 или 289.03.000.00
Котел	ГГ 740.00.00.000		ГГ 740.00.00.000 или 52.087.00.0000.000-01

модернизированным вагонам-цистернам единой модели 15-625.

На следующем этапе был сформирован перечень грузов, которые возможно перевозить в вагоне-цистерне после модернизации. В него перечень были включены 39 наименований нефтепродуктов и нефтехимических грузов. Выбор грузов проводился по следующим критериям: перевозка нефтехимических грузов в модернизированном вагоне технически возможна после модернизации; перевозка нефтепродуктов разрешена в базовых моделях вагонов; грузы должны выпускаться по ГОСТ для выполнения требований Федерального закона № 18-ФЗ [1].

Из грузов, разрешенных к перевозке в базовых моделях вагонов, были отобраны нефтепродукты, которые выпускаются по ГОСТ – всего 31 наименование груза, и сформирован перечень нефтехимических грузов, также выпускающихся по ГОСТ (табл. 2).

Оценка возможности перевозки нефтехимических грузов в базовых моделях вагонов проводилась с использованием программного комплекса ПК «Вагон-Груз» (www.wagon-cargo.ru). В результате было установлено, что перевозка возможна только при условии проведения модернизации. Кроме указанных грузов в дальнейшем в перечень разрешенных к перевозке также можно включить до 300 наименований других нефтехимических грузов.

По физико-химическим и опасным свойствам рассматриваемые нефтехимические грузы не являются коррозионно-активными (коррозия не превышает коррозии низколегированной ста-

ли в бензине – основном грузе базовых вагонов). В результате анализа выявлено, что в соответствии с [2] грузы относятся к легковоспламеняющимся жидкостям и допускаются к перевозке в вагонах-цистернах. Вагоны-цистерны (специальное условие 78 [2]) должны иметь нижний сливной прибор с тремя степенями защиты (третей затворами) или верхний слив и налив. Все рассматриваемые нефтехимические грузы совместимы с нефтепродуктами и не требуют отличных от ГОСТ 1510–84 [4] условий по подготовке и очистке после перевозки.

Следовательно, перевозить нефтехимические грузы в модернизированном вагоне-цистерне возможно совместно с нефтепродуктами, разрешенными к перевозке в базовых моделях.

Далее был проведен обзор и анализ эксплуатируемых в настоящее время вагонов-цистерн для широкой номенклатуры наливных грузов. На момент разработки проекта модернизации в соответствии со Справочником моделей грузовых вагонов (СМГР) [5] выпускались только две модели вагонов, в которых возможно перевозить подобный перечень наливных грузов – модель 15-1210-03 (АО «Рузхиммаш») и 15-5181 (АО «НПК «Уралвагонзавод») (табл. 3, рис. 1). Кроме этих моделей нефтехимические грузы можно перевозить в вагонах моделей 15-1547-22, 15-6900, 15-6900-01, однако в рассмотренных моделях вагонов не разрешена перевозка нефтепродуктов.

Выполненный обзор вагонов-цистерн для перевозки широкой номенклатуры грузов позволил сформировать перечень основных кон-

ТАБЛИЦА 2. Требования к перевозке грузов

Название груза	Номер ООН	Классификационный шифр	Класс опасности	Требования к конструкции вагона в соответствии с [2]	Код цистерны СМГС для груза*	Нормы прикрытия	Условия роспуска с сортировочной горки	Необходимость теневой защиты	Цистерны, рассчитанные на давление	Необходимость сопровождения
Ацетон	1090	3012	3	С верхним сливом или с универсальным сливным прибором с тремя степенями защиты	LGBF	0-0-1	Ро-спуск с горки разрешен	Установка не требуется	Нет	Нет
Толуол	1294									
Этилбензол	1175									
Бензол	1114	3013								
Бутанол	1120									
Спирт изобутиловый	1212									
Ксилолы	1307	3012, 3013								

* В коде цистерны в соответствии с [3] применяются следующие обозначения: L – вагон-цистерна для перевозки жидких грузов; В – вагон-цистерна с нижним сливным прибором с тремя затворами; F – вагон-цистерна с дыхательным клапаном, с пламегасящим устройством.

ТАБЛИЦА 3. Основные отличия технических параметров вагонов моделей 15-1210-03 и 15-5181

Наименование параметра	Значение для вагона модели	
	15-1210-03	15-5181
Масса тары, т	26,7–28,0	26,3 ^{+0,2} _{-0,8}
Грузоподъемность, т, не более	66,0	73,5
Максимальная расчетная статическая нагрузка на ось, кН (тс)	230,5 (23,5)	245 (25)
Объем котла, м ³ : полный полезный	73,0 70,9	76,4 74,87
Габарит по ГОСТ 9238–2013 [6]	02-ВМ	1-Т
Модель двухосной тележки	18-100	18-194-1
Наличие предохранительно-впускного клапана	Есть	Нет
Наличие предохранительного клапана	Нет	Есть
Наличие вакуумного (впускного) клапана	Нет	Есть

а*б*

Рис. 1. Вагон-цистерна:
а – модель 15-1210-03; *б* – модель 15-5181

структивных особенностей вагонов, к которым были отнесены наличие паровобогревательного кожуха (рубашки), предохранительного и впускного или предохранительно-впускного клапанов, установка нижнего сливного прибора с тремя степенями защиты (с тремя затворами).

На основании анализа конструкции базовых вагонов-цистern, оценки свойств и транспортной опасности предполагаемых к перевозке грузов и обзора существующих моделей вагонов-цистern для перевозки широкой номенклатуры грузов были сформированы основные

направления модернизации: установка или модернизация сливного прибора с тремя степенями защиты; замена предохранительного клапана, позволяющего осуществлять эксплуатацию вагона в широком диапазоне свойств нефтехимических грузов; усиление несущей металлоконструкции вагона, необходимость которого определяется по результатам расчетов и натурных испытаний опытных образцов.

Таким образом, на следующем этапе был проведен анализ конструкции сливных приборов с тремя степенями защиты для размещения на модернизируемых вагонах и выполнен расчет установленного предохранительного клапана для проверки соответствия нормативным требованиям.

Сливные приборы с тремя степенями защиты [7] в настоящее время выпускаются несколькими предприятиями на территории РФ и государств СНГ: АО Корпорация «Сплав», АО «ЭПФ Судотехнология», АО «Ружжимаш», ЧАО «Азовмаш» и др.

Анализ конструктивных особенностей сливных устройств с тремя степенями защиты (затворами) выявил, что большинство устройств, за исключением затвора АО «ЭПФ Судотехнология», обладают общими недостатками, среди которых следует выделить увеличенное время разгрузки вязких и застывающих грузов за счет уменьшения проходного сечения и отсутствие возможности разогрева груза через сливное устройство с использованием штатного оборудования эстакад слива–налива (гидромонитора). Кроме того, АО «ЭПФ Судотехнология» обладает проектом затвора, позволяющим модернизировать классический сливной прибор путем установки дополнительной третьей степени защиты.

В результате проведенного анализа в рамках разработанного проекта была выбрана модернизация существующего сливного прибора с установкой третьего затвора. Затвор имеет запорный орган в виде поворотной тарелки с седлом, которая наклонно размещается во входном патрубке, и содержит механизм принудительного закрытия–открытия, содержащий шток с

выходящим через крышку концом под съемную рукоятку.

С целью обоснования выбора предохранительного клапана, обеспечивающего необходимую пропускную способность при перевозке нефтехимических грузов, была определена его пропускная способность. Расчет выполнялся в соответствии с нормативными требованиями, предъявляемыми к сосудам, работающим под давлением [8], и требованиями к цистернам для перевозки опасных грузов [3]. В результате было установлено, что пропускная способность (G) предохранительного клапана в большей степени зависит от свойств нефтехимических грузов и должна составлять не менее 1898 кг/ч (по бензолу) из условия пожара вблизи вагона. В связи с тем, что на момент разработки проекта модернизации предохранительный клапан, размещенный на базовых вагонах, не обеспечивал расчетные параметры ($G = 484\text{--}616$ кг/ч), а другие клапаны, которые могли работать в нефтехимических средах, отсутствовали, ГК «Инженерный Центр вагоностроения» совместно с ООО «Т-АРМ» был создан новый предохранительный клапан. Расчет такого клапана с учетом возможности эксплуатации в различных нефтехимических средах показал, что пропускная способность устройства удовлетворяет требованиям нормативных документов ($G = 6053$ кг/ч) и клапан может ставиться на вагоны для перевозки широкой номенклатуры грузов – бензола, ксилола, ацетона, бензина и других грузов с соблюдением всех нормативных требований.

Далее был выполнен комплекс работ по постановке на производство проекта модернизации вагонов, предусмотренных в [9], включающий в себя в том числе анализ результатов диагностирования технического состояния вагонов, расчетные исследования конструкции и экспериментальную проверку соответствия вагона.

Анализ результатов диагностирования проводился на основании данных, полученных по результатам обследования технического состояния вагонов-цистерн базовых моделей собственности ООО «БалтТрансСервис». Лабораторией неразрушающего контроля ООО «ЭЦПС»

(Санкт-Петербург) было изучено техническое состояние более 50 вагонов-цистерн моделей 15-150-21, 15-156 и 15-740-20. В результате обследования выявлено, что у вагонов отсутствуют повреждения, требующие внесения изменений в несущую конструкцию, при этом коррозионный износ основных элементов конструкции не превышает норм, установленных для вагонов, перевозящих нефтепродукты.

С учетом проведенных предпроектных исследований на следующем этапе определялось конструктивное исполнение модернизируемых вагонов. Основные изменения конструкции коснулись элементов котла – установка третьего затвора сливного прибора и замена предохранительного клапана, а экипажная часть вагона модернизации не подвергалась. При установке третьего затвора сливного прибора было выявлено касание деталей затвора и крышки (нижнего затвора) элементами тормозной рычажной передачи. Для восстановления эффективности тормозной системы в проект модернизации была включена модернизация автоматического тормоза вагона. При модернизации изменениям подвергались тяги тормозной рычажной передачи базовых вагонов.

С целью подтверждения возможности реализации вносимых изменений в конструкцию вагона на следующем этапе проведены расчетные исследования. Для этого была сформирована конечно-элементная модель модернизированного вагона и проведен комплекс расчетов в соответствии с «Нормами...» [10] и ГОСТ 33211–2014 [11]. Расчеты прочности, усталостной прочности и устойчивости выполнялись с использованием специализированного программного обеспечения ANSYS. В связи с тем, что выявленный при диагностировании коррозионный износ несущих элементов котла находился на уровне коррозии в атмосферном воздухе, в качестве максимально возможного коррозионного износа была принята величина 0,04 мм/год (как для цистерн, перевозящих нефтепродукты).

Результаты расчетов показали, что наиболее нагруженным элементом конструкции вагона

является хребтовая балка за шкворневым узлом ($\sigma_{\text{экв}} = 269$ МПа), что менее допускаемого значения ($\sigma_{\text{норм}} = 345$ МПа). Минимальный коэффициент запаса устойчивости по [10] при квазистатическом сжатии с силой 2,5 МН (первый расчетный режим) установлен в средней части боковой балки и составил 2,7 (рис. 2, а), а при действии внешнего давления 0,04 МПа (второй расчетный случай) – 2,24 при допускаемом 1,1 (рис. 2, б).

Коэффициенты запаса устойчивости по [11] составили 2,72 (режим Iv) и 2,24 (внешнее давление 0,021 МПа) при допускаемых 1,1 и 1,5 соответственно.

Минимальный коэффициент запаса сопротивления усталости по [10] был установлен на хребтовой балке (перед шкворневой) – 1,83, по [11] – в верхнем листе шкворневой балки и был равен 1,54 при минимально допускаемых 1,8 и 1,5 соответственно.

По результатам проведенных расчетов был сделан однозначный вывод о том, что модернизированный вагон, несущая конструкция которого была спроектирована в соответствии с требованиями, действующими при постановке на производство базовых вагонов в конце 1990-х – начале 2000-х годов, по нормируемым параметрам прочности и устойчивости соответствует действующим нормативным требованиям [10, 11] и не требует дополнительного усиления конструкции. Выполненный расчет тормозной системы после модернизации (изменение размера тяг) подтвердил ее эффективность.

На заключительном этапе для подтверждения полученных результатов расчетов осуществлена экспериментальная проверка соответствия конструкции опытного образца модернизированного вагона. Для этого в депо Иванovo была проведена модернизация двух опытных образцов вагонов моделей 15-740-20 и 15-150-21 с присвоением нового обозначения модели 15-625 и проведен следующий комплекс испытаний: на прочность при действии статических нагрузок; на прочность при соударении; расчетно-экспериментальная оценка сопротивления усталости; стационарные тормозные, хо-

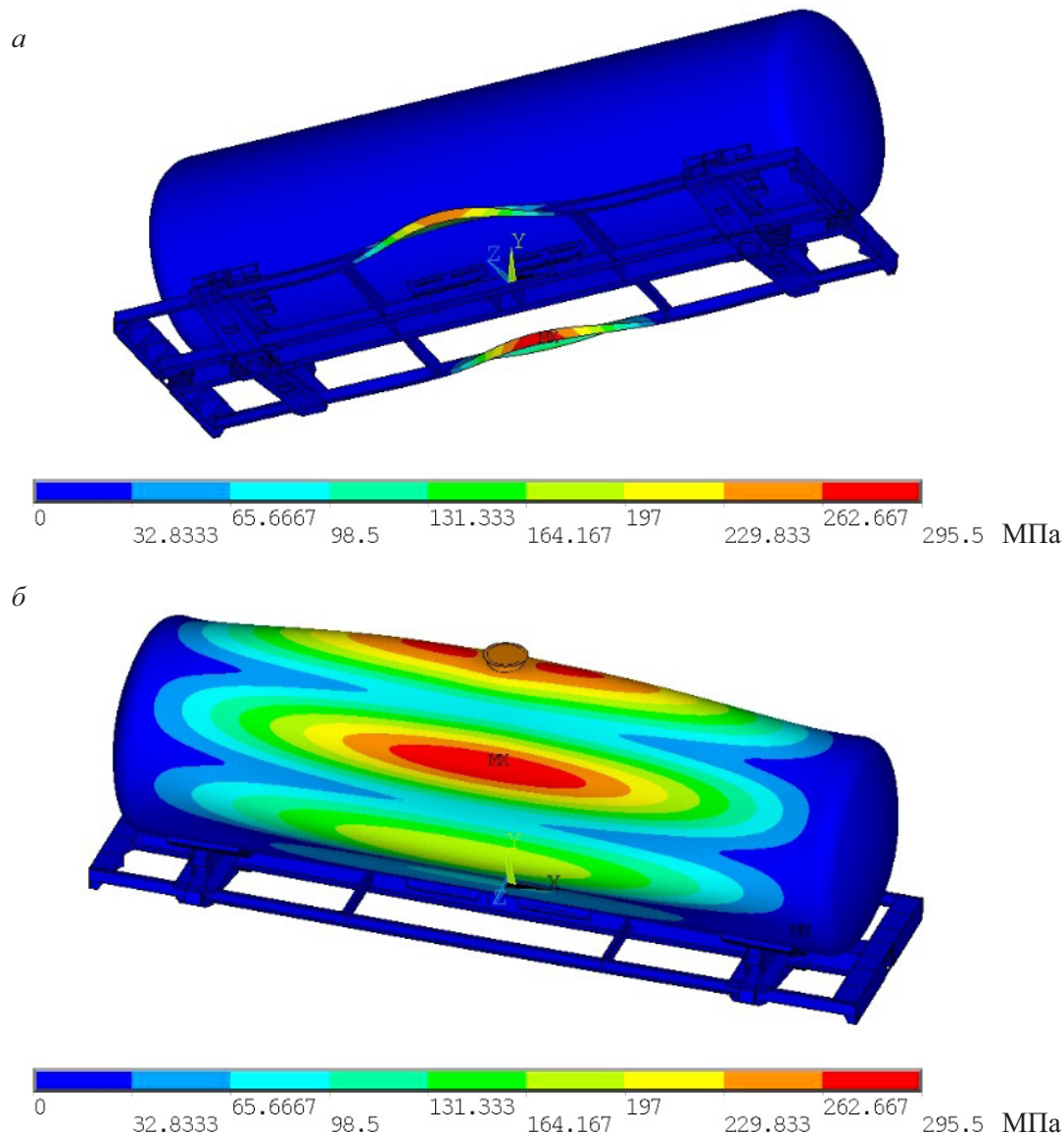


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений:
а – при продольной сжимающей нагрузке; *б* – при внешнем давлении 0,04 МПа

довые (динамические, прочностные и тормозные) и ресурсные испытания.

Статические испытания на прочность при действии вертикальной нагрузки от веса груза проводились путем загрузки вагона-цистерны водой, что позволило осуществить испытания при максимальной грузоподъемности – 65 т. Испытания на прочность (при действии горизонтальных продольных растягивающих и сжимающих нагрузок) проводились на стенде растяжения–сжатия вагонов (рис. 3, в), обеспе-

чивающем продольную сжимающую нагрузку не менее 2,5 МН и продольную растягивающую нагрузку не менее 2,0 МН. При испытаниях на прочность при соударении (рис. 3, а) были реализованы два режима соударения с груженым вагоном-бойком: соударение в свободностоящий груженный вагон и соударение в груженный вагон, стоящий в подпоре.

Ходовые испытания порожнего и груженого вагонов (рис. 3, б) проводились на испытательном полигоне Белореченская – Майкоп. Резуль-

а*б**в*

Рис. 3. Испытания вагона-цистерны модели 15-625:
а – испытания на прочность при соударении; *б* – ходовые испытания;
в – испытания на прочность в стенде растяжения–сжатия

таты испытаний показали, что динамические показатели вагона при допускаемых скоростях движения удовлетворяют нормативным требованиям (табл. 4).

Дополнительно в рамках экспериментальной проверки для подтверждения срока службы 32 года были произведены ресурсные испытания вагона-цистерны. Необходимость в проведении данных испытаний обусловлена ранее общепринятым подходом к установке срока службы химических вагонов-цистерн, кото-

рый определялся, исходя из нормативных сроков обновления (нижний предел срока службы с учетом морального износа) вагонов-цистерн, установленных Минтяжмашем СССР в XX в., и составлял 24 года.

В связи тем, что на момент проведения испытаний вагоны находились в эксплуатации более 16 лет, при ресурсных ударных испытаниях было имитировано нагружение, соответствующее 16,01 годам эксплуатации вагона, что с учетом срока фактической эксплуатации вагона со-

ТАБЛИЦА 4. Результаты ходовых динамических и тормозных испытаний

Контролируемая характеристика (параметр)	Значение параметра	
	по НД	фактическое
Коэффициент вертикальной динамики при скорости 120 км/ч на прямых участках пути: вагон в порожнем состоянии вагон в груженом состоянии	Не более 0,75 Не более 0,65	0,63 0,43
Минимальный коэффициент устойчивости колеса от схода с рельсов в прямых и кривых участках пути	Не менее 1,30	1,97
Коэффициент устойчивости вагона от опрокидывания при движении по кривым участкам пути	Не менее 1,30	2,10
Тормозной путь: порожний режим груженный режим	Не более 889 Не более 1066	828 969

ставило более 32 лет назначенного срока службы вагона. Расчетное суммарное повреждение при соударениях за 16-летний срок эксплуатации $D = 363\,967$. В результате сделан вывод, что срок службы вагона-цистерны обеспечивается при условии проведения плановых видов ремонта в установленные конструкторской документацией сроки.

Было обнаружено, что напряжения в элементах конструкции опытного образца вагона-цистерны модели 15-625 при статических испытаниях и испытаниях на прочность при соударении не превышают максимально допускаемых значений, динамические показатели вагона удовлетворяют нормативным требованиям. Сравнительный анализ показал, что максимальное расхождение экспериментальных и расчетных напряжений не превышает 11 %, а это свидетельствует о достоверности разработанной расчетной модели и корректности проведенных ранее расчетов. Результатами испытаний были подтверждены расчетные исследования, в том числе в части отсутствия необходимости усиления несущей металлоконструкции вагона.

На основании положительных результатов испытаний вагон-цистерны модели 15-625 успешно прошел процедуру сертификации по требованиям технического регламента [12] и включен в Справочник СМГР [5].

Результаты проведенных работ дают возможность утверждать, что повышение универсальности вагонов-цистерн представляет собой один из самых эффективных способов оптимизации парка грузового подвижного состава. Модернизация нефтебензиновых вагонов-цистерн способствует сокращению потерь собственника и оператора от падения объема перевозок нефтяных грузов путем перепрофилирования части эксплуатируемого парка вагонов под перевозку широкой номенклатуры нефтехимических грузов. Данный подход позволяет существенно сократить затраты от простоя подвижного состава и его порожний пробег, а также минимизировать искусственное наращивание парка специализированных вагонов, увеличивая при этом пропускную способность железнодорожной инфраструктуры ОАО «РЖД».

Библиографический список

1. Федеральный закон от 10 января 2003 г. № 18-ФЗ «Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации». – Принят 24 декабря 2002 г. – URL : <https://fzrf.su/zakon/ustav-zheleznodorozhnogo-transporta-18-fz/> (дата обращения : 01.09.2020 г.).
2. Правила перевозок опасных грузов по железным дорогам. – Утв. Советом по железнодорожному

транспорту государств-участников Содружества, Протокол от 05 апреля 1996 г. № 15. – URL : <https://www.mintrans.gov.ru/documents/7/827> (дата обращения : 01.09.2020 г.).

3. Правила перевозок опасных грузов. Приложение 2 к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС), ОСЖД. – URL : <https://osjd.org/ru/8978/page/106077?id=2247> (дата обращения : 01.09.2020 г.).

4. ГОСТ 1510–84. Нефть и нефтепродукты. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение. – М. : Стандартинформ, 2010. – 34 с.

5. Справочник моделей грузовых вагонов (СМГР). – Утв. Комиссией Совета по железнодорожному транспорту полномочных специалистов вагонного хозяйства железнодорожных администраций, Протокол заседания от 10–11 июля 2002 г. – URL : <https://transprog.ru/spravochniki/> (дата обращения : 01.09.2020 г.).

6. ГОСТ 9238–2013. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений. Введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2013 г. № 1608-ст. – М. : Стандартинформ, 2014. – 177 с.

7. Федоров С. А. Совершенствование сливных устройств вагонов-цистерн для перевозки нефтепродуктов / С. А. Федоров, А. Ф. Дроздов // Развитие методов проектирования и внедрение новых видов ремонта грузовых специализированных вагонов : сб. науч. трудов / под ред. А. А. Битюцкого. – СПб. : Инженерный центр вагоностроения, 2008. – Вып. 4. – С. 55–63.

8. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением». – Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 25 марта 2014 г. № 116. – URL : <http://www.gosnadzor.ru/industrial/equipment/acts/> (дата обращения : 01.09.2020 г.).

9. ГОСТ 15.902–2014. Система разработки и постановки продукции на производство (СПП). Железнодорожный подвижной состав. Порядок разработки и постановки на производство. – Введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 ноября 2014 г. № 1494-ст. – М. : Стандартинформ, 2019. – 40 с.

10. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – Утв. МПС РФ, 1996 г., действуют с 01 июля 1996 г. – М. : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 317 с.

11. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии 5 июня 2015 г. № 565-ст. – М. : Стандартинформ, 2016. – 58 с.

12. Технический регламент Таможенного Союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава» ТР ТС 001/2011. – Утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710. – URL : http://www.tsouz.ru/kts/kts29/documents/p_710_9.pdf (дата обращения : 01.09.2020 г.).

Дата поступления: 15.09.2020

Решение о публикации: 29.09.2020

Контактная информация:

ПЕСЛЯК Александр Владимирович – зам. директора представительства ООО «БалтТранс-Сервис» в г. Москва; info@bts.ru

БИТЮЦКИЙ Никита Александрович – канд. техн. наук, доцент, исполнительный директор; bna@engcenter.ru

СУВЕРНЕВ Михаил Николаевич – руководитель конструкторского отдела; smn@engcenter.ru

ФОМИН Алексей Николаевич – инженер-конструктор; fan@engcenter.ru

Increasing universality of tank wagons designed to transport petrochemical cargoes

A. V. Pesliak¹, N. A. Bitiutskii², M. N. Suvernev³, A. N. Fomin³

¹ BaltTransServis LLC, 85, Lakhtinsky pr., Saint Petersburg, 197229, Russian Federation

² Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

³ Railcar-Building Engineering Centre LLC, 108, lit. A, Fontanka River nab., Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

For citation: Pesliak A. V., Bitiutskii N. A., Suvernev M. N., Fomin A. N. Increasing universality of tank wagons designed to transport petrochemical cargoes. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 4, pp. 477–489. (In Russian)
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-477-489

Summary

Objective: Characterise the methods for optimisation of tank wagon fleet. Determine the advantages obtained by the proprietor from wagon modernization. Establish the opportunity for increasing universality of rolling stock on the example of modernisation of tank wagons designed to transport petrochemical cargoes. **Methods:** Parameters of tank wagons for petrochemical cargo transportation in operation were compared to those of a modernised wagon. Structural elements of a wagon that require modernisation to be consistent with current regulatory requirements were identified. Results of calculations and tests were analysed, and wagon certification was carried out. **Results:** Ways of modernisation of tank wagons are shown. Primary wagon structural elements that require modernisation are described. Strength, fatigue strength and stability calculations were carried out. Safety valve throughput capacity is calculated, and requirements for this index during transportation of petrochemical cargoes. Optimum design for a drain device is established. A series of engineering prototype verification tests in situ was run, including durability tests which confirmed the possibility of safe operation of a modernised wagon throughout its service life. The wagon was certified for compliance with railway rolling stock safety requirements. **Practical importance:** The studies conducted confirm possibility of modernisation of petroleum and oil tank wagons for transportation of a wide range of cargoes. This would allow create a project for tank wagon modernisation. The novel wagon type is included in the Cargo Wagon Design Reference Guide. Proprietor can implement modernisation of wagons in accordance with the developed modernisation project.

Keywords: Tank wagon, petrochemical cargo, drain device, safety valve, wagon braking system, transportation of dangerous cargoes.

References

1. *Ustav zheleznodorozhnogo transporta Rossiiskoi Federatsii* [Charter of the railway transport of the Russian Federation]. Federal law enacted on January 10, 2003, N 18-FZ, passed on December 24, 2002. Available at: <https://fzrf.su/zakon/ustav-zheleznodorozhnogo-transporta-18-fz/> (accessed: September 01, 2020). (In Russian)
2. *Pravila perevozok opasnykh грузов po zheleznym dorogam* [Rules for transporting dangerous cargoes on

the railways]. Adopted by the Railway Transport Council of Commonwealth of Independent States member states, Protocol N 15, April 05, 1996. Available at: <https://www.mintrans.gov.ru/documents/7/827> (accessed: September 01, 2020). (In Russian)

3. *Pravila perevozok opasnykh грузов. Prilozhenie 2 k Soglasheniiu o mezhdunarodnom zheleznodorozhnom грузовом сообщении, OSZhD* [Rules for transportation of dangerous cargoes. Supplement 2 to the Agreement on international railway cargo traf-

fic, Organisation for Cooperation between Railways]. Available at: <https://osjd.org/ru/8978/page/106077?id=2247> (accessed: September 01, 2020). (In Russian)

4. State standard GOST 1510–84. *Neft' i nefteprodukty. Markirovka, upakovka, transportirovanie i khranenie* [Oil and oil products. Labelling, packing, transportation and storage]. Moscow, Standartinform Publ., 2010, 34 p. (In Russian)

5. *Spravochnik modelei gruzovykh vagonov* [Directory of cargo wagons designs]. Approved by the Commission of plenipotentiary specialists of wagon rolling stock of railway administrations of the Council for railway transport. Protocol of the meeting, July 10–11, 2002. Available at: <https://transprog.ru/spravochniki/> (accessed: September 01, 2020). (In Russian)

6. State standard GOST 9238–2013. *Gabarity zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i priblizheniia stroenii* [Railway rolling stock and structure clearance gauge]. Enacted as a Russian Federation national standard by the order of the Federal Agency for Technical Regulating and Metrology dated November 22, 2013, N 1608-st. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 177 p. (In Russian)

7. Fedorov S. A. & Drozdov A. F. *Sovershenstvovanie slivnykh ustroistv vagonov-tsistern dlia perevozki nefteproduktov* [Perfecting drain devices of tank wagons for transportation of oil products]. *Razvitie metodov proektirovaniia i vnedrenie novykh vidov remonta gruzovykh spetsializirovannykh vagonov. Sb. nauchnykh trudov* [Development of design methods and introduction of new types of repair of specialised cargo wagons. Coll. res. papers]. Ed. by A. A. Bitiutskii. St. Petersburg, Inzhenernyy tsentr vagonostroeniia [Railcar-Building Engineering Centre] Publ., 2008, iss. 4, pp. 55–63. (In Russian)

8. *Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti "Pravila promyshlennoi bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov, na koto-rykh ispol'zuetsia oborudovanie, rabotaiushchee pod izbytochnym davleniem"* [Federal industrial safety norms and rules "Rules for industrial safety of hazardous production facilities at which equipment working under excess pressure is used"]. Approved by the order of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia on March 25, 2014, N 116. Available at: <http://www.gosnadzor.ru/industrial/equipment/acts/> (accessed: September 01, 2020). (In Russian)

9. State standard GOST 15.902–2014. *Sistema razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo (SRPP). Zheleznodorozhnyi podvizhnoi sostav. Poriadok razrabotki i postanovki na proizvodstvo* [System of product development and pilot production. Railway rolling stock. Procedure of development and pilot production]. Enacted as a Russian Federation national standard by the order of the Federal Agency for Technical Regulating and Metrology dated November 10, 2014, N 1494-st. Moscow, Standartinform Publ., 2019, 40 p. (In Russian)

10. *Normy dlia rascheta i proektirovaniia vagonov zheleznynykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [Norms for calculating and designing wagons of 1520 mm-gauge Transportation Ministry railways (non-self-propelled)]. Moscow, GosNIIV-VNIIZhT Publ., 1996, 317 p. (In Russian)

11. State standard GOST 33211–2014. *Vagony gruzovye. Trebovaniia k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [Cargo wagons. Requirements for strength and dynamic properties]. Enacted as a Russian Federation national standard by the order of the Federal Agency for Technical Regulating and Metrology dated June 05, 2015, N 565-st. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 58 p. (In Russian)

12. "O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava" [On railway rolling stock safety], Customs Union technical regulation TR TS 001/2011. Approved by the Customs Union Commission, July 15, 2011, N 710. Available at: http://www.tsouz.ru/kts/kts29/documents/p_710_9.pdf (accessed: September 01, 2020). (In Russian)

Received: September 15, 2020

Accepted: September 29, 2020

Author's information:

Aleksandr V. PESLIAK – Deputy Director of the BaltTransServis LLC Moscow representative office; info@bts.ru

Nikita A. BITIUTSKII – PhD in Engineering, Senior Lecturer, Executive Director; bn@engcenter.ru

Mikhail N. SUVERNEV – Design Engineering Department Head; smn@engcenter.ru

Aleksei N. FOMIN – Design Engineer; fan@engcenter.ru

УДК 621.833.15

Модернизация осей типа РУ1 с целью обеспечения их дальнейшего использования

И. В. Федоров, А. А. Воробьев, О. А. Конограй

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

Для цитирования: Федоров И. В., Воробьев А. А., Конограй О. А. Модернизация осей типа РУ1 с целью обеспечения их дальнейшего использования // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 490–497. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-490-497

Аннотация

Цель: Разработка предложений по модернизации старотипных осей типа РУ1 для их дальнейшего использования. **Методы:** Применяется анализ конструкций. **Результаты:** Разработаны предложения по дальнейшему использованию старотипных осей типа РУ1, увеличению срока их эксплуатации. **Практическая значимость:** Предложенная модернизация позволит продлить использование старотипных осей РУ1 после модернизации с новым торцевым креплением подшипников и снизить потребность в новых осях, что позволит снизить дефицит осей при капитальном ремонте колесных пар.

Ключевые слова: Ось, колесная пара, торцевое крепление подшипников, корончатая гайка, тарельчатая шайба.

Введение

Российская Федерация и страны СНГ сталкиваются при капитальном ремонте колесных пар с дефицитом осей. Одна из основных причин такого дефицита осей – введение с 1 января 2017 г. запрета на использование старотипных осей РУ1 ГОСТ 22780–93 [1] (сняты с производства, но находятся в эксплуатации) при формировании колесных пар [2]. Согласно определению, данному в современных нормативных документах на ремонт колесных пар [2], формирование колесной пары – технологический процесс установки колес на ось методом прессовой посадки. Таким образом, даже если ось находится в технически исправном состоянии и не требует ремонта, а капитальный ремонт выполняется с целью замены колеса, то ось все равно бракуется и не может более применяться [3, 4]. Поэтому у ремонтных предприятий возникает повышенный спрос на новые

оси колесных пар для замены осей типа РУ1. Собственники подвижного состава при ремонте несут дополнительные затраты на приобретение новых осей. Сложившаяся ситуация делает актуальной разработку проекта модернизации осей типа РУ1 для обеспечения их дальнейшего использования.

Особенности колесных пар, эксплуатирующихся под грузовыми вагонами

Под грузовыми вагонами с осевой нагрузкой до 23,5 тс/ось на тележках модели 18-100 (или их аналогах) эксплуатируются колесные пары РУ1Ш-957-Г ГОСТ 4835–2013 [5] с осями типа РУ1Ш ГОСТ 33200–2014 [6], изготавливаемые промышленностью, а также старотипные колесные пары РУ1-957-Г с осями типа РУ1 ГОСТ 22780–93 (в настоящее время не действуют),

которые не производятся с 1993 г., но находятся в эксплуатации. Нормативного срока службы осей в документации на их изготовление или ремонт не установлено. Как показывает опыт, ось может эксплуатироваться в течение 40 лет, поэтому еще встречается большое количество колесных пар РУ1-957-Г.

Отличаются колесные пары РУ1-957-Г и РУ1Ш-957-Г способом торцевого крепления подшипников буксового узла. У колесной пары РУ1-957-Г торцевое крепление подшипников осуществляется за счет корончатой гайки (рис. 1, *а*), у РУ1Ш-957-Г (рис. 1, *б*) – благодаря тарельчатой шайбе. Различные способы торцевого крепления подшипников приводят к различиям в конструкциях осей РУ1 (рис. 2, *а*) и РУ1Ш (рис. 2, *б*).

Колесные пары РУ1-957-Г и РУ1Ш-957-Г взаимозаменяемы, имеют одинаковые габаритные размеры. Подшипники в обеих колесных парах используются одинаковые (размеры подшипника C и D , d , d_1 на рис. 1, *а* и *б* совпадают). Как видно из рис. 1, между внутренним кольцом переднего подшипника и тарельчатой шайбой (или гайкой) установлено плоское упорное кольцо.

Оси РУ1 и РУ1Ш отличаются габаритным размером L_1 (у РУ1 $L_1 = 2294$ мм, у РУ1Ш $L = 2216$ мм) и длиной шейки (размер l_1), которая составляет 176 мм у оси РУ1 и 190 мм у оси РУ1Ш. То есть шейка осей РУ1Ш на 14 мм длиннее. В остальном размеры основных элементов оси совпадают.

Опыт эксплуатации показал, что торцевое крепление с помощью гайки менее надежное. Поэтому принимаются меры по выводу колесных пар РУ1-957-Г из эксплуатации. Однако это может привести к возникновению дефицита осей.

Предложения по модернизации осей типа РУ1

Так как запрет использования при формировании осей РУ1 привел к дефициту осей, появились предложения отменить данное ре-

шение. Но в этом случае в эксплуатации будет присутствовать большое количество колесных пар с пониженной надежностью. Целесообразно произвести модернизацию осей РУ1 с целью перехода на торцевое крепление с помощью тарельчатой шайбы.

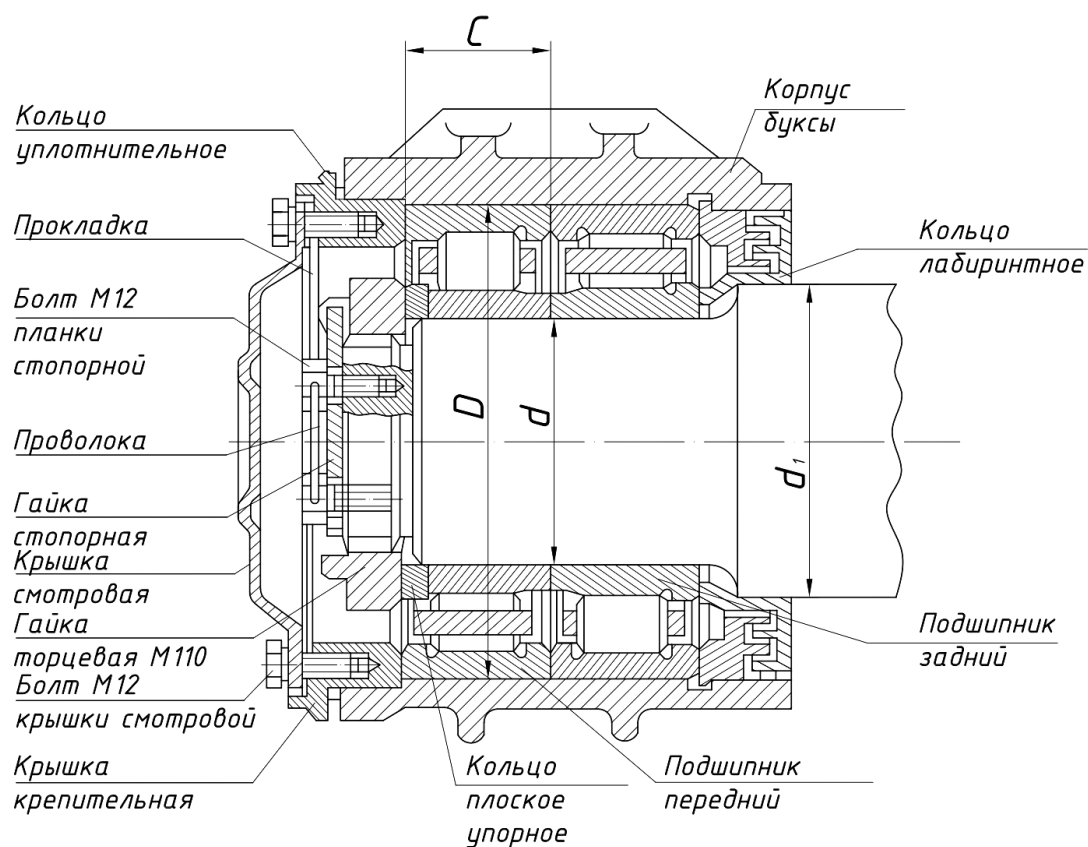
Здесь уместно вспомнить опыт перехода с подшипников скольжения на подшипники качения, когда оси колесных пар с подшипниками скольжения не сдавались в металлолом, как происходит сейчас с осями РУ1, а перетачивались под подшипники качения [7–9]. Данные оси назывались осями III типа.

Основным препятствием к модернизации оси РУ1 под торцевое крепление шайбой является более короткая шейка оси РУ1 [10]. Если удалить резьбовую часть оси РУ1 и выполнить на торце оси отверстия под крепежные болты, то смонтировать буксовый узел в соответствии с рис. 1, *б* не получится, невозможно будет установить упорное кольцо. Произвести наплавку или приварку дополнительного элемента на торцевую часть оси затруднительно, так как оси изготавливаются из высокоуглеродистой плохо свариваемой стали [11].

В настоящее время эксплуатируются колесные пары с кассетными и сдвоенными подшипниками [12]. Торцевое крепление подшипников осуществляется благодаря тарельчатой шайбе, но без применения упорного кольца (рис. 3). Тарельчатая шайба непосредственно упирается во внутреннее кольцо подшипника. Упорное кольцо было необходимо при торцевом креплении с помощью гайки, при использовании шайбы без него можно обойтись. Для этого нужно изменить тарельчатую шайбу. Отсутствие упорного кольца только повышает надежность буксового узла за счет отсутствия лишней детали между элементом крепления и кольцом подшипника.

Для проведения модернизации осей РУ1 тарельчатую шайбу следует установить, как показано на рис. 3, без плоского упорного кольца. В этом случае возможно смонтировать буксовый узел с торцевым креплением тарельчатой шайбой на торце оси РУ1, после удаления резьбовой части. Модернизация осей РУ1 позволит

а



б

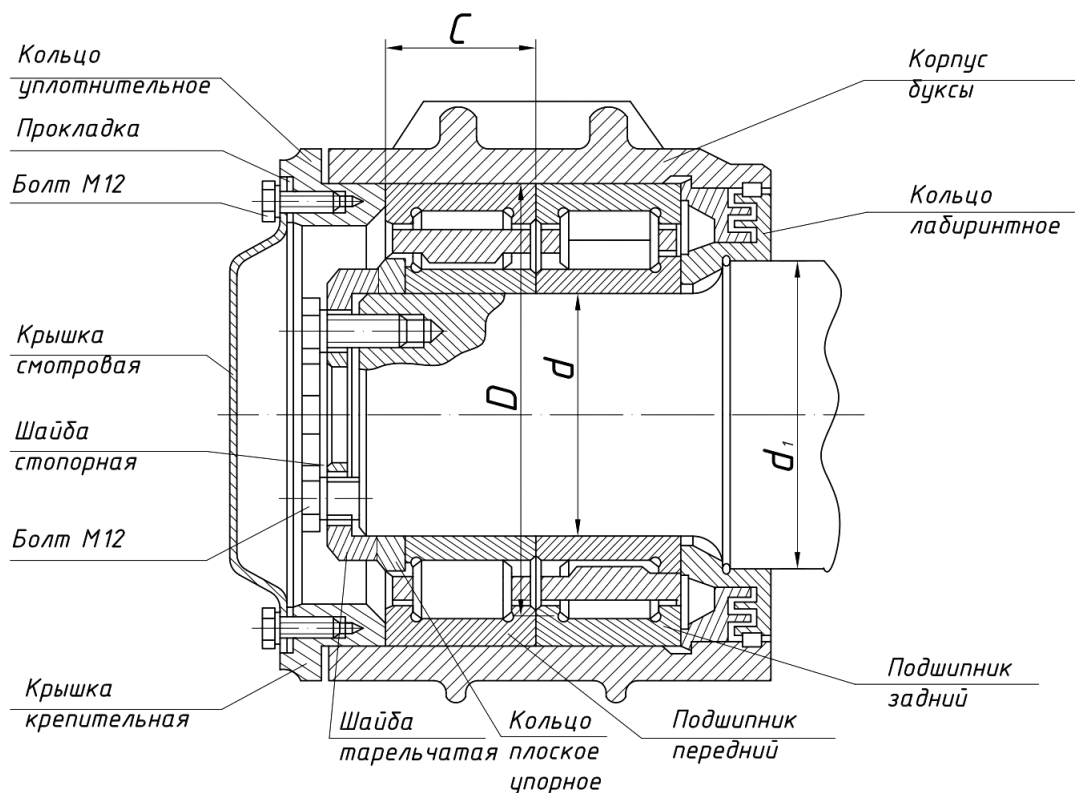
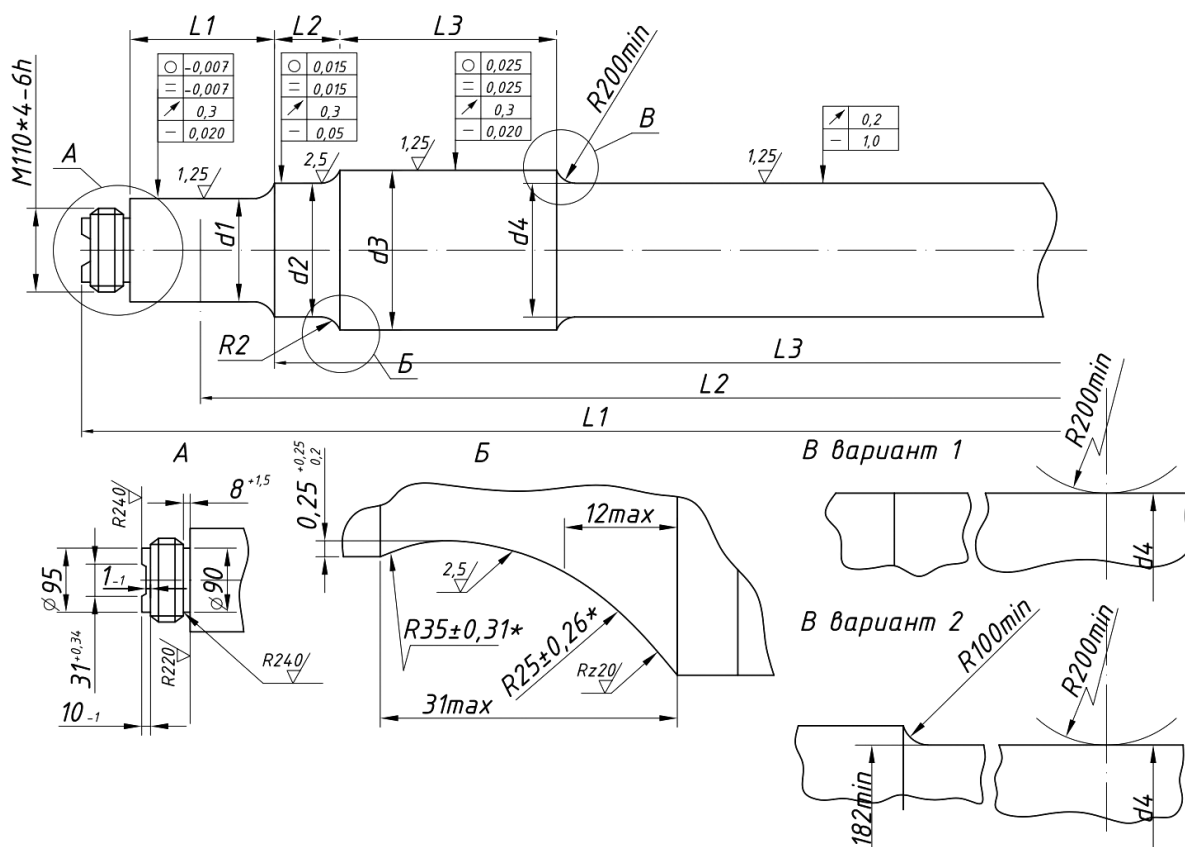


Рис. 1. Буксовый узел колесной пары РУ1-957-Г (а) и РУ1Ш-957-Г (б)

а



б

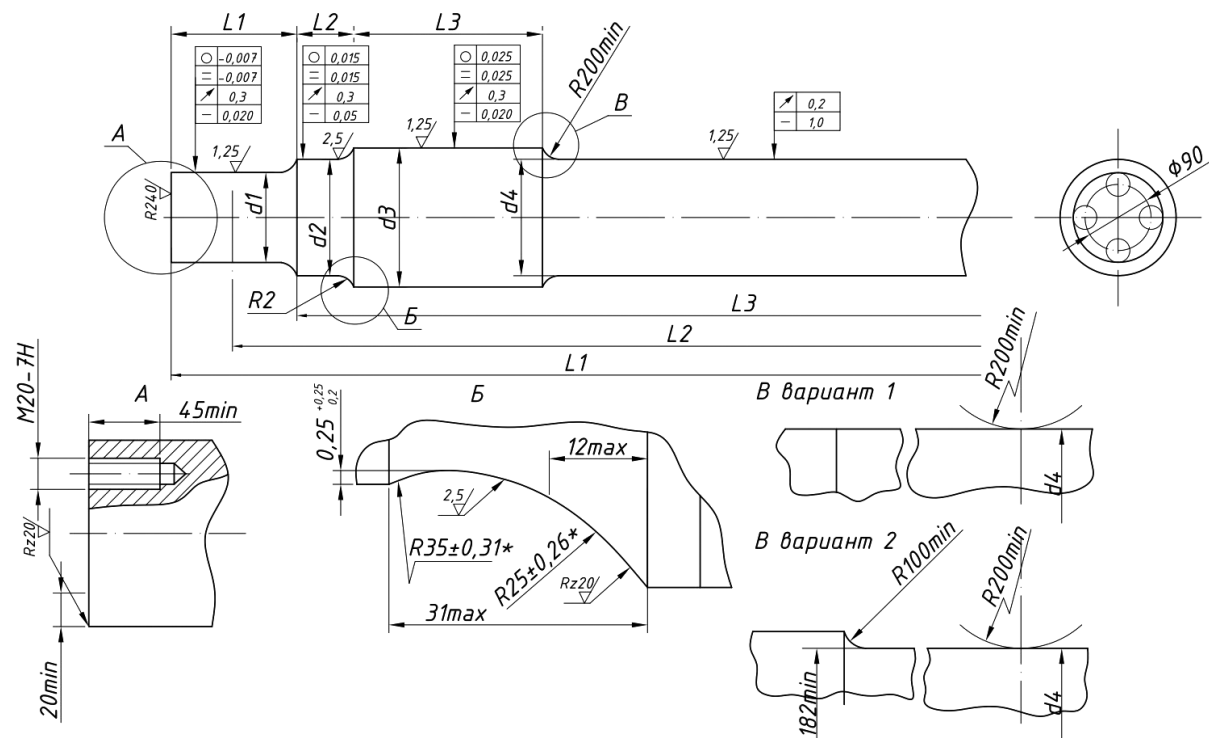


Рис. 2. Конструкция оси РУ1 (а) и РУ1Ш (б)

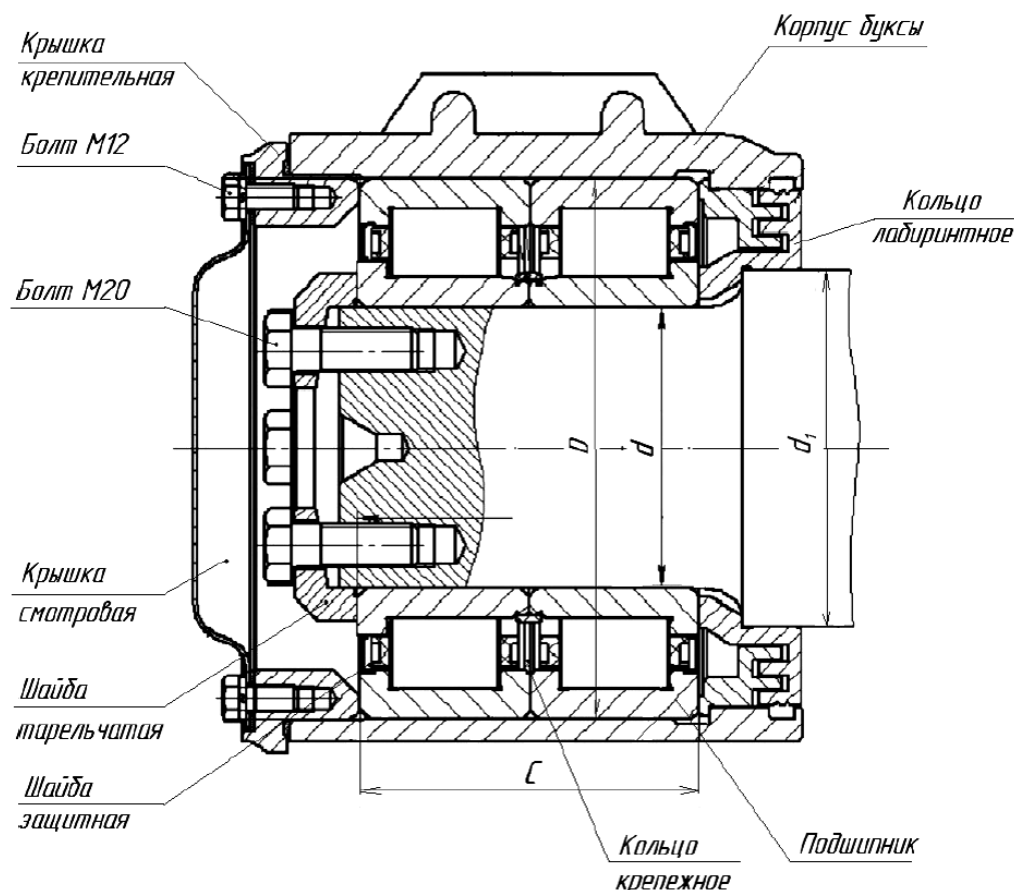


Рис. 3. Буксовый узел со сдвоенным подшипником

продлить их дальнейшее использование уже с новым торцевым креплением подшипника.

Последовательность действий при модернизации колесных пар с осями РУ1 следующая:

- 1) удаляются резьбовые части с обеих сторон оси;
- 2) на торцах оси выполняются центровые отверстия и отверстия под крепежные болты;
- 3) проводится формование колесной пары;
- 4) проводится монтаж буксового узла с помощью тарельчатой шайбы.

Основным недостатком предлагаемой модернизации является то, что модернизированная ось по своим параметрам не будет соответствовать оси РУ1Ш, тарельчатая шайба также будет отличаться от шайбы, используемой в колесных парах РУ1Ш-957-Г. Поэтому в нормативную документацию следует вносить изменения, связанные с новыми типами оси и колесной пары.

Необходимо разработать проект модернизации, провести предварительные испытания, согласовать проект с железнодорожной администрацией России и утвердить его Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества. Оси и колесные пары должны пройти процедуру сертификации в соответствии с Техническим регламентом таможенного союза [13]. В документацию на ремонт и эксплуатацию грузовых вагонов должны быть внесены изменения, связанные с новыми типами оси и колесной пары.

Заключение

В результате анализа конструкции колесных пар РУ1-957-Г и РУ1Ш-957-Г разработа-

ны предложения по модернизации колесных пар с осями РУ1, которая заключается в следующем:

- 1) удаление резьбовых частей оси РУ1;
- 2) выполнение на торцах осей центровых отверстий и отверстий под крепежные болты;
- 3) формирование колесной пары с модернизированной осью;
- 4) установка буксовых узлов с торцевым креплением шайбой, без упорного кольца, с непосредственным упором шайбы в кольцо подшипника (шайба отличается от использующейся в колесных парах РУ1Ш-957-Г).

Предлагаемый проект модернизации позволит продлить срок эксплуатации осей РУ1 и тем самым снизить потребность в новых осях, однако он имеет и существенные недостатки, обусловленные сложной процедурой внедрения нового типа колесной пары. Также конструкция модернизированной колесной пары будет отличаться от конструкции колесной пары РУ1Ш-957-Г.

Библиографический список

1. ГОСТ 22780–93. Оси для вагонов железных дорог колеи 1520 (1524) мм. Типы, параметры и размеры. – М. : Стандартинформ, 1993. – 20 с.
2. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм. РД ВНИИЖТ 27.05.01–2017. – М.: ВНИИЖТ, 2018. – 242 с.
3. Парфененко Р.Е. Пути повышения работоспособности колесных пар технологическими методами / Р.Е. Парфененко, Д.П. Кононов, О.А. Конограй // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД : сб. трудов Нац. науч.-технич. конференции студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : ПГУПС, 2020. – С. 34–44.
4. Кононов Д.П. Повышение надежности цельнокатаных колес : монография / Д.П. Кононов. – М. : Библио-Глобус, 2018. – 250 с.
5. ГОСТ 4835–2013. Колесные пары железнодорожных вагонов. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2014. – 32 с.
6. ГОСТ 33200–2014. Оси колесных пар железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2015. – 47 с.
7. Лукин В.В. Конструирование и расчет вагонов : учебник / В.В. Лукин, П.С. Анисимов, В.Н. Котуранов, А.А. Хохлов, В.В. Кобищанов. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2011. – 688 с.
8. Шадур Л.А. Вагоны : учебник для вузов ж.-д. транспорта / Л.А. Шадур, И.И. Челноков, Л.Н. Никольский, Е.Н. Никольский, В.Н. Котуранов, П.Г. Проскурнев, Г.А. Казанский, А.Л. Спиваковский, В.Ф. Девятков. – М. : Транспорт, 1980. – 439 с.
9. Шадур Л.А. Развитие отечественного вагонного парка / Л.А. Шадур. – М. : Транспорт, 1988. – 273 с.
10. Кононов Д.П. Модернизация технологического процесса ремонта колесных пар / Д.П. Кононов, Я.О. Мурзина // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД : сб. трудов конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : ПГУПС, 2017. – С. 35–37.
11. ГОСТ 4728–2010. Заготовки осевые для железнодорожного подвижного состава. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2011. – 11 с.
12. Кононов Д.П. Железнодорожные подшипники кассетного типа / Д.П. Кононов, К.А. Румаков // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД : материалы науч. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 25–26.
13. Технический регламент таможенного союза. О безопасности железнодорожного подвижного состава. ТР ТС 001/2011. – М. : Стандартинформ, 2012. – 47 с.

Дата поступления: 03.09.2020

Решение о публикации: 25.09.2020

Контактная информация:

ФЕДОРОВ Игорь Владимирович – преподаватель; Fedorov281973@yandex.ru

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич – д-р техн. наук, доцент; 89219751198@yandex.ru

КОНОГРАЙ Ольга Анатольевна – преподаватель; konograisppb@mail.ru

Modernisation of type RU1 axles with the objective of assuring their further use

I. V. Fedorov, A. A. Vorob'ev, O. A. Konograi

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

For citation: Fedorov I. V., Vorob'ev A. A., Konograi O. A. Modernisation of type RU1 axles with the objective of assuring their further use. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 4, pp. 490–497. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-490-497

Summary

Objective: Development of proposals for modernization of old-type RU1 type axles for their further use. **Methods:** Structural analysis method was applied. **Results:** Proposals on further use of old-type RU1 type axles and expanding their operating life. **Practical importance:** The proposed modernization would permit expanding the use of old-type RU1 axles after modernization with new face bearing retention and reducing the demand for new axles which would contribute to reduction of axle deficit in overall repair of wheel pairs.

Keywords: Axle, wheel pair, face bearing retention, castellated nut, plate washer.

References

1. State standard GOST 22780–93. *Osi dlia vagonov zheleznykh dorog kolei 1520 (1524) mm. Tipy, parametry i razmery* [Wagon axles for 1520 (1524) mm gauge railways. Types, parameters and sizes]. Moscow, Standartinform Publ., 1993, 20 p. (In Russian)
2. *Rukovodiashchii dokument po remontu i tekhnicheskomu obsluzhivaniu kolesnykh par s bukovymi uzlami gruzovykh vagonov magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 (1524) mm* [Regulatory document on repairs and maintenance operations of wheel pairs with box units of cargo wagons on gauge 1520 (1524) mm arterial railways]. RD VNIIZhT May 25, 2017. Moscow, VNIIZhT [Railway Research Institute] Publ., 2018, 242 p. (In Russian)
3. Parfenenko R. E., Kononov D. P. & Konograi O. A. Puti povysheniia rabotosposobnosti kolesnykh par tekhnologicheskimi metodami [Methods of increasing wheel pairs' working capacity by technological means]. *Progressivnye tekhnologii, primeniamye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD*. Sb. trudov Nats. nauch.-tekhnich. konferentsii studentov, magistrrov, aspirantov i molodykh uchenykh [Progressive technologies used for repairs of Russian Railways' rolling stock. Coll. papers of National sci.-techn. conf. of students, master and PhD students and young researchers]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2020, pp. 34–44. (In Russian)
4. Kononov D. P. *Povyshenie nadezhnosti tsel'nokatalykh koles*. Monografiia [Improving reliability of solid-rolled railway wheels. Monograph]. Moscow, Biblioglobus Publ., 2018, 250 p. (In Russian)
5. State standard GOST 4835–2013. *Kolesnye pary zheleznodorozhnykh vagonov. Tekhnicheskie usloviia* [Wheel pairs of railway wheels. Technical conditions]. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 32 p. (In Russian)
6. State standard GOST 33200–2014. *Osi kolesnykh par zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviia* [Wheel pair axles for railway rolling stock. General technical conditions]. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 47 p. (In Russian)
7. Lukin V. V., Anisimov P. S., Koturanov V. N., Khokhlov A. A. & Kobishanov V. V. *Konstruirovaniye i raschet vagonov*. Uchebnik [Engineering design and analysis of wagons. Course book]. Moscow, Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniu na zheleznodoro-

zhnom transporte [Training centre for railway transport education] Publ., 2011, 688 p. (In Russian)

8. Shadur L.A., Chelnokov I.I., Nikol'skii L.N., Nikol'skii E.N., Koturanov V.N., Proskurnev P.G., Kazanskii G.A., Spivakovskii A.L. & Deviatov V.F. *Vagony. Uchebnik dlia vuzov zheleznodorozhnogo transporta* [Wagons. Course book for higher railway transport education]. Moscow, Transport Publ., 1980, 439 p. (In Russian)

9. Shadur L.A. *Razvitie otechestvennogo vagonnogo parka* [Development of domestic wagon fleet]. Moscow, Transport Publ., 1988, 273 p. (In Russian)

10. Kononov D.P. & Murzina Ia.O. Modernizatsiia tekhnologicheskogo protessa remonta kolesnykh par [Modernisation of the technological process of wheel pair repair]. *Progressivnye tekhnologii, primeniaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD*. Sb. trudov konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Progressive technologies used for repairs of Russian Railways' rolling stock. Coll. papers of conf. of students, PhD students and young researchers]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, pp. 35–37. (In Russian)

11. *State standard GOST 4728–2010. Zagotovki osevye dlia zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Tekh-*

nicheskie usloviia [Axle blanks for railway rolling stock. Technical conditions]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 11 p. (In Russian)

12. Kononov D.P. & Rumakov K.A. Zheleznodorozhnye podshipniki kasetnogo tipa [Railway cassette-type tapered bearing units]. *Progressivnye tekhnologii, primeniaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD*. Materialy nauch. konferentsii [Progressive technologies used for repairs of Russian Railways' rolling stock. Coll. papers of sci. conf.]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2016, pp. 25–26. (In Russian)

13. *Customs Union technical regulation. O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [On railway rolling stock safety]. *TR TS 001/2011*. Moscow, Standartinform Publ., 2012, 47 p. (In Russian)

Received: September 03, 2020

Accepted: September 25, 2020

Author's information:

Igor' V. FEDOROV – Lecturer;

Fedorov281973@yandex.ru

Aleksandr A. VOROB'EV – D. Sci. in Engineering, Senior Lecturer; 89219751198@yandex.ru

Ol'ga A. KONOGRAI – Lecturer;

konograisbp@mail.ru



УДК 621.869.88–71

Экспериментальные исследования новых конструктивных решений ограждения кузовов рефрижераторных вагонов и контейнеров

Ю. П. Бороненко, Б. А. Абдуллаев

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

Для цитирования: Бороненко Ю. П., Абдуллаев Б. А. Экспериментальные исследования новых конструктивных решений ограждения кузовов рефрижераторных вагонов и контейнеров // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 498–513. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-498-513

Аннотация

Цель: Осуществить выбор материалов и технических решений тепловой изоляции в конструкции ограждения кузовов рефрижераторных вагонов и контейнеров. **Методы:** Проводились экспериментальные исследования теплотехнических свойств выбранных материалов на физической модели с применением климатической и испытательной камер, аналитические расчеты с использованием уравнения теплопроводности. **Результаты:** Определены теплотехнические свойства конструкций теплового ограждения кузова рефрижераторных вагонов и контейнеров. **Практическая значимость:** Новые материалы снижают коэффициент теплопередачи ограждения, что сократит расход топлива и повысит сохранность скоропортящихся грузов, уменьшит вес и увеличит объем кузова.

Ключевые слова: Скоропортящиеся грузы, контейнер, рефрижераторный вагон, рефрижераторный контейнер, испытательная камера, коэффициент теплопередачи.

Введение

Для теплоизоляции вагонов и контейнеров используются различные материалы: минеральная вата, пенопласты, полиуретаны, характеризующейся низкими значениями коэффициентов теплопроводности. Однако из-за наличия тепловых мостиков, влаги, ухудшения теплоизоляционных свойств в процессе эксплуатации толщина ограждений кузовов обычно превышает 160 мм. Это приводит к уменьшению внутреннего полезного объема кузова и увеличению массы тары. В то же время в смежных отраслях техники находят применение новые материалы [1–3], имеющие наименьший коэф-

фициент теплопроводности и большую прочность, позволяющую создавать цельнонесущие конструкции меньших размера и веса. Для защиты строительных конструкций от воздействия влаги и сохранения тепла внутри помещения при низких температурах применяется теплоизоляционный материал «Корунд» [4], созданный в 2008 г. и выпускаемый российскими производителями. Данный материал представляет собой однокомпонентную полимерную суспензию, в которую добавляются мельчайшие керамические запаянные гранулы, для которых свойственны физические законы отражения и теплоотдачи. Содержание в суспензии таких гранул (микросфер) достигает 70%. В зависимости от целевого

назначения в состав вводятся пигментирующие огнестойкие, антикоррозионные и ингибирующие компоненты. Все это позволяет получить теплоизоляцию с высокими адгезией и эластичностью, не изменяющуюся под воздействием внешних факторов: влажности, ультрафиолетовых лучей, перепадов температуры, плесени и грибов. Основой корунда является водно-Ф акриловый раствор, в который добавляются вышеуказанные компоненты [5].

Кроме того, появился ряд новых материалов. Для оценки эффективности применения таких материалов в конструкциях вагонов и контейнеров были проведены теоретические и экспериментальные исследования [6]. Основные сведения об этих материалах приведены в табл. 1. Поэтому следует оценить возможность их использования в конструкциях ограждений вагонов и контейнеров.

Эффективность теплоизоляции кузовов подвижного состава оценивают средним коэффициентом теплопередачи [7, 8]

$$K = \frac{1000W}{F_{\text{ср}} \cdot \tau(t_{\text{вн}} - t_{\text{н}})}, \quad (1)$$

где K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); W – расход электроэнергии за расчетный период измерений, кВт·ч; $F_{\text{ср}}$ – среднегеометрическое

значение площади ограждения, м²; τ – время расчетного периода, ч; $t_{\text{н}}$ – средняя температура наружного воздуха, °С; $t_{\text{вн}}$ – средняя температура воздуха внутри, °С; $(t_{\text{вн}} - t_{\text{н}})$ – средний перепад температур внутри и снаружи за период измерений, °С.

Формула (1) позволяет оценить коэффициент передачи всего кузова вагона. Но при создании новых вагонов необходимо знать, какой вклад вносят в общую теплопередачу каждый из элементов – боковые стены, крыша, пол. В них технические решения теплоизоляции обычно различны.

При проектировании новых вагонов коэффициенты теплопередачи для основных конструкций ограждения рассчитывают упрощенно, используя модель теплопередачи, однослойную через плоскую стенку [9]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{н}}} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}}}, \quad (2)$$

здесь $\alpha_{\text{н}}$ и $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициент теплоотдачи соответственно на наружной и внутренней поверхности ограждения кузова вагона, Вт/(м²·К); δ_i – толщина i -го элемента кузова м; λ_i – коэффициент теплопроводности материала i -го слоя ограждения, Вт/(м·К).

ТАБЛИЦА 1. Сравнение технических характеристик традиционной и новой теплоизоляций

Показатели	Традиционная теплоизоляция		Корунд	Изготовитель ООО «Регент Балтика» и ООО «БАЛТМАШ»		
	Мипора ТУ 6-05-1112-92	Пенополиуретан		Армированный стеклохолст в объеме пенополиуретан (РЖД-1)	Сотоком-позитная панель и армированный в объеме пенополиуретан	Сотоком-позитная панель
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,034–0,052	0,025–0,03	0,001	0,026	0,007	0,032
Трудозатраты на монтаж, чел.·ч/м ²	10	1–2	1–2	0,5–1		
Срок службы, лет	До 5	От 10	От 10	30–50		

Для обработки методов расчета теплотехнических свойств ограждений вагонов было принято решение провести определение коэффициентов теплопередачи перспективных технических решений теплоизоляции двумя способами: экспериментально, используя зависимость (1), и аналитическим расчетом с помощью формулы (2).

Методика проведения экспериментальных исследований

В основу методов измерения коэффициентов теплопроводности и теплопередачи материала положено уравнение Фурье [10, 11]

$$\frac{Q}{F} = \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2). \quad (3)$$

В (3) Q – заданный поток тепла, Вт·с; F – площадь сечения, через которое передается тепло, м²; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); δ – толщина материала, м; T_1 – температура окружающей среды, К; T_2 – температура внутри тела, К.

Определение коэффициентов теплопередачи проводилось в работах [12–20]. Основная трудность заключается в том, что часть теплового потока, создаваемого нагревом, рассеивается в окружающую среду, и измерение теплового потока через изучаемую конструкцию представляет известную трудность. Поэтому было предложено использовать замкнутую камеру в виде параллелепипеда со сменной верхней гранью (крышкой). Известно, что средний коэффициент теплопередачи замкнутой камеры можно рассчитать по выражению

$$K_{\text{ср}} = \frac{4K_{\text{бс}} \cdot F_{\text{бс}} + K_{\text{дн}} \cdot F_{\text{дн}} + K_{\text{кр}} \cdot F_{\text{кр}}}{4F_{\text{бс}} + F_{\text{дн}} + F_{\text{кр}}}, \quad (4)$$

где $K_{\text{бс}}$, $K_{\text{дн}}$, $K_{\text{кр}}$ – коэффициенты теплопередачи соответственно боковой стены, днища и крышки испытательной камеры, Вт/(м²·К); $F_{\text{бс}}$, $F_{\text{кр}}$, $F_{\text{дн}}$ – площадь соответственно боковой стены, днища и крышки испытательной камеры, м².

Для определения коэффициента теплопередачи испытываемой конструкции необходимо знать коэффициент теплопередачи вспомогательных элементов камеры.

Так как днище и боковая стена испытательной камеры изготовлены из одного материала и считая, что их коэффициенты теплопередачи равны $K_{\text{дн}} = K_{\text{бс}} = K_0$, равенство (4) приводится к виду

$$K_{\text{ср}} = K_0 \frac{F_0}{F_0 + F_{\text{кр}}} + K_{\text{кр}} \frac{F_{\text{кр}}}{F_0 + F_{\text{кр}}}, \quad (5)$$

здесь $K_0 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$ – средний коэффициент теплопередачи испытательной камеры

без крышки; $F_0 = 4F_{\text{бс}} + F_{\text{дн}}$ – суммарная площадь боковых стен и днища камеры.

При известном коэффициенте теплопроводности материала λ (см. (5)) по экспериментально определенному среднему коэффициенту теплопередачи камеры можно найти коэффициент теплопередачи технического решения

$$K_{\text{кр}} = \frac{K_{\text{ср}} \cdot (F_0 + F_{\text{кр}})}{F_{\text{кр}}} - \frac{K_0 \cdot F_0}{F_{\text{кр}}}. \quad (6)$$

Значения коэффициента теплопроводности λ материала в зависимости от поставки могут отличаться. Поэтому для повышения точности было предложено изготовить две градуированные крышки из одного материала с одной поставки, но разной толщины: 50 и 100 мм. При уменьшении толщины в 2 раза коэффициент теплопередачи крышки становится меньше в соответствии с формулой (2) в 1,87 раза.

Из данных градуировки камеры с использованием крышек разной толщины получаем систему из двух уравнений для уточненного определения коэффициента теплопередачи камеры

$$\begin{cases} K_{\text{ср}}^{\delta=100} = \frac{K_0 F_0 + K_{\text{кр}100} F_{\text{кр}}}{F_0 + F_{\text{кр}}}, \\ K_{\text{ср}}^{\delta=50} = \frac{K_0 F_0 + 1,87 K_{\text{кр}100} F_{\text{кр}}}{F_0 + F_{\text{кр}}}. \end{cases} \quad (7)$$

Разрешив систему уравнений (7) относительно двух неизвестных и учитывая (5), получаем уточненные значения коэффициента теплопередачи K_0 стен и дна камеры:

$$K_0 = \frac{(F_0 + F_{кр}) \times \times (1,87 F_{кр} \cdot K_{ср}^{\delta=100} - K_{ср}^{\delta=50} \cdot F_{кр})}{F_0 - F_0 \cdot F_{кр}}. \quad (8)$$

Таким образом, методика экспериментального определения коэффициента теплопередачи испытуемого технического решения, изготовленного в виде крышки к теплоизолированной камере, заключается в следующем:

- вычисляется площадь ограждающих поверхностей камеры и крышки;
- устанавливается камера в теплоизолированное помещение или холодильную камеру;
- измеряется разность температур снаружи и внутри камеры;
- воздух внутри камеры нагревается электрическим прибором, подключенным через счетчик электроэнергии;
- при достижении условно стационарного режима с постоянной разностью температур снаружи и внутри камеры рассчитывается средний коэффициент теплопередачи по формуле (1);
- используя полученный средний коэффициент теплопередачи, вычисляется коэффициент теплопередачи нижних ограждений камеры K_0 по формуле (8) (выполняется только при градуировке камеры);
- по значению коэффициента $K_{ср}$ находится коэффициент теплопередачи исследуемого технического решения теплоизоляции по (6).

Для изучения влияния внешней температуры устанавливается необходимая температура холодильной камеры, и эксперименты повторяются в прежнем порядке.

Устройство экспериментальной установки и ее градуировка

Общий вид термоизолированной камеры (ТИК-1) приведен на рис. 1, среднегеометрические площади элементов камеры – в табл. 2.

Испытательная камера изготовлена из пеноплекса толщиной 100 мм, внутренний размер которого составляет 220×220×280 мм. Верхняя часть испытательной камеры (крышка) представляет собой испытуемый образец теплоизоляции (ограждения). Образцы для градуировки испытательной камеры были разработаны в виде крышки размером 320×320 мм и толщиной 50 и 100 мм.

Среднегеометрические площади элементов ограждения испытательной камеры (табл. 2) определялись по формуле

$$F_{ср} = \sqrt{F_{н} \cdot F_{вн}},$$

где $F_{н}$ и $F_{вн}$ – площадь элементов камеры соответственно снаружи и внутри, м².

Камера ТИК-1 оснащена нагревательным элементом (электрическая лампа 25 Вт), подключенным через счетчик к электрическому

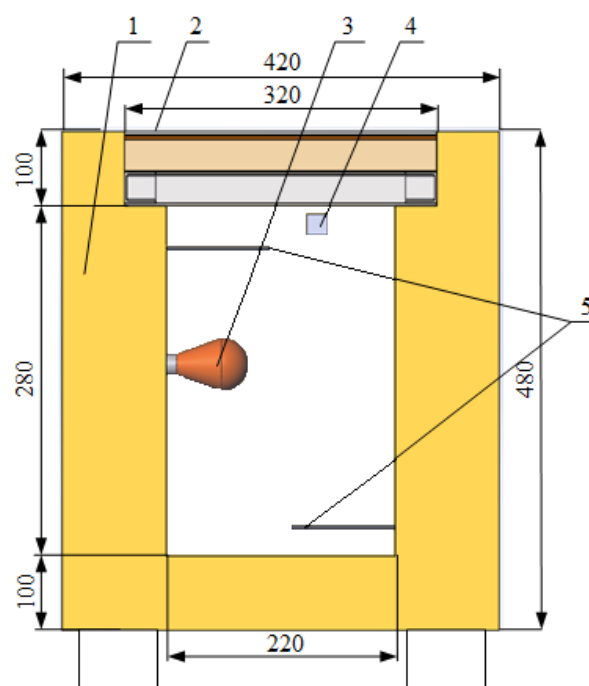


Рис. 1. Испытательная для проведения экспериментов камера ТИК-1 по определению теплозащитных свойств теплоизоляции: 1 – пеноплекс; 2 – испытуемый образец (крышка) камеры; 3 – нагреватель; 4 – термостат испытательной камеры; 5 – термопары. Размеры даны в миллиметрах (то же для табл. 4)

ТАБЛИЦА 2. Среднегеометрические площади элементов камеры

Наименование элементов камеры	Площадь элементов снаружи, м ²	Площадь элементов внутри, м ²	Средняя площадь элементов, м ²
Боковая стена, $F_{\text{бс}}$	0,8064	0,2464	0,4457
Днище, $F_{\text{дн}}$	0,1764	0,0484	0,092
Крыша, $F_{\text{кр}}$	0,1024	0,1024	0,1024
Общая средняя площадь камеры, ΣF			0,6401

источнику, и термопарами MC-227R4, а также термостатом W1209 для регулирования температуры. Нагревательный элемент устанавливается таким образом, чтобы он равномерно нагревал внутреннюю часть испытательной камеры.

Испытательная камера помещалась в специальную климатическую камеру (серия CHALLENGE CH600C) с оборудованными необходимыми средствами измерения и мониторинга, где температура может поддерживаться в диапазоне от -75 до $+180$ °C. При градуировке испытательная камера размещалась внутри климатической камеры и температура поддерживалась внутри 40 °C, снаружи -20 °C. Зависимость расхода электроэнергии и температуры внутри и снару-

жи показана на рис. 2. Из него видно, что температура оставалась практически постоянной, а расход электроэнергии линейно зависит от времени эксперимента. Результаты обработки экспериментальных данных приведены в табл. 3.

Конструкция теплозащитного ограждения

Для оценки эффективности различных технических решений ограждения были изготовлены следующие образцы (табл. 4):

– образец № 1 представляет собой типовой фрагмент теплоизоляции рефрижераторных вагонов и контейнеров. Он состоит из стального

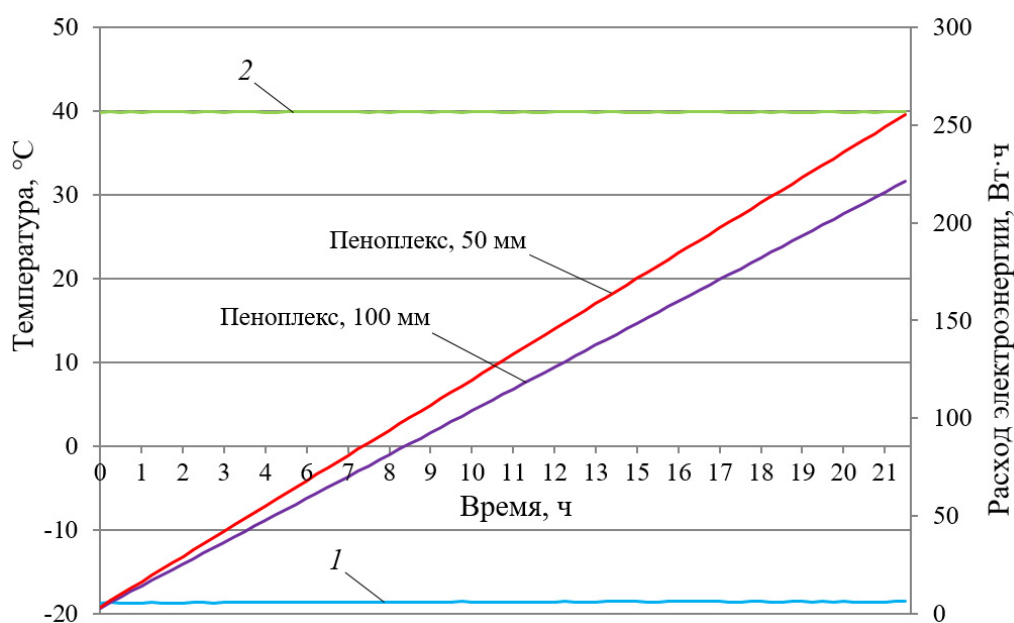
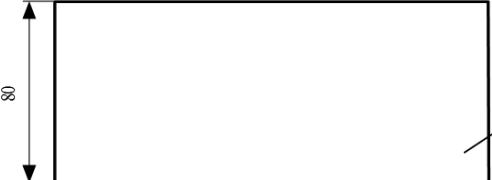
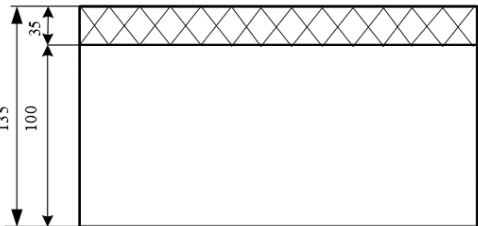
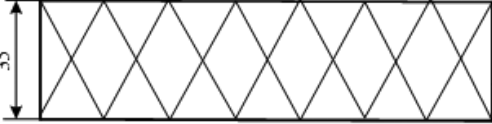


Рис. 2. Зависимость расхода электроэнергии от времени проведения эксперимента по градуировке: 1 – снаружи испытательной камеры; 2 – внутри испытательной камеры

№ образца	Схемы образцов крышек для испытания	Общий вид образца
4	 Армированный пенополиуретан со стеклохолстом	
5	 Сотовая композитная панель и армированный в объеме пенополиуретан	
6	 Сотовая композитная панель	

листа толщиной 2 мм, П-образного каркаса размером 30×30×2 мм, пеноплекса толщиной 60 мм, внутренней обшивки из фанеры толщиной 4 мм, алюминиевого листа толщиной 2 мм;

– образец № 2 аналогичен образцу № 1, но между стальным листом и пеноплексом, пеноплексом и фанерой, фанерой и алюминиевым листом, а также по периметру П-образного каркаса нанесены слои «Корунда» толщиной 1 мм;

– образец № 3 аналогичен образцу № 1, но вместо алюминиевого листа толщиной 2 мм уста-

новлен лист винипласта толщиной 3 мм, между фанерой и винипластом нанесен слой «Корунда» толщиной 2 мм, между пеноплексом и фанерой, а также по периметру П-образного каркаса – слои «Корунда» толщиной 1 мм;

– образец № 4 на образце в качестве фрагмента теплоизоляции использован армированный пенополиуретан со стеклохолстом производства «Регент Балтика» толщиной 80 мм;

– образец № 5 – в качестве перспективного фрагмента теплоизоляции применено сочетание

армированного полиуретана толщиной 100 мм и сотовой изоляции толщиной 35 мм;

– образец № 6 – в качестве фрагмента теплоизоляции использована сотовкомпозитная панель толщиной 35 мм.

Результаты экспериментальных исследований теплофизических свойств ограждений

На первом этапе в климатической камере CHALLENGE CH600C (рис. 3) были испытаны образцы № 1–3. Время выдержки образцов составляла 22 ч, внутри камеры ТИК-1 поддерживалась температура 40 °С, снаружи –20 °С (рис. 4). Средние коэффициенты теплопередачи крышки и камеры приведены в табл. 5. Теплоизоляционные свойства образцов № 2 и 3, имеющих теплоизоляцию «Корунд», оказались лучше почти в 2 раза. В образце № 3 слои «Ко-

рунда» были в 1,5 раза толще, однако коэффициент теплопередачи образца снизился менее чем на 3 % по сравнению с образцом № 2. Это требует дальнейших исследований по выбору оптимальной величины толщины изоляции типа «Корунд».

На втором этапе определение коэффициентов теплопередачи проводились на полигоне НВЦ «Вагоны» в помещении при температуре наружного воздуха 18–20 °С без использования климатической камеры. Внутри испытательной камеры нагрев осуществлялся до 60–70 °С. При этом мощность нагревательного элемента – электрической лампы (25 Вт) – была снижена с помощью регулятора мощности до 8,8 Вт.

Были испытаны шесть образцов опытных крышек камеры в течение 18 ч каждая. Все параметры – расход электроэнергии, температура воздуха снаружи и внутри камеры, продолжительность испытания – записывались. В результате проведенного эксперимента были определе-

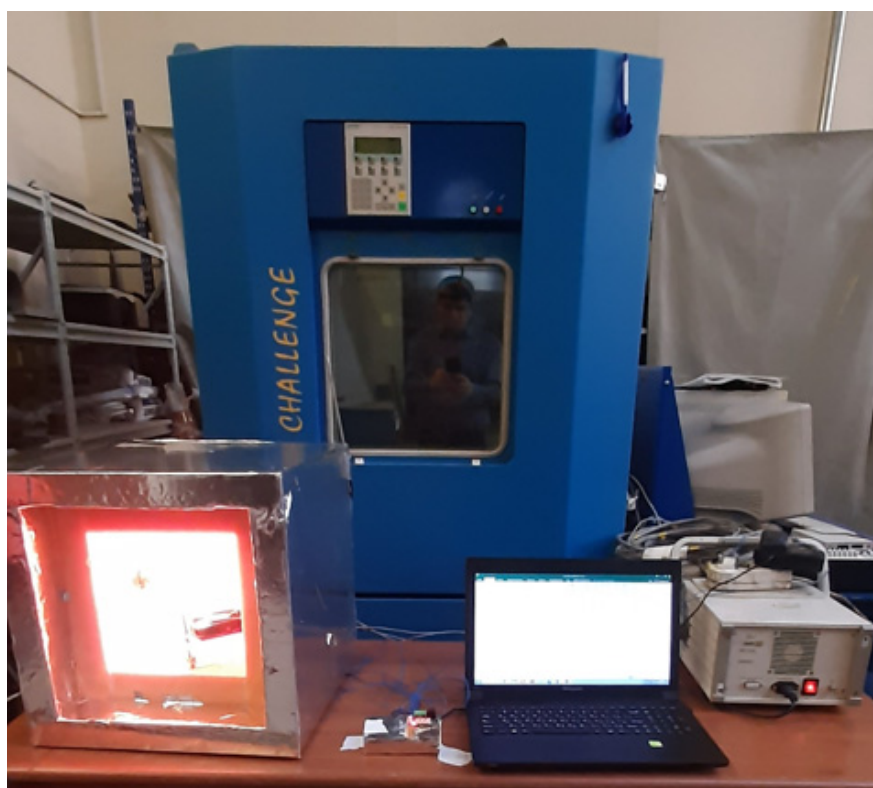


Рис. 3. Общий вид климатической камеры CHALLENGE CH600C и испытательной камеры ТИК-1

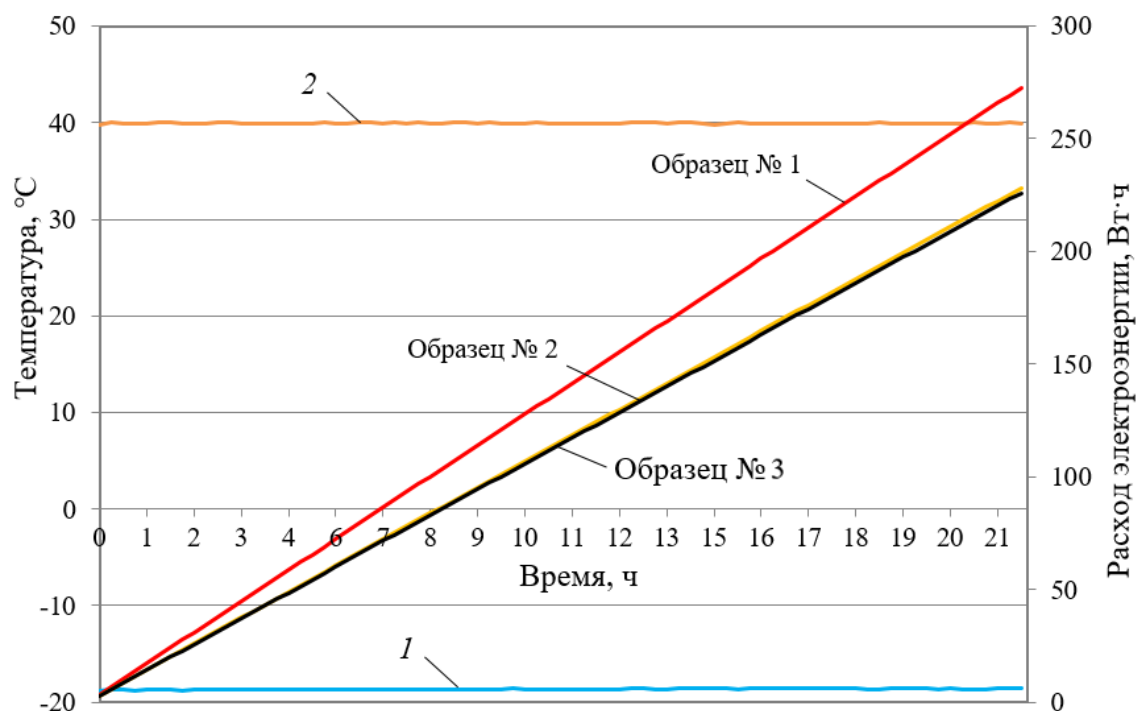


Рис. 4. Зависимость расхода электроэнергии от времени проведения эксперимента:
1 – снаружи испытательной камеры; 2 – внутри испытательной камеры

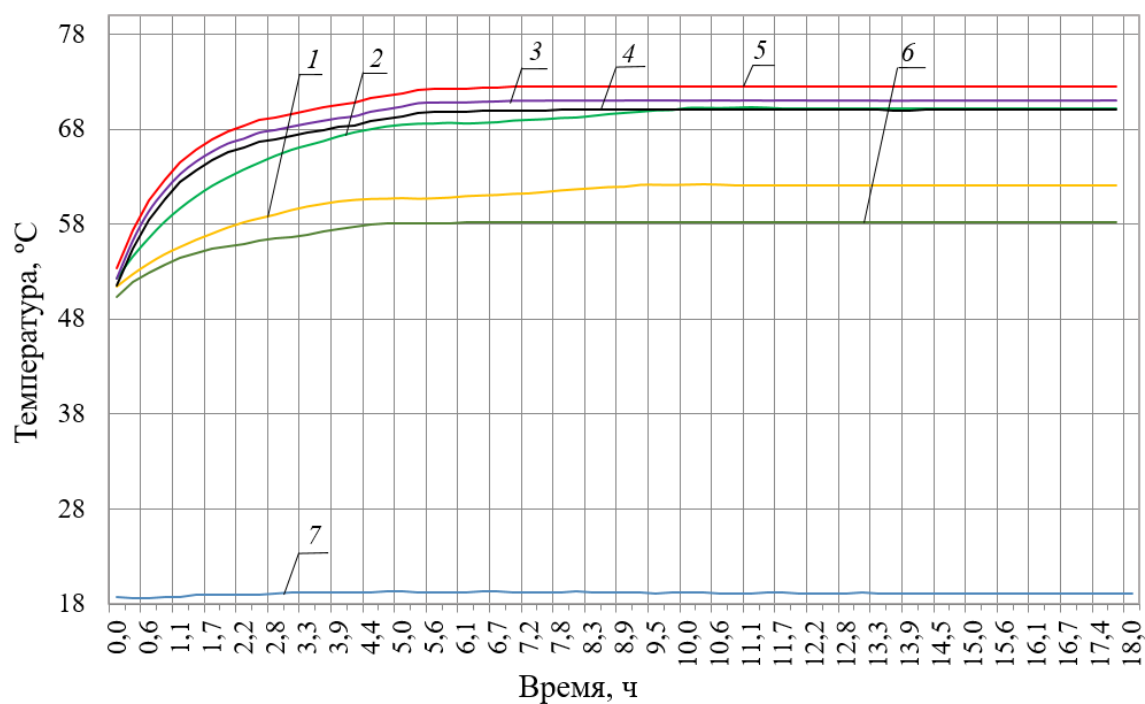
ТАБЛИЦА 5. Данные, полученные при экспериментальных исследованиях с использованием климатической камеры

Параметры испытания	№ образца		
	1	2	3
Время выдержки образцов, ч	22		
Расход электроэнергии, Вт·ч	273	228	226
Внутренняя температура испытательной камеры, °C	40,009	40,066	40,1
Внутренняя температура климатической камеры, °C	-19,73	-19,49	-19,56
Разность температур, °C	59,73	59,56	59,66
Средний коэффициент теплопередачи камеры, Вт/(м²·K)	0,325	0,272	0,270
Средний коэффициент теплопередачи крышки, Вт/(м²·K)	0,673	0,341	0,332

ны зависимости наружной и внутренней температур и среднего коэффициента теплопередачи от времени проведения эксперимента, которые представлены на рис. 5. Результаты статистического анализа данных, полученных при экспериментальных исследованиях, приведены в табл. 6.

На рис. 5, а видно, что температура воздуха $t_{\text{вн}}$ в испытательной камере в течение 5–6 ч возрастает, а затем она стабилизируется на уровне 58–75 °C за счет переноса тепла из испытательной камеры наружу. Из рис. 5, б следует: в начале эксперимента за 5 ч коэффициент теплопередачи испытательной камеры резко понижается,

а



б

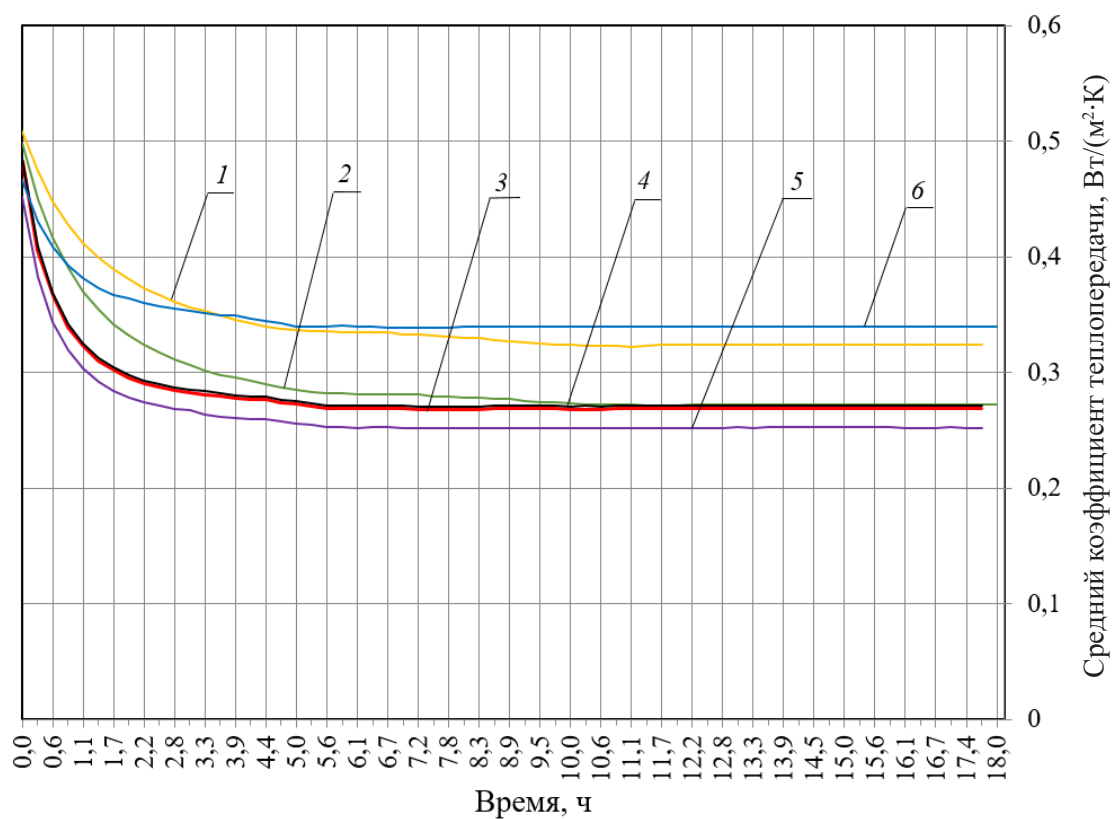


Рис. 5. Зависимости внутренней температуры (а) и коэффициента теплопередачи испытательной камеры (б) от времени проведения эксперимента: а: 1 – образец № 1, 2 – образец № 2, 3 – образец № 3, 4 – образец № 4, 5 – образец № 5, 6 – образец № 6, 7 – снаружи испытательной камеры; б: 1 – образец № 1, 2 – образец № 2, 3 – образец № 3, 4 – образец № 4, 5 – образец № 5, 6 – образец № 6

ТАБЛИЦА 6. Данные, полученные при экспериментальных исследованиях без климатической камеры

Параметры испытания	№ образца					
	1	2	3	4	5	6
Время выдержки образцов, ч	18					
Расход электроэнергии, Вт·ч	160	160	160	160	160	160
Наружная температура, °С	19,2	19,2	19,3	18,9	17,4	17,4
Внутренняя температура испытательной камеры, °С	62	70,2	71	70	72,4	58,2
Разность температур, °С	42,8	51	51,7	51,1	55	40,8
Средний коэффициент теплопередачи для камеры, Вт/(м²·К)	0,324	0,272	0,269	0,271	0,252	0,340
Средний коэффициент теплопередачи для крышки, Вт/(м²·К)	0,664	0,341	0,322	0,332	0,214	0,761

что можно объяснить ростом разности температур наружного и внутреннего воздуха ($t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}$). Затем коэффициент теплопередачи стабилизируется и принимает постоянное значение. Коэффициенты теплопередачи крышек камеры приведены на рис. 6.

Коэффициенты теплопередачи при использовании климатической камеры и без нее практически не изменились. Их разность не превышает 3 %, что говорит о малой зависимости коэффициентов теплопроводности образцов № 1–3 от температуры.

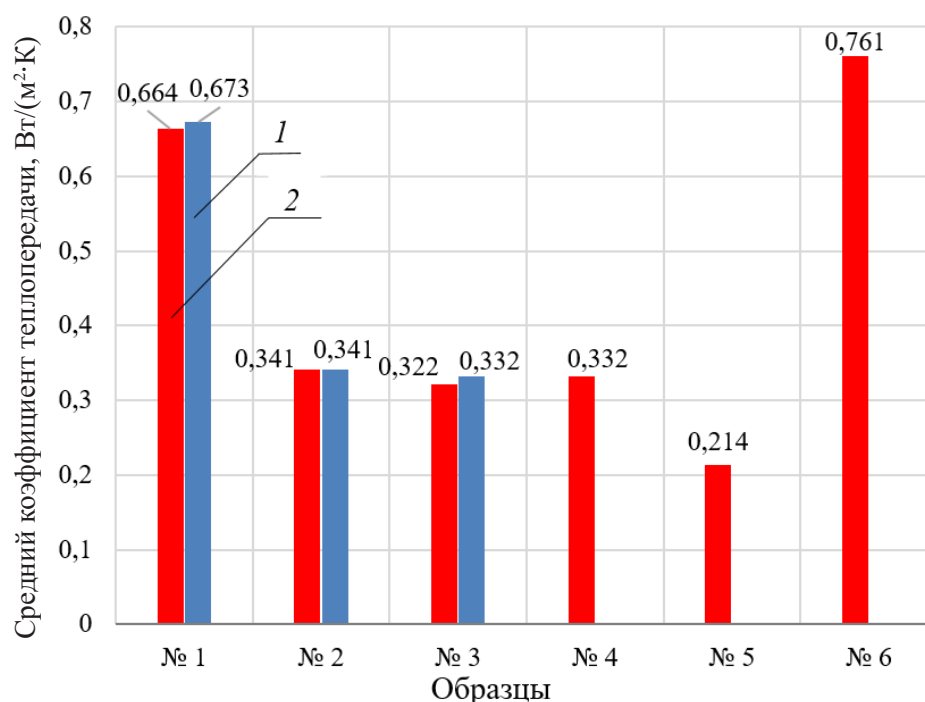


Рис. 6. Гистограмма величин коэффициентов теплопередачи для образцов ограждения с использованием климатической камеры (1) и без нее (2)

Повторные испытания образцов № 1–3 подтвердили (рис. 6), что нанесение теплоизоляции «Корунда» понизило коэффициент теплопередачи почти в 2 раза. Таким образом, применив «Корунд» в качестве слоя теплоизоляции, можно уменьшить толщину боковой стены рефрижераторных вагонов и контейнеров. Для реальных вагонов и контейнеров это позволяет снизить толщину изоляции на 20–30 %. Образцы теплоизоляции № 5 производства «Регент Балтика» имеет самый малый коэффициент теплопередачи, но его толщина была существенно больше (135 мм), чем у образцов № 1–3. Их применение перспективно, но необходимо разработать технические решения их реализации.

Расчетное определение коэффициентов теплопередачи

В аналитических расчетах были определены коэффициенты теплопередачи образцов № 1–6 для технических решений кузовов рефрижераторных вагонов и контейнеров, размеры которых представлены в табл. 7.

ТАБЛИЦА 7. Размеры элементов образцов и коэффициент теплопроводности

Наименование материала	Толщина, δ , мм	Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/(м·К)
Сталь	0,002	47
Пенополиуритан	0,026–0,06	0,025
Пеноплекс	0,06	0,028
Брус	0,03	0,29
Фанера	0,004	0,29
Алюминиевый лист	0,002	116
Винипласт	0,003	0,16
Корунд	0,001–0,002	0,0012
Армированный пенополиуретан стеклохолст	0,08	0,026
Сотокомпозитная панель и армированный в объеме пенополиуретан	0,135	0,007
Сотокомпозитная панель	0,035	0,032

ТАБЛИЦА 8. Сравнительный анализ расчетных экспериментальных данных коэффициента теплопередачи для крышки

Параметры испытания	№ образца					
	1	2	3	4	5	6
Средний коэффициент теплопередачи крышки, экспериментальный, Вт/(м ² ·К)	0,673	0,341	0,322	0,332	0,214	0,761
Средний коэффициент теплопередачи крышки, по аналитическому расчету, Вт/(м ² ·К)	0,651	0,312	0,298	0,311	0,219	0,763
Разность между экспериментом и аналитическим расчетом, %	3,26	8,50	7,45	6,32	2,28	0,26

Коэффициенты теплопередачи определялись по формуле (2). Результаты расчетов приведены в табл. 8.

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что результаты аналитических расчетов удовлетворительно совпадают с полученными экспериментально, расхождение – менее 9%.

Заключение

Разработанная термоизолированная камера ТИК-1 позволяет с достаточной точностью (погрешность менее 3%) определять коэффициенты теплопередачи и теплопроводности модельных образцов теплоизоляции.

Перспективным вариантом для теплового ограждения кузова является техническое решение, где в качестве теплоизоляции использованы пенополиуретан и «Корунд». Минимальное значение коэффициента теплопередачи из исследованных материалов обеспечил вариант теплоизоляции РЖД-1 (производство «Регент Балтика»), сочетающих армированный полиуретан и сотовую конструкцию на бумажном основании. Применение данных технических решений в ограждениях кузовов рефрижераторных вагонов и контейнеров позволит снизить коэффициент теплопередачи до 20% и соответственно уменьшить толщину ограждения на 20–30%, что приведет к увеличению внутреннего полезного объема кузова, уменьшению его массы и расхода используемых материалов, улучшению теплового состояния кузова.

Сравнение результатов расчетов по аналитическим формулам с данными эксперимента показало удовлетворительную точность определения среднего значения коэффициента теплопередачи (погрешность не более 9%).

Библиографический список

1. Бороненко Ю. П. Стратегические задачи вагоностроителей в развитии тяжеловесного движения / Ю. П. Бороненко // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 5 (48). – С. 68–73.
2. Абдуллаев Б. А. Выбор теплоизоляционных материалов для рефрижераторных вагонов и контейнеров / Б. А. Абдуллаев // Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты : материалы XIV Международ. науч.-технич. конференции, Санкт-Петербург, 9–13 июля 2019 г. – СПб. : ПГУПС, 2019. – С. 50–53.
3. Киселев И. Г. Теплотехника на подвижном составе железных дорог : учеб. пособие для студентов высших учебных заведений железнодорожного транспорта, обучающихся по специальности 190301 «Локомотивы» и 190302 «Вагоны» / И. Г. Киселев. – М. : Транспорт, 2008. – 277 с.
4. Технические условия ТУ 5760-001-83663241–2008. Жидкие керамические теплоизоляционные покрытия серии «Корунд» / сост: А. С. Платов. – Волгоград, 2008. – 11 с.
5. Исследование тепловых характеристик сверхтонкой теплоизоляции «Корунд» : технич. условия / сост.: А. Г. Перехоженцев. – Волгоград : ВГАСУ, 2011. – 25 с.
6. ООО «Регент Балтика». – Технологии для изотермических хранилищ. – URL : <https://baltic-united.ru/news/technologii-dlja-izotermicheskikh-hranilish/> (дата обращения : 10.10.2020 г.).
7. ОСТ 24.050.65–86. Вагоны рефрижераторные. Методика проведения теплотехнических испытаний. – М. : Стандартинформ, 1986. – 23 с.
8. ОСТ 33661–2015. Ограждающие конструкции помещений железнодорожного подвижного состава. Методы испытаний по определению теплотехнических показателей с Поправкой (протокол от 10 декабря 2015 г. № 48). – М. : Стандартинформ, 2016. – 32 с.
9. Ефимов В. В. Теплотехнический расчет рефрижераторных транспортных модулей : метод. указания / В. В. Ефимов. – СПб. : ПГУПС, 2003. – 64 с.
10. Levy F. L. A quick method for testing the overall heat transmission coefficient by dispensing liquid nitrogen / F. L. Levy // Journal of Refrign. – January 1963. – London, 1967. – P. 3–5.
11. Китаев Б. Н. Тепловое воздействие солнечной радиации на вагоны / Б. Н. Китаев. – М. : Трансжелдориздат, 1962. – 32 с.
12. Мейстер А. О. Определение среднего коэффициента теплопередачи кузовов пассажирских ва-

гонов / А. О. Мейстер, М. А. Юхневский // Тез. VI науч.-практич. конференции «Проблемы и перспективы развития вагоностроения». – Брянск : БГТУ, 2014. – С. 93–95.

13. Голубин А. А. Анализ методов экспериментального определения коэффициента теплопередачи / А. А. Голубин // Вопросы развития железнодорожного транспорта в условиях рыночной экономики : сб. статей молодых ученых и аспирантов / под ред. Ю. М. Черкашина, Г. В. Город. – М. : Изд. Гогричани, 2007. – С. 99–107.

14. РД 24.050.15–89. Методика определения среднего коэффициента теплопередачи ограждающих конструкций кузовов пассажирских вагонов. – Утв. Министерством тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения СССР 24 июля 1989 г. – М., 1989. – 20 с.

15. Науменко С. Н. Точность определения коэффициента теплопередачи / С. Н. Науменко, Н. С. Теймуразов, А. Д. Голубин // Железнодорожный транспорт на современном этапе : задачи и пути их решения : сб. трудов / под ред. А. Е. Семечкина. – М. : Интекст, 2008. – С. 76–78.

16. Науменко С. Н. Оценка точности определения в депоовских условиях коэффициента теплопередачи кузова изотермического вагона / С. Н. Науменко, Н. С. Теймуразов, А. А. Голубин // Энергосбереже-

ние и защита окружающей среды на теплоэнергетических объектах железнодорожного транспорта, промышленности и жилищно-коммунального хозяйства : сб. докл. участников Объединен. науч. сессии РАН. – М. : МИИТ, 2008. – С. 189–192.

17. Голубин А. А. Влияние погрешностей измерения при определении коэффициента теплопередачи ограждающих конструкций изотермического вагона / А. А. Голубин, Н. В. Белова, С. Н. Науменко // Вестн. ВНИИЖТ. – 2019. – Т. 78. – № 2. – С. 100–104. <http://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-2-100-104>

18. Соколов М. М. Измерения и контроль при ремонте и эксплуатации вагонов / М. М. Соколов, В. И. Варава, Г. М. Левит. – М. : Транспорт, 1991. – 158 с.

19. Чурков Н. А. Холодильные перевозки и содержание изотермического подвижного состава / Н. А. Чурков. – М. : Желдориздат, 2006. – 311 с.

20. Анисимов П. С. Испытания вагонов / П. С. Анисимов. – М. : Маршрут, 2004. – 197 с.

Дата поступления: 10.07.2020

Решения о публикации: 10.08.2020

Контактная информация:

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

АБДУЛЛАЕВ Бахром Актамович – аспирант; baхrom86@yandex.ru

Experimental studies of new design solutions for the fencing of refrigerated car and container bodies

Yu. P. Boronenko, B. A. Abdullaev

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

For citation: Boronenko Yu. P., Abdullaev B. A. Experimental studies of new design solutions for the fencing of refrigerated car and container bodies. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 4, pp. 498–513. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-498-513

Summary

Objective: To choose materials and technical solutions for thermal insulation in the structure of the fencing of refrigerated car and container bodies. **Methods:** Experimental studies of the thermal properties of the selected materials were carried out on a physical model using climatic and test chambers, analytical calculations using thermal conductivity equation. **Results:** The thermal properties of the thermal fencing

structures of the body of refrigerated cars and containers were determined. **Practical importance:** New materials reduce the heat transfer coefficient of the fence, which will reduce fuel consumption and increase the safety of perishable goods, reduce weight and increase the volume of the body.

Keywords: Perishable goods, container, refrigerated car, refrigerated container, test chamber, heat transfer coefficient.

References

1. Boronenko Yu. P. Strategicheskiye zadachi vagonostroiteley v razvitiy tyazhelovesnogo dvizheniya [Strategic tasks of car builders in the development of heavy haul]. *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of Russian Federation]*, 2013, no. 5 (48), pp. 68–73. (In Russian)
2. Abdullaev B. A. Vybór teploizolyatsionnykh materialov dlya refrizheratornykh vagonov i konteynerov [Selection of heat-insulating materials for refrigerated cars and containers]. *Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proyekty [Rolling stock of the 21st century: ideas, requirements, projects]*. Materialy KHIV Mezhdunar. nauch. tekhnich. konferentsii, Sankt-Peterburg, 9–13 iyulya 2019 g. [Proceedings of the 14th Intern. Sci. technical conference, Saint Petersburg, July 9–13, 2019]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, pp. 50–53. (In Russian)
3. Kiselev I. G. *Teplotekhnika na podvizhnom sostave zheleznykh dorog*. Ucheb. posobiye dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy zheleznodorozhnogo transporta, obuchayushchikhsya po spetsial'nosti 190301 "Lokomotivy" i 190302 "Vagony" [Heat engineering on the rolling stock of railways. Textbook for students of higher educational institutions of railway transport, studying in the specialty 190301 "Locomotives" and 190302 "Wagons"]. Moscow, Transport Publ., 2008, 277 p. (In Russian)
4. *Tekhnicheskkiye usloviya TU 5760-001-83663241–2008. Zhidkiye keramicheskikh teploizolyatsionnyye pokrytiya serii "Korund"* [Technical conditions TU 5760-001-83663241–2008. Liquid ceramic heat-insulating coatings of the Korund series]. Compiled by A. S. Platov. Volgograd, 2008, 11 p. (In Russian)
5. *Issledovaniye teplovykh kharakteristik sverkh-tonkoy teploizolyatsii "Korund": tekhnich. usloviya [Investigation of the thermal characteristics of ultra-thin thermal insulation "Korund": technical conditions]*. Compiled by A. G. Perekhzhentsev. Volgograd, VGASU Publ., 2011, 25 p. (In Russian)
6. *ООО "Regent Baltika". Tekhnologii dlya izotermicheskikh khranilishch [LLC Regent Baltika. Technologies for isothermal storage]*. Available at: <https://baltic-united.ru/news/tekhnologii-dlja-izotermicheskikh-khranilish/> (accessed: October 10, 2020) (In Russian)
7. OST 24.050.65–86. *Vagony refrizheratornyye. Metodika provedeniya teplotekhnicheskikh ispytaniy [Refrigerated cars. Technique for conducting heat engineering tests]*. Moscow, Standartinform Publ., 1986, 23 p. (In Russian)
8. OST 33661–2015. *Ograzhdayushchiye konstruksii pomeshcheniy zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Metody ispytaniy po opredeleniyu teplotekhnicheskikh pokazateley s Popravkoy (protokol ot 10 dekabrya 2015 g. no. 48) [Enclosing structures of railway rolling stock premises. Test methods for determining thermal performance with the Amendment (protocol dated December 10, 2015, N 48)]*. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 32 p. (In Russian)
9. Efimov V. V. *Teplotekhnicheskii raschet refrizheratornykh transportnykh moduley. Metod. ukazaniya [Heat engineering calculation of refrigerated transport modules. Method. of indication]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2003, 64 p. (In Russian)
10. Levy F. L. A quick method for testing the overall heat transmission coefficient by dispensing liquid nitrogen. *Journal of Refrign.* January 1963. London, 1967, pp. 3–5.
11. Kitaev B. N. *Teplovoye vozdeystviye solnechnoy radiatsii na vagony [Thermal effect of solar radiation on cars]*. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1962, 32 p. (In Russian)
12. Meister A. O. & Yuhnevsky M. A. *Opredele-niye srednego koeffitsiyenta teploperedachi kuzovov passazhirskikh vagonov [Determination of the average heat transfer coefficient of passenger car bodies]*. Tez.

VI nauch.-praktich. konferentsii "Problemy i perspektivy razvitiya vagonostroyeniya" [6th Scientific and practical conference "Problems and prospects for the development of car building". Abstracts]. Bryansk, BG TU [Bryansk State Technical University] Publ., 2014, pp. 93–95. (In Russian)

13. Golubin A.A. Analiz metodov eksperimental'nogo opredeleniya koeffitsiyenta teploperedachi [Analysis of methods for experimental determination of the heat transfer coefficient]. *Voprosy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh rynochnoy ekonomiki*. Sb. statey molodykh uchenykh i aspirantov [Questions of the development of railway transport in a market economy. Collection of articles by young scientists and graduate students]. Ed. by Yu. M. Cherkashina, G. V. Gorod. Moscow, Gogrichiani Publ., 2007, pp. 99–107. (In Russian)

14. RD 24.050.15–89. Metodika opredeleniya srednego koeffitsiyenta teploperedachi ograzhdayushchikh konstruktsey kuzovov passazhirskikh vagonov [Methodology for determining the average heat transfer coefficient of the enclosing structures of passenger car bodies]. Utv. Ministerstvom tyazhelogo, energeticheskogo i transportnogo mashinostroyeniya SSSR 24 iyulya 1989 g. [Approved Ministry of Heavy, Energy and Transport Engineering of the USSR]. Moscow, 1989, 20 p. (In Russian)

15. Naumenko S.N., Teimurazov N.S. & Golubin A.D. Tochnost' opredeleniya koeffitsiyenta teploperedachi [Accuracy of determination of the heat transfer coefficient]. *Zheleznodorozhnyy transport na sovremennom etape: zadachi i puti ikh resheniya*. Sb. trudov [Railway transport at the present stage: tasks and solutions. Collection of articles]. Ed. by A. E. Semechkina. Moscow, Intext Publ., 2008, pp. 76–78. (In Russian)

16. Naumenko S. N., Teimurazov N. S. & Golubin A. A. Otsenka tochnosti opredeleniya v depovskikh usloviyakh koeffitsiyenta teploperedachi kuzova izotermicheskogo vagona [Evaluation of the accuracy of determining the heat transfer coefficient of the body of an isothermal car under depot conditions]. *Energosbezheniye i zashchita okruzhayushchey sredy na teploener-*

geticheskikh ob'yektakh zheleznodorozhnogo transporta, promyshlennosti i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva [Energy saving and environmental protection at heat and power facilities of railway transport, industry and housing and communal services]. Sb. dokl. uchastnikov Ob'yedinen. Nauch. sessii RAN [United scientific session of the Russian Academy of Sciences. Collection of participants' reports]. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., 2008, pp. 189–192. (In Russian)

17. Golubin A. A., Belova N. V. & Naumenko S. N. Vliyaniye pogreshnostey izmereniya pri opredelenii koeffitsiyenta teploperedachi ograzhdayushchikh konstruktsey izotermicheskogo vagona [Influence of measurement errors in determining the heat transfer coefficient of the enclosing structures of an isothermal car]. *Vestnik VNI-IZHT [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport]*, 2019, vol. 78, no. 2, pp. 100–104. <http://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-2-100-104> (In Russian)

18. Sokolov M. M., Varava V. I. & Levit G. M. Izmereniya i kontrol' pri remonte i ekspluatatsii vagonov [Measurement and control during the repair and operation of cars]. Moscow, Transport Publ., 1991, 158 p. (In Russian)

19. Churkov N. A. Kholodil'nyye perevozki i sodержaniye izotermicheskogo podvizhnogo sostava [Refrigerated hauling and maintenance of refrigerated rolling stock]. Moscow, Zheldorizdat Publ., 2006, 311 p. (In Russian)

20. Anisimov P. S. Ispytaniya vagonov [Testing of cars]. Moscow, Marshrut Publ., 2004, 197 p. (In Russian)

Received: July 10, 2020

Accepted: August 10, 2020

Author's information:

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

Bahrom A. ABDULLAEV – Graduate Student; baxrom86@yandex.ru

УДК 621.313.33

Мониторинг и диагностика технического состояния асинхронного тягового электродвигателя локомотивов с применением искусственных нейронных сетей на железных дорогах Республики Узбекистан

А. В. Грищенко, О. Р. Хамидов

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

Для цитирования: Грищенко А. В., Хамидов О. Р. Мониторинг и диагностика технического состояния асинхронного тягового электродвигателя локомотивов с применением искусственных нейронных сетей на железных дорогах Республики Узбекистан // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 514–524.
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-514-524

Аннотация

Цель: Диагностика неисправностей подшипников качения асинхронного тягового электродвигателя (АТЭД) локомотивов с применением искусственных нейронных сетей. **Методы:** Для контроля и диагностики технического состояния подшипниковых узлов АТЭД локомотивов используются программно-аппаратный комплекс и методы анализа данных. **Результаты:** Были исследованы неисправности подшипника качения АТЭД локомотивов. Проанализированы отказы подшипниковых узлов локомотивов. Рассмотрены вибрационные и токовые сигналы и соответствующие частотные спектры АТЭД, работающего в нормальных условиях и с различными неисправностями подшипников. Разработана модель для оценки технического состояния подшипников качения 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 технического состояния подшипников качения АТЭД локомотивов в реальном времени.

Ключевые слова: Подшипники качения, тяговый электродвигатель, нейронные сети, неисправности локомотивов, диагностика, наружное кольцо, внутреннее кольцо подшипников, сети Эльмана.

Введение

Одной из главных задач локомотивного хозяйства железных дорог Республики Узбекистан является повышение надежности асинхронных тяговых электродвигателей (АТЭД) локомотивов в целях обеспечения безопасности движения поездов с учетом реализации необходимых тяговых характеристик, улучшения габаритно-массовых

показателей, эксплуатации в широком диапазоне нагрузок и скоростей движения, в сложных климатических условиях [1]. В настоящее время во всем мире на тяговом подвижном составе применяются трехфазные АТЭД. Применение АТЭД дает возможность резко повысить секционную мощность локомотива, что отвечает растущим потребностям железных дорог Республики Узбекистан и других стран.

Мониторинг состояния и диагностика неисправностей подшипников локомотивов необходимы для оптимизации технического обслуживания и повышения уровня надежности. Отказы обычно начинаются с незначительных дефектов, которые со временем возрастают.

Основными задачами диагностики тяговых электродвигателей (ТЭД) локомотивов являются определение текущего состояния и прогнозирование изменения технического состояния подшипниковых узлов ТЭД в зависимости от наработки. В производстве внезапный выход из строя подшипников ТЭД локомотивов может привести к непоправимым последствиям. Очень важно выявлять любой дефект на самой ранней стадии, исключающей риск возникновения серьезных повреждений ТЭД. Система технической диагностики должна включать в себя регулярный мониторинг технического состояния локомотивных ТЭД, а также поиск неисправностей, повреждений, определение степени опасности дефектов и оценку остаточного ресурса оборудования [1, 2]. Поэтому к актуальным задачам для железной дороги относится проведение диагностики технического состояния ТЭД и локомотива в целом.

Диагностика технического состояния АТЭД и локомотива в целом

Раннее обнаружение и диагностика неисправностей с мониторингом состояния позволяют выполнять важные предупреждающие действия, избегая, таким образом, экономически вредных потерь элементов и деталей через адекватную систему управления техническим обслуживанием, а также остановки производства [3]. Неисправности подшипников в АТЭД составляют около 40–50% всех неисправностей двигателей [2, 4]. Подшипники двигателей, используемые в промышленности, как правило, подвержены неидеальным условиям, таким как перегрузка, перекос, электрическое размытие и недостаточная смазка [5]. Несущая конструкция состоит из внутреннего и наружного колец или кольца с канавками, а также набора шариков или элементов качения, размещенных между ними, как показано на рис. 1.

Локальное повреждение или износ вызывает последовательные периодические удары по сигналу вибрации кузова АТЭД. Амплитуда и период частоты этих попаданий определяются

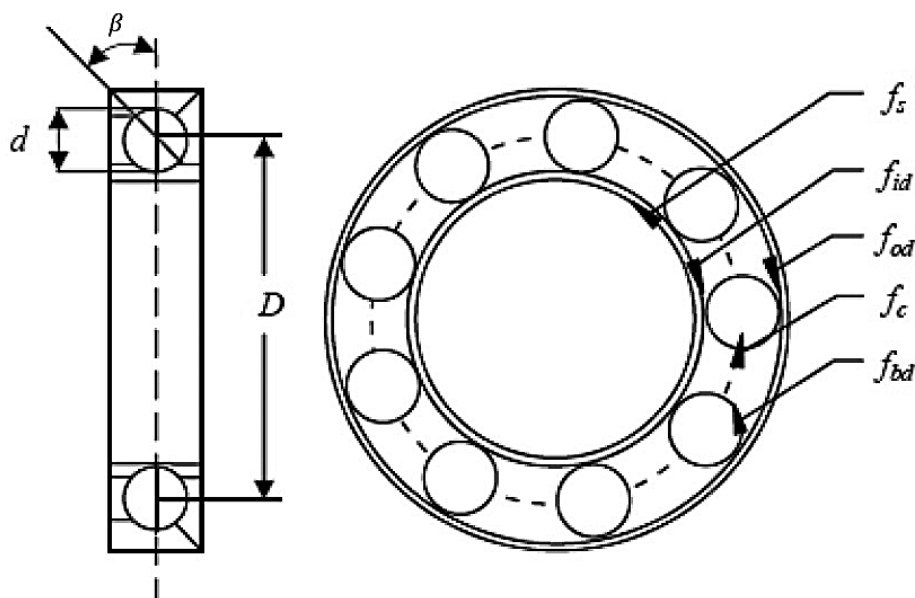


Рис. 1. Основные параметры конструкции подшипника качения:
 d и D – диаметры внутреннего и внешнего колец подшипника соответственно;
 β – угол контакта тел и дорожек качения, град.

в зависимости от скорости вращения, места повреждения и характерных размеров шариковых подшипников. Эти импульсы получены с учетом той части шарикоподшипника, в которой имеется неисправность. Фундаментальную частоту клетки находим из следующего соотношения [6]:

$$f_c = \frac{f_s}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos(\beta) \right),$$

частоту перекачивания тел качения – по формуле

$$f_{bd} = \frac{D \cdot f_s}{d} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2(\beta) \right),$$

частоты повреждения внутреннего и внешнего колец – по соотношениям соответственно:

$$f_{od} = \frac{n \cdot f_s}{2 \cdot d} \left(1 - \frac{d}{D} \cos(\beta) \right),$$

$$f_{id} = \frac{n \cdot f_s}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos(\beta) \right).$$

Разрушения подшипников можно классифицировать по двум основным категориям: один локализованный дефект на поверхности подшипника и обобщенная шероховатость, при которой большая площадь поверхности подшипника деградировала и стала нерегулярной [7]. Результатами таких дефектов являются продолжающаяся потеря геометрической точности поверхностей контакта качения и постепенное ухудшение функции подшипника, что приводит к увеличению прогиба, трения, температуры и вибрации.

Многие методы были использованы для диагностики неисправностей подшипников качения и могут быть классифицированы в зависимости от типа измерения. Это могут быть, например, вибрация, температура [8] или акустические измерения [9]. Измерение вибрации – наиболее широко используемый и эффективный способ обнаружения неисправностей подшип-

ников качения, но не дает четкого указания на неисправности при низкой скорости. Вибрация может быть зафиксирована с других механических частей, что приводит к ложным срабатываниям. Кроме того, поскольку сигналы вибрации относятся ко всем механическим элементам, они допускают только обнаружение неисправностей, а не их диагностику. Чтобы повысить надежность диагностики неисправностей, особенно для критических областей применения, помимо вибрации, сигнал тока статора может использоваться в качестве другого индикатора неисправности [10]. Показано, что он служит эффективным индикатором неисправности подшипника качения, особенно при низких скоростях двигателя [11, 12]. Более того, датчики тока не обязательно увеличивают стоимость системы, поскольку они уже являются частью цепей защиты питания в таких системах [13]. Таким образом, комбинированное использование сигналов как вибрации, так и тока обеспечит более надежную систему обнаружения и диагностики неисправностей без значительного повышения стоимости, и этот подход применяется в данной работе.

На рис. 2 приведено распределение отказов АТЭД локомотивов. На нем видно, что наибольшее количество отказов приходится на подшипниковый узел, неисправности обмотки статора, ротора АТЭД. Отказы подшипниковых узлов АТЭД локомотивов анализирует рис. 3.

Дискретное вейвлет-преобразование используется для получения наилучших характеристик сигналов вибрации и тока. Было показано, что оно является мощным инструментом для работы с нестационарными сигналами вибрации. Чтобы сократить дополнительное вычислительное время для классификации ошибок, необходим точный инструмент уменьшения размерности, чтобы выбрать наиболее информативные функции из набора функций вейвлета. Различные методы сокращения признаков, такие как анализ основных компонентов [5, 7] и разложение по эмпирическим модам [6], применялись для уменьшения избыточности функций.

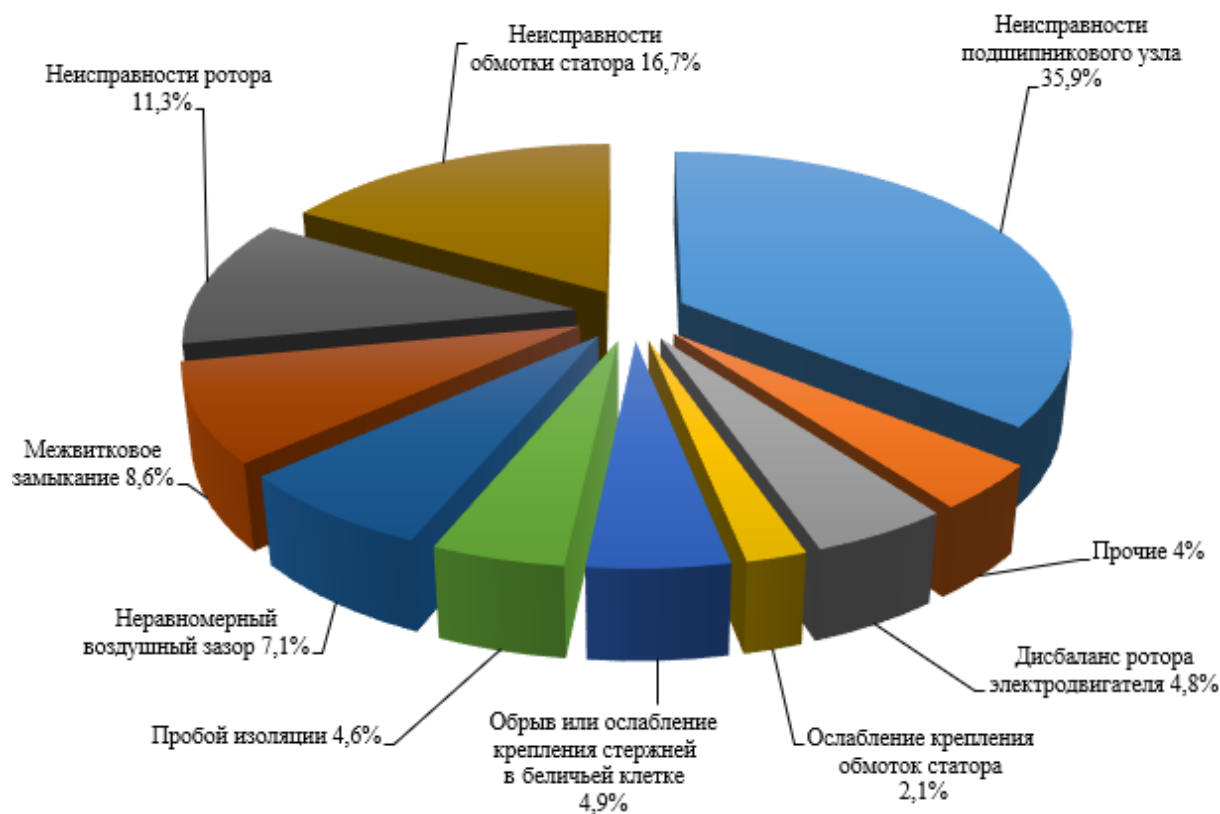


Рис. 2. Распределение отказов АТЭД локомотивов

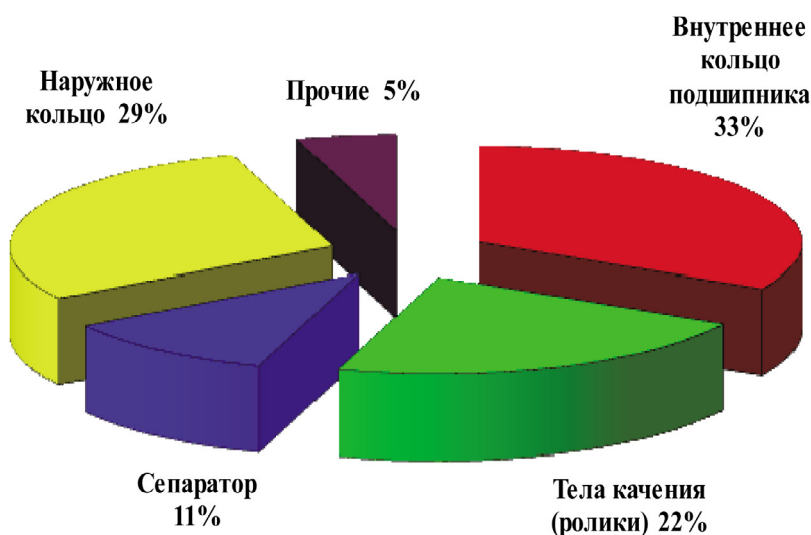


Рис. 3. Распределение количества неисправностей и отказов по забракованным деталям подшипниковых узлов локомотивов

Недавно искусственный интеллект был внедрен в процесс диагностики неисправностей для мониторинга состояния, включая методы, основанные на нечеткой логике [9], нейронные сети

(НС), генетические алгоритмы, системы адаптивного нейро-нечеткого вывода [10, 13] и машины опорных векторов [11]. Искусственные нейронные сети (ИНС) предоставляют превос-

ходный математический инструмент для моделирования нелинейных систем, а ИНС типа статического многослойного перцептрона, обученные с помощью алгоритма обратного распространения, широко применяются для задачи обнаружения неисправностей АТЭД при стационарной работе [6, 7]. Однако отклик статической сети в любой момент времени зависит только от значения входной последовательности в тот же момент времени. Динамические нейронные сети (ДНС) более универсальны, чем их статические аналоги, и дают возможность изучать динамику сложных нелинейных систем, которые обычные статические НС не могут моделировать [7]. ДНС были успешно применены для диагностики неисправностей [8], и исследования показали, что их использование может улучшить точность прогнозирования неисправностей систем мониторинга состояния АТЭД.

Эта модель относится к рекуррентной НС с линией задержки на входе, а выход подается на вход другой линией задержки [6, 7, 14]. Такая сеть с одним скрытым слоем и четырьмя выходными блоками показана на рис. 4.

Поэтому выходные состояния ИНС устанавливаются следующим образом:

[1; 0; 0; 0] – исправный подшипник;
 [0; 1; 0; 0] – неисправность произошла на наружном кольце подшипника;
 [0; 0; 1; 0] – неисправность произошла на внутреннем кольце подшипника;
 [0; 0; 0; 1] – неисправность произошла на теле качения подшипника.

Процесс диагностики неисправностей АТЭД локомотивов

Диагностика подшипниковых узлов АТЭД локомотивов заключается в решении задачи классификации, когда определяется принадлежность входного набора данных (диагностических признаков) к одному из нескольких заранее известных классов технического состояния подшипников АТЭД.

На рис. 5 представлена структурная схема контроля и диагностики технического состояния АТЭД локомотивов с применением ИНС.

Предложенная методология содержит следующие этапы: первый – сбор данных во время экспериментальных испытаний (сигналы тока и вибрации статора); второй – извлечение

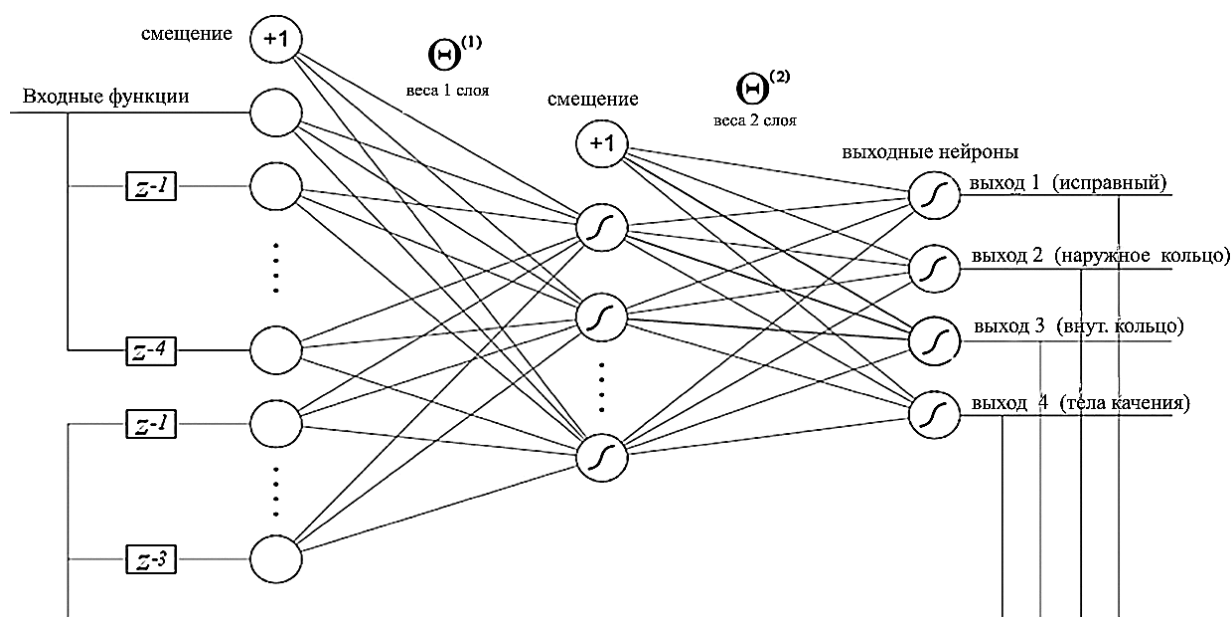


Рис. 4. Оценка технического состояния подшипников качения ТЭД с использованием ИНС

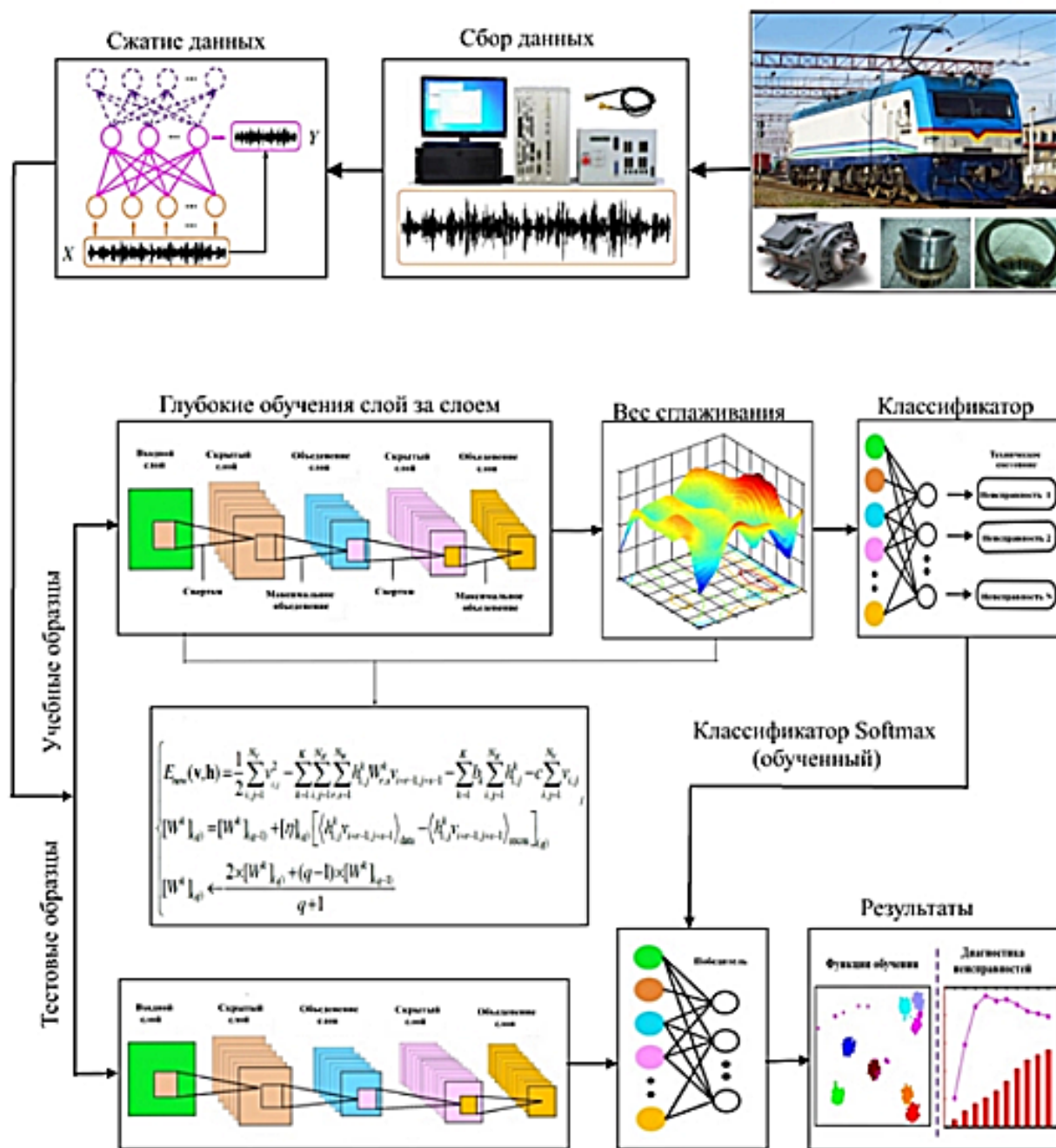


Рис. 5. Структурная схема оценки технического состояния АТЭД локомотивов с применением ИНС

и уменьшение признаков; третий – классификация неисправностей с использованием ИНС.

Из сигналов вибрации и тока видно, что амплитуда сигнала формы волны времени при дефекте неисправности намного больше, чем в безотказных случаях, и, как правило, амплитуда

сигнала формы волны времени снижается при уменьшении нагрузки. На рис. 6, а и б показаны сигналы тока и вибрации и их соответствующие частотные характеристики АТЭД, работающего в нормальных условиях и с различными неисправностями подшипников, при полной нагрузке

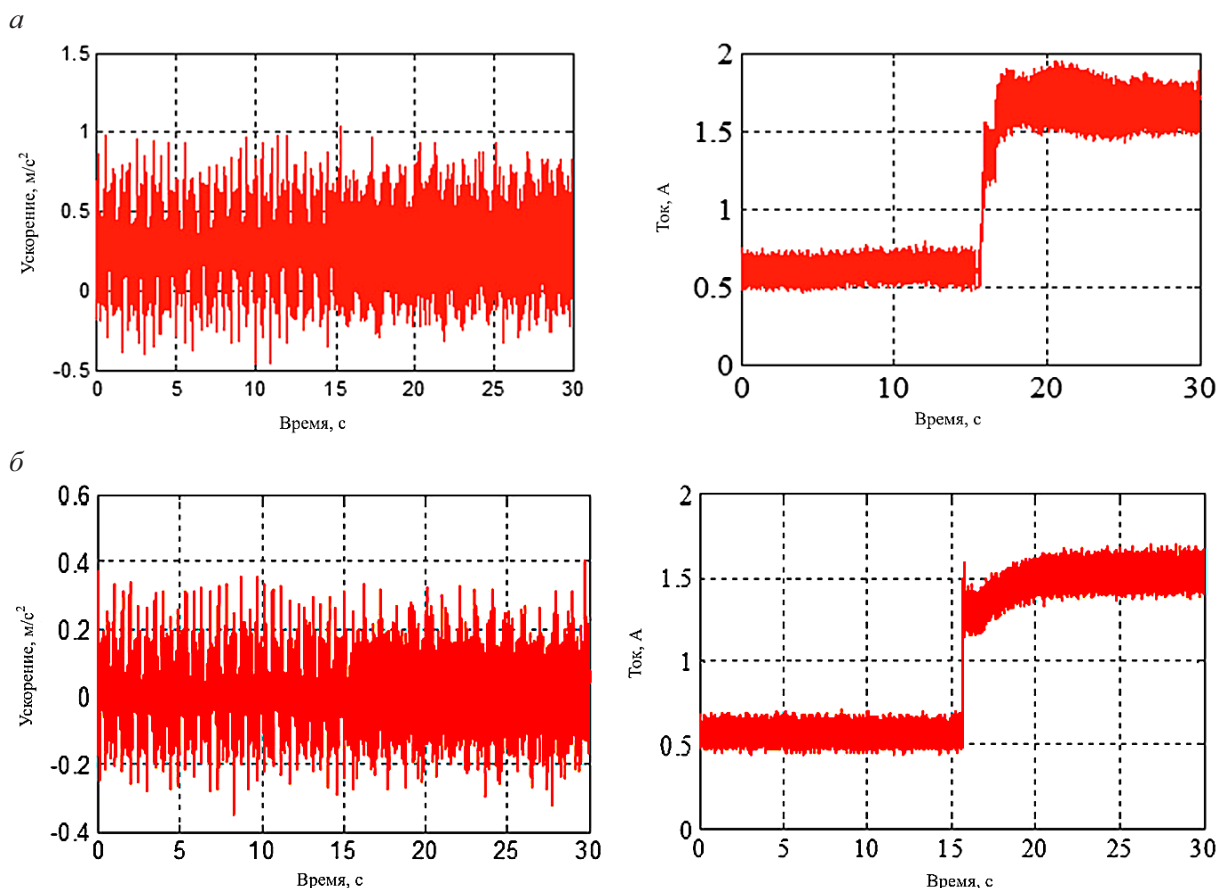


Рис. 6. Вибрационные и токовые сигналы и соответствующие частотные спектры АТЭД: при повреждении подшипника качения внутреннего (а) и наружного (б) колец

и переменных скоростях. Сигналы отбирались с частотой 3 кГц и продолжительностью 30 с.

Оборудование, используемое для сбора данных, состоит из экспериментальной установки, подшипников качения, датчиков, электродвигателя, гидравлического домкрата, ноутбука, тензодатчика, инструментов сбора данных и современного программного обеспечения.

Чтобы выбрать наиболее подходящую для процесса моделирования, сеть была протестирована в зависимости от того, насколько эффективно она реагирует на любые изменения при моделировании. Таким образом, количество используемых скрытых слоев было равно одному, а количество скрытых узлов выбиралось методом проб и ошибок, поскольку в большинстве случаев не было способов установить количество скрытых узлов без опробования нескольких се-

тей. Как правило, среднеквадратическая ошибка (*MSE*) использовалась для представления производительности сети, чтобы определить лучшую сеть [3, 12]:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - a_i)^2,$$

где e_i – ошибка; t_i – ожидаемое значение; a_i – фактические значения; N – количество данных.

На рис. 7 представлены результаты обучения, проверки и тестирования с помощью сети Эльмана.

Эффективность оптимальной сети была достигнута методом проб и ошибок, от двух до 20 скрытых узлов вместе с сетями Эльмана. Оптимальная сеть была найдена среди сетей на основе наименьших ошибок перекрестной

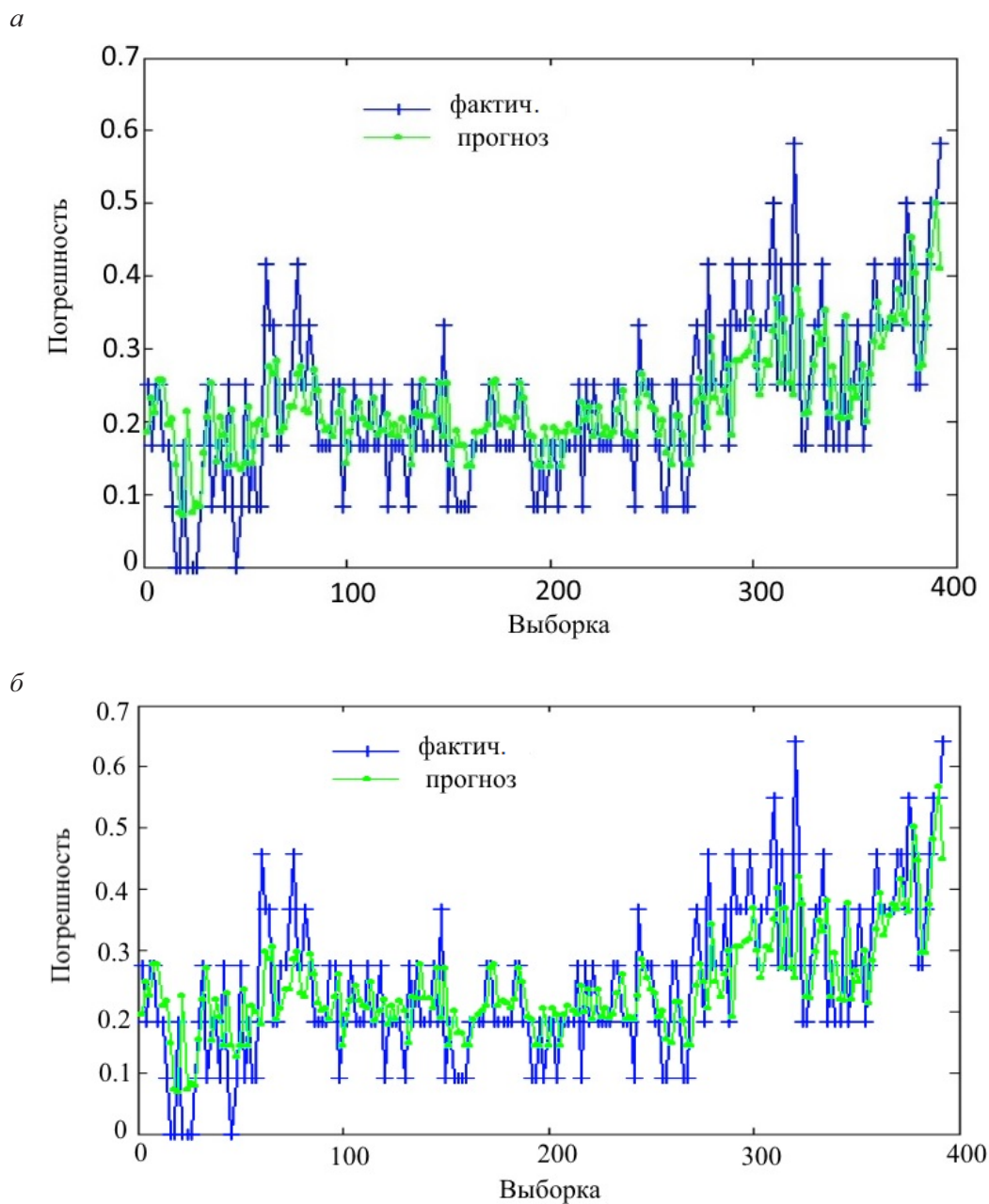


Рис. 7. Результаты обучения (а) и проверки (б) с использованием ИНС

проверки. Таким образом, сеть Эльмана была выбрана в качестве оптимальной.

Применение этих методов к реальным данным показало, что на практике они представляют собой эффективный классификатор неисправностей, способный довольно точно обнаруживать и классифицировать неисправности подшипников в нестационарных условиях эксплуатации.

Заключение

В статье был предложен принцип обнаружения неисправностей подшипников качения локомотивов. Для интеллектуального процесса обнаружения неисправностей были определены алгоритмы распознавания образов на основе ИНС. Чтобы проверить точность рассмотренного метода, был разработан эксперименталь-

ный набор и собраны соответствующие данные в трех режимах безопасности: неисправность внешнего кольца и неисправность внутреннего кольца. По нашему мнению, следует внести данные в НС с целью идентификации вида режима работы подшипниковых узлов АТЭД локомотивов.

Библиографический список

1. Грищенко А. В. Аппарат искусственных нейронных сетей для диагностики современного локомотива / А. В. Грищенко, В. В. Грачев, Ю. В. Бабков, Ю. И. Клименко, С. И. Ким, К. С. Перфильев, М. В. Федотов // Локомотив. – 2012. – № 7. – С. 36–40.
2. 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.
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. 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.
5. Li B. Neural network based motor rolling bearing fault diagnosis / B. Li, M. Chow, Y. Tipsuwan, J. C. Hung // IEEE Trans. Industrial Electronics. – 2000. – Vol. 47 (5). – P. 1060–1068.
6. Хамидов О. Р. Диагностирование и моделирование несимметричных режимов асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов с применением искусственных нейронных сетей / О. Р. Хамидов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2019. – Т. 16. – Вып. 2. – С. 251–262.
7. Hyun C. Fault detection and isolation of induction motors using recurrent neural networks and dynamic Bayesian modeling / C. Hyun, J. Knowles, S. Fadali, L. Kwon // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2010. – Vol. 18 (2). – P. 430–437.
8. Хамидов О. Р. Оценка технического состояния асинхронных тяговых электродвигателей электровазос 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.
9. 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.
10. Хамидов О. Р. Математическая модель вибровозмущающих 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.
11. Бабков Ю. В. Модернизация электропривода тепловозов и электровазос 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.
12. Prieto D. Bearing fault detection by a novel condition-monitoring scheme based on statistical-time features and neural networks / D. Prieto, G. Cirrincione, G. Espinosa, A. Ortega, H. Henao // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – Vol. 60 (8). – P. 3398–3407.
13. 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.
14. Wang T. Rolling element bearing fault diagnosis via fault characteristic order analysis / T. Wang, M. Liang, W. Cheng // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2014. – Vol. 45 (1). – P. 139–153.

Дата поступления: 08.04.2020

Решение о публикации: 24.04.2020

Контактная информация:

ГРИЩЕНКО Александр Васильевич – д-р техн. наук, профессор; klok@land.ru

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

Monitoring and diagnostics of the technical condition of the asynchronous traction motor of locomotives using artificial neural networks on the railways of the Republic of Uzbekistan

A. V. Grishchenko, O. R. Khamidov

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

For citation: Grishchenko A. V., Khamidov O. R. Monitoring and diagnostics of the technical condition of the asynchronous traction motor of locomotives using artificial neural networks on the railways of the Republic of Uzbekistan. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 4, pp. 514–524. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-514-524

Summary

Objective: Diagnostics of malfunctions of rolling bearings of an asynchronous traction electric motor (ATEM) of locomotives using artificial neural networks. **Methods:** To control and diagnose the technical condition of the ATEM bearing units of locomotives, a hardware-software complex and data analysis methods are used. **Results:** We investigated the malfunctions of the ATEM rolling bearing of locomotives. The analysis of failures of locomotive bearing units is carried out. Vibration and current signals and the corresponding frequency spectra of an ATEM operating under normal conditions and with various bearing faults are considered. A model for assessing the technical condition of rolling bearings of locomotives has been developed, and the importance of anticipatory diagnostics has been substantiated, which makes it possible to identify defects in advance at the earliest stage of their development. **Practical importance:** The results of the research can be used in the system for diagnosing the technical condition of rolling bearings of traction electric motors of locomotives in real time.

Keywords: Rolling bearings, traction motor, neural networks, locomotive malfunctions, diagnostics, outer ring, inner ring of bearings, Elman networks.

References

1. Grishchenko A. V., Grachov V. V., Babkov Yu. V., Klimenko Yu. I., Kim S. I., Perfil'yev K. S. & Fedotov M. V. Apparat iskusstvennykh neyronnykh setey dlya diagnostiki sovremennogo lokomotiva [Apparatus for artificial neural networks for diagnostics of modern locomotive]. *Lokomotiv [Locomotive]*, 2012, no. 7, pp. 36–40. (In Russian)
2. Khamidov O. R. & Kasymov O. T. Razrabotka metodiki kompleksnogo diagnostirovaniya asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta [Development of a methodology for complex diagnostics of asynchronous traction electric motor of railway rolling stock]. *Materialy konferentsiy GNII "Natsrazvitiye". Sb. izbrannykh statey [Proceedings of the conferences of the State Research Institute "National Development"]*. Collection of selected articles]. Saint Petersburg, GNII "Natsrazvitiye" [State Research Institute "National Development"] Publ., 2017, pp. 32–39. (In Russian)
3. Grishchenko A. V. & Kozachenko E. V. *Novyye elektricheskiye mashiny lokomotivov*. Ucheb. posobiye dlya vuzov zh.-d. transporta [New electric machines of locomotives. Textbook for universities railway transport]. Moscow, Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training centre for railway transport education] Publ., 2008, 271 p. (In Russian)
4. Grachev V. V., Grishchenko A. V. & Bazilevskiy F. Yu. O dostovernosti pryamykh sposobov operativnogo kontrolya energoeffektivnosti teplovozov v ekspluatatsii [On the reliability of direct methods of operational control

of the energy efficiency of diesel locomotives in operation]. *Vestnik Instituta problem yestestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznnykh dorog* [Bulletin of the Institute of Natural Monopolies Problems: Railway Engineering], 2018, no. 2 (42), pp. 40–48. (In Russian)

5. Li B., Chow M., Tipsuwan Y. & Hung J. C. Neural network based motor rolling bearing fault diagnosis. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 2000, vol. 47 (5), pp. 1060–1068.

6. Khamidov O. R. Diagnostirovaniye i modelirovaniye nesimmetrichnykh rezhimov asinkhronnykh tyagovykh elektrodvigately lokomotivov s primeneniye iskusstvennykh neyronnykh setey [Diagnostics and modeling of asymmetric modes of asynchronous traction electric motors of locomotives using artificial neural networks]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 251–262. (In Russian)

7. Hyun C., Knowles J., Fadali S. & Kwon L. Fault detection and isolation of induction motors using recurrent neural networks and dynamic Bayesian modeling. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, vol. 18 (2), pp. 430–437.

8. Khamidov O. R. & Kasymov O. T. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnykh tyagovykh elektrodvigately elektrovovov serii “UZ-EL” sredstvami vibrodiagnostiki [Assessment of the technical condition of asynchronous traction electric motors of electric locomotives of the UZ-EL series by means of vibration diagnostics]. *Materialy konferentsiy GNII “Natsrazvitiye”*. Sb. izbrannykh statey [Proceedings of the conferences of the State Research Institute “National Development”. Collection of selected articles]. Saint Petersburg, GNII “Natsrazvitiye” [State Research Institute “National Development”] Publ., 2017, pp. 13–19. (In Russian)

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

10. Khamidov O. R. & Panchenko M. N. Matematicheskaya model’ vibrovostmushchayushchikh sil loko-

motivnogo asinkhronnogo elektrodvigatelya [Mathematical model of vibration disturbance forces of a locomotive asynchronous electric motor]. *Izvestiya 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)

11. Babkov Yu. V., Perfil’ev K. S., Yevseyev V. Yu., Grachev V. V. & Kurilkin D. N. Modernizatsiya elektropivoda teplovozov i elektrovovov s tyagovymi elektrodvigatelyami postoyannogo toka [Modernization of electric drive of diesel locomotives and electric locomotives with direct current traction motors]. *Trudy tret’ey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Perspektivy razvitiya servisnogo obsluzhivaniya lokomotivov”* [Proceedings of the Third International Scientific and Practical Conference “Prospects for the Development of Locomotive Service”]. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., 2018, pp. 114–120. (In Russian)

12. Prieto D., Cirrincione G., Espinosa G., Ortega A. & Henao H. Bearing fault detection by a novel condition-monitoring scheme based on statistical-time features and neural networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 60 (8), pp. 3398–3407.

13. Mikhaylov A. S. & Staroverov B. A. Problemy i perspektivy ispol’zovaniya iskusstvennykh neyronnykh setey dlya identifikatsii i diagnostiki tekhnicheskikh ob’ektov [Problems and prospects of using artificial neural networks for identification and diagnostics of technical objects]. *Vestnik IGEU* [Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University]. Ivanovsk, IGEU [Ivanovo State Power Engineering University] Publ., 2013, iss. 3, pp. 64–66. (In Russian)

14. Wang T., Liang M. & Cheng W. Rolling element bearing fault diagnosis via fault characteristic order analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, vol. 45 (1), pp. 139–153.

Received: April 08, 2020

Accepted: April 24, 2020

Author’s information:

Alexander V. GRISHCHENKO – D. Sci. in Engineering, Professor; klok@land.ru

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

УДК 625.033.34

Сравнительная оценка динамической нагруженности длиннобазных вагонов-платформ

Д. И. Загорский, М. Г. Мяделец

ООО «ИЦПС», Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 108

Для цитирования: Загорский Д. И., Мяделец М. Г. Сравнительная оценка динамической нагруженности длиннобазных вагонов-платформ // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 525–533.

DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-525-533

Аннотация

Цель: Проведение сравнительного анализа динамической нагруженности длиннобазных вагонов-платформ на тележках различных типов. **Методы:** Проводилось сравнение экспериментальных данных ходовых прочностных испытаний длиннобазных вагонов-платформ, полученных Инженерным центром подвижного состава в условиях испытательного полигона на участке пути Белореченск–Майкоп Северо-Кавказской железной дороги. Использовалось разделение вагонов-платформ на условные группы в зависимости от ходовой части. **Результаты:** Выявлено, что применение в конструкции тележек боковых скользунов постоянного контакта уменьшает динамическую нагруженность вагона-платформы на прямых участках пути в 1,2–1,5 раза. Полученные зависимости коэффициентов вертикальной динамики для хребтовой и боковой балок показали, что для всех вагонов-платформ они идентичные по характеру и отличаются только уровнем значений. Применение в длиннобазных вагонах-платформах современных тележек с нелинейным рессорным подвешиванием и боковыми скользунами постоянного контакта приводит к понижению динамической нагруженности рамы в среднем на 15–25 %, тем самым уменьшая вероятность возникновения возможных повреждений вагона-платформы в эксплуатации. **Практическая значимость:** Показана необходимость уточнения нормативной зависимости распределения по скорости движения коэффициентов вертикальной динамики для вагонов-платформ на тележках различных типов. Ее корректировка позволит повысить точность определения параметров напряженно-деформированного состояния рамы вагона-платформы. Результаты сравнения могут быть рекомендованы к практическому использованию при оценке прочности и сопротивления усталости конструкции вагона-платформы.

Ключевые слова: Длиннобазные вагоны-платформы, боковой скользящий, испытания на усталость, ходовые прочностные испытания, коэффициент запаса сопротивления усталости, ходовые испытания, коэффициент вертикальной динамики.

За последние несколько лет отечественными вагоностроительными заводами были поставлены на производство более 20 моделей длиннобазных вагонов-платформ (рис. 1) для перевозки крупнотоннажных контейнеров. Основными отличиями моделей являются конструктивное исполнение рамы и ходовая часть.

Для подтверждения соответствия действующим нормативным документам [1–3] и тех-

ническому регламенту [4] вагоны-платформы подвергались комплексу испытаний, проведенных аккредитованными испытательными центрами. Анализ результатов испытаний показал, что наиболее важны для этого типа вагонов испытания на усталость.

Целью усталостных испытаний является подтверждение необходимого коэффициента запаса сопротивления усталости n , которое дости-

а



б



в



г



Рис. 1. Длиннобазные вагоны-платформы:

а – модель 13-9751-02 на тележках 18-9771; б – модель 13-2118 на тележках 18-100;
в – модель 13-9834-01 на тележках 18-9810; г – модель 13-6964 на тележках 18-194-1

гается при превышении предела выносливости в 1,3–1,5 раза величины эквивалентной амплитуды динамического напряжения при движении вагона в эксплуатации:

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,\varepsilon}} \geq [n],$$

где $\sigma_{a,N}$ – предел выносливости, МПа, для контрольной зоны при симметричном цикле и установившемся режиме нагружения при базовом числе циклов $N_0 = 10^7$; $\sigma_{a,\varepsilon}$ – эквивалентная приведенная амплитуда динамических напряжений при движении вагона в эксплуатации, МПа; $[n]$ – минимально допустимый коэффициент запаса сопротивления усталости для выбранной зоны вагона.

Предел выносливости определяется при стендовых ресурсных испытаниях [5] на специализированных стендах с пневмомеханическим возбуждением колебаний резонансного типа. Такие испытания [6] показали, что на значение предела выносливости влияет как конструктивное исполнение рамы вагона, так и технология ее изготовления.

При осуществлении ходовых прочностных испытаний [7, 8], по результатам которых нахо-

дится величина эквивалентной амплитуды динамического напряжения, помимо самой рамы на динамическую нагруженность вагона влияет также тип установленных под вагон тележек.

Проведенные в Инженерном центре (ИЦПС) исследования [9] показали, что экспериментальная зависимость динамической нагруженности, которую можно выразить через распределение коэффициента вертикальной динамики по скорости движения, значительно отличается от обобщенной нормативной зависимости (рис. 2) по причине возникновения резонансных колебаний рамы вагона-платформы. Однако эти исследования были проведены для платформ на тележках-аналогах модели 18-100.

В последнее время на сетях магистральных железных дорог курсируют вагоны-платформы с инновационными тележками (рис. 3), конструктивные решения которых направлены на улучшение ходовых качеств вагона и снижение его воздействия на путь. Поэтому актуальным является проведение сравнительного анализа динамической нагруженности длиннобазных вагонов-платформ на тележках различных типов.

Накопленный в ИЦПС опыт проведения ходовых испытаний позволил осуществить та-

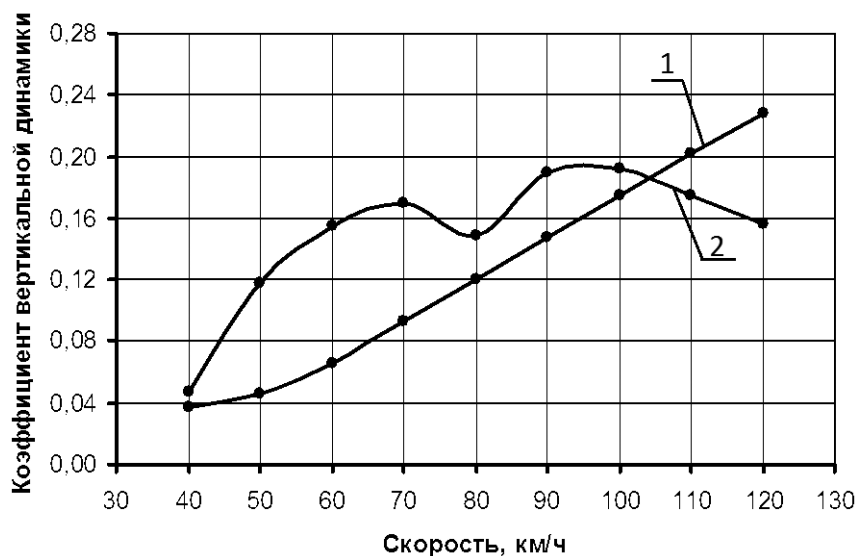


Рис. 2. Зависимость коэффициента вертикальной динамики от скорости движения вагона-платформы: 1 – экспериментальная зависимость; 2 – нормативная зависимость

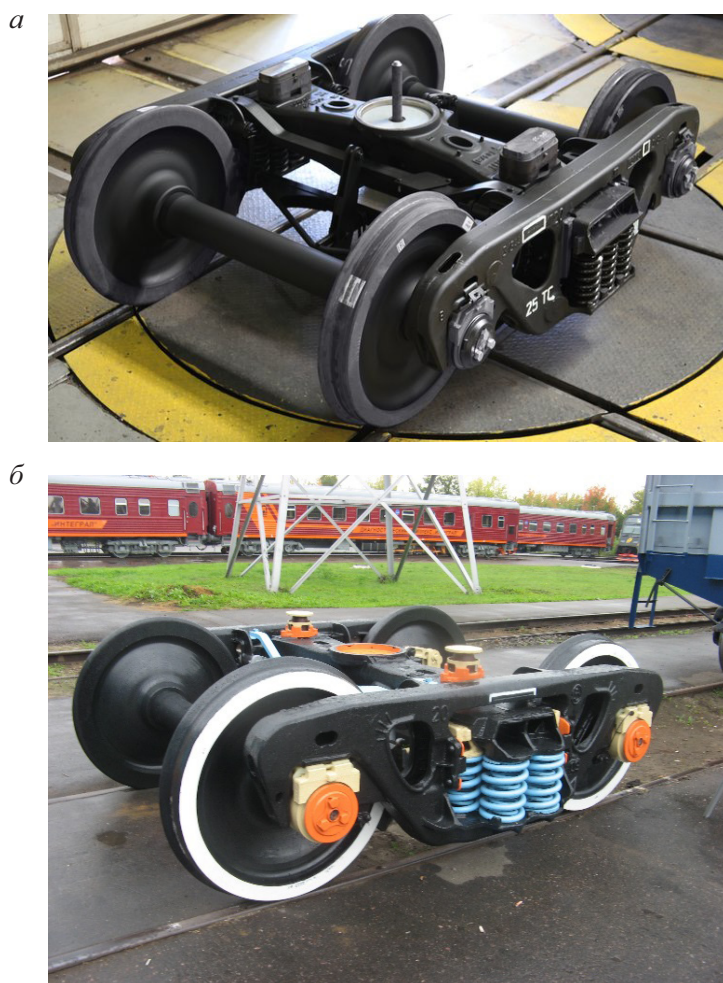


Рис. 3. Тележки двухосные грузовых вагонов моделей: *а* – 18-9855 производства АО «ТВСЗ»; *б* – 18-194-1 производства АО «НПК «Уралвагонзавод»»

кую сравнительную оценку. Для этого из числа испытанных вагонов были выбраны вагоны-платформы, имеющие схожее конструктивное исполнение рамы: конструкция с хребтовой и боковыми балками. Испытания данных вагонов были проведены в условиях испытательного полигона на участке пути Белореченск–Майкоп Северо-Кавказской железной дороги в период 2008–2019 гг.

Исследуемые вагоны-платформы в зависимости от ходовой части были разделены на три условные группы (таблица):

- осевая статическая нагрузка – 23,5 тс, тип бокового скользуна – зазорный;
- осевая статическая нагрузка – 23,5 тс, тип бокового скользуна – постоянный контакт;

– осевая статическая нагрузка – 25 тс, тип бокового скользуна – постоянный контакт.

Для наиболее нагруженных зон рамы вагона (рис. 4), в которых происходило разрушение опытных образцов при проведении ресурсных испытаний, определялись динамические напряжения

$$\sigma_{\text{дин}} = \sqrt[m]{\sum \sigma_{ai}^m \cdot P_{\sigma i}} \quad (1)$$

и коэффициенты вертикальной динамики Kd в контрольных точках (рис. 5) при реализованных на испытаниях скоростях движения:

$$Kd = \frac{\sigma_{\text{дин}}}{\sigma_{\text{ст}}} \quad (2)$$

Классификация длиннобазных вагонов-платформ

Но- мер груп- пы	Модель вагона (завод- изготовитель)	Масса тары, т	Грузо- подъем- ность, т	База вагона, мм	Модель тележки (расчетная стати- ческая нагрузка от колесной пары на рельсы, кН)	Тип бокового скользуна (тип упругого элемента) [10]
1	13-9781 (АО «Промтрактор- Вагон»)	25±0,5	68,5	19 500	18-9770 (230,5)	Зазорный
	13-9834 (АО «ТВСЗ»)	24±0,5	69,5	19 000	18-100 или 18-9841 (230,5)	
	13-9751-01 (АО «Трансмаш»)	24,6±0,4	69,0	19 000	18-9896 (230,5)	
2	13-9834-01 (АО «ТВСЗ»)	24±0,5	69,5	19 000	18-9810 (230,5)	Постоянный контакт (винтовая пружина)
	13-9751-02 (АО «Трансмаш»)	24,6±0,4	69,0	19 000	18-9771 (230,5)	Постоянный контакт (неметаллический упругий элемент)
3	13-6903 (АО «ТВСЗ»)	25±0,5	74,5	19 000	18-9855 (245)	Постоянный контакт (винтовая пружина)
	13-6964 (АО «ЗМК»)	25,5 _{-0,5}	74,5	18 650	18-194-1 (245)	Постоянный контакт (неметаллический упругий элемент)

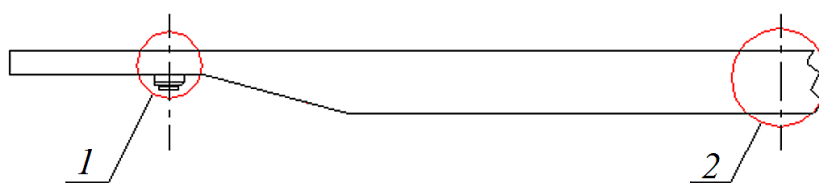


Рис. 4. Зоны разрушений вагонов-платформ: 1 – шкворневой узел рамы; 2 – средняя часть рамы

В (1), (2) m – показатель степени в уравнении кривой усталости, σ_{ai} – амплитуда динамических напряжений от вертикальной динамики (МПа); $P_{\sigma i}$ – частота появления амплитуд динамических напряжений с уровнем σ_{ai} , $\sigma_{ст}$ – напряжение от вертикальной статической нагрузки (МПа).

Для этого были выбраны экспериментальные данные, полученные на прямом участке

железнодорожного пути, где на вагон действует в основном вертикальная динамическая нагрузка, которая вносит основной вклад в накопление усталостного повреждения. С целью исключения влияния продольной динамической силы на значения напряжений учитывались только те отрезки опытных записей, которые были зарегистрированы при движении вагона с

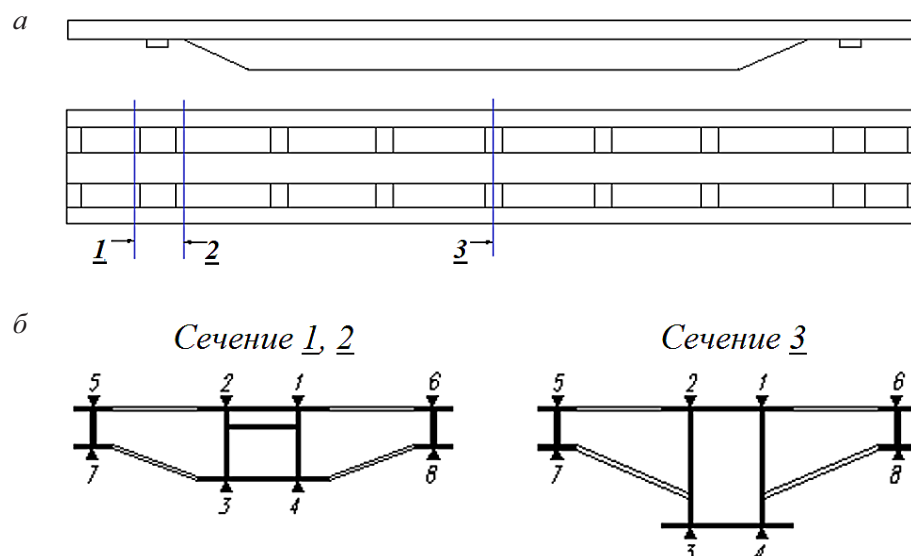


Рис. 5. Расположение контрольных точек на раме вагона-платформы:
 а – схема расположения контрольных сечений (1–3);
 б – схема расположения контрольных точек (1–8) в контрольных сечениях (1–3)

постоянной скоростью. Все рассматриваемые вагоны-платформы подвергались ходовым испытаниям при схеме погрузки 2×40-футовых контейнера, так как при этой схеме реализуются наибольшие изгибающие моменты в средней части и шкворневых узлах рамы вагона.

На основе полученных данных для условных групп вагонов-платформ по формулам были вычислены средние значения коэффициентов вертикальной динамики в контрольных сечениях и построены соответствующие экспериментальные зависимости (рис. 6):

– сечения 1 и 2 (шкворневой узел рамы)

$$Kd_{V_i}^{S_1, S_2} = \frac{\sum_{o=1}^m \frac{\sum_{j=1}^S \frac{\sum_{p=1}^n Kd_p^{\text{верх}}}{n} + \frac{\sum_{p=1}^k Kd_p^{\text{низ}}}{k}}{2}}{2m},$$

– сечение 3 (средняя часть рамы)

$$Kd_{V_i}^{S_3} = \frac{\sum_{o=1}^m \frac{\sum_{p=1}^n Kd_p^{\text{верх}}}{n} + \frac{\sum_{p=1}^k Kd_p^{\text{низ}}}{k}}{2m},$$

где Kd – коэффициент вертикальной динамики; S_1, S_2, S_3 – контрольные сечения рамы вагона-платформы; V_i – счетчик скоростей движения вагона; j – счетчик контрольных сечений шкворневого узла рамы; p – счетчик контрольных точек, установленных на хребтовой (боковой) балке; o – счетчик вагонов-платформ в условной группе; S – количество контрольных сечений шкворневого узла рамы; n, k – количество контрольных точек, установленных соответственно на верхнем и нижнем листах хребтовой (боковой) балки; m – количество вагонов-платформ в условной группе.

Из рис. 6 следует, что коэффициенты вертикальной динамики вагонов-платформ на тележках с зазорными боковыми скользунами выше, чем в других группах вагонов. Особенно это заметно в центральном сечении рамы, где при скоростях 70 и 90 км/ч наблюдаются два ярко выраженных пика, вызванных резонансными колебаниями рамы вагона.

Применение боковых скользунов постоянного контакта (вторая группа вагонов-платформ) снижает динамическую нагруженность вагона на прямых участках пути в 1,2–1,5 раза и сдвигает второй пик на 20 км/ч в сторону увеличе-

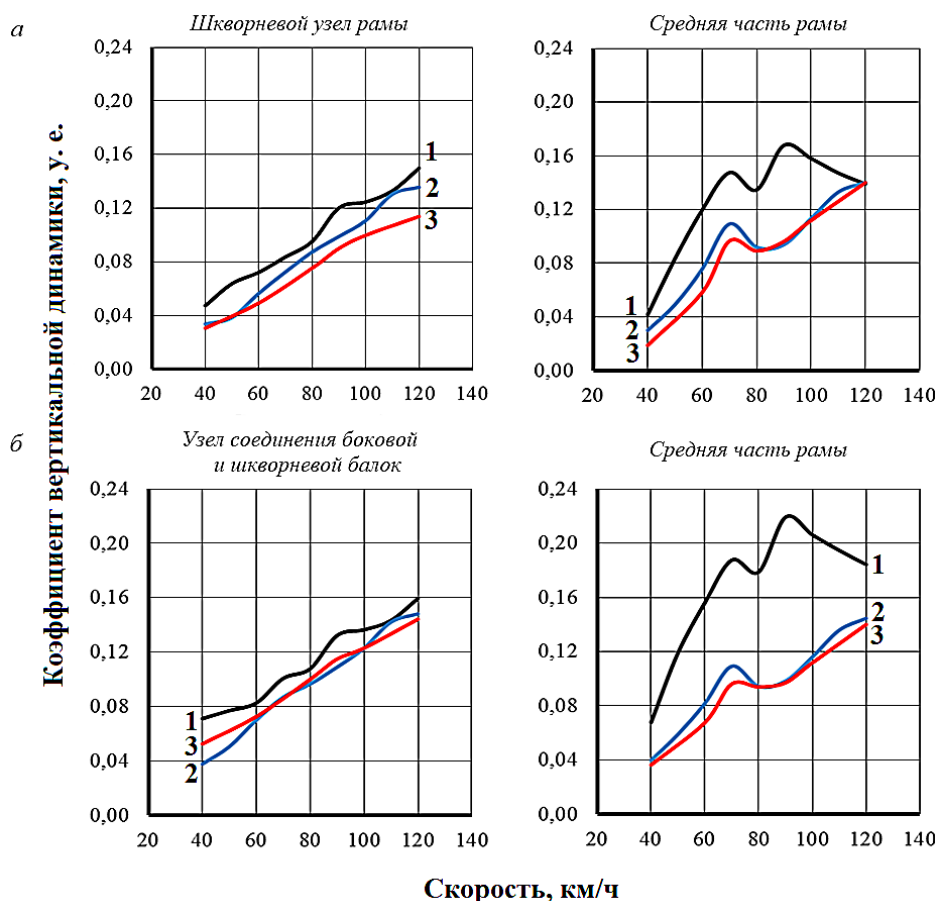


Рис. 6. Коэффициент вертикальной динамики: *а* – хребтовая балка; *б* – боковая балка.
Группы: 1 – первая; 2 – вторая; 3 – третья

ния скорости, при этом первый пик остается при той же скорости.

Также первый пик наблюдается и у третьей группы вагонов-платформ, а второй пик отсутствует вовсе. Если не учитывать наличие резонансного явления на высокой скорости у второй группы вагонов-платформ, то вторая и третья группы отличаются между собой увеличенным коэффициентом вертикальной динамики на 15–20 % при скоростях до 80 км/ч.

В шкворневом узле у всех групп вагонов-платформ характер изменения коэффициента вертикальной динамики иной и прямо пропорционален скорости движения вагона. При этом значения коэффициентов у второй и третьей групп ниже в среднем на 20 %.

Полученные зависимости коэффициентов вертикальной динамики для хребтовой и бо-

ковой балок показали, что они для всех групп вагонов-платформ идентичные по характеру и отличаются только значениями.

Таким образом, сравнительный анализ, выполненный по экспериментальным данным, показал, что применение в длиннобазных вагонах-платформах современных тележек с нелинейным рессорным подвешиванием и боковыми скользунками постоянного контакта приводит к снижению динамической нагруженности рамы в среднем на 15–25 %, тем самым уменьшая вероятность возникновения возможных повреждений вагона-платформы в эксплуатации.

Библиографический список

1. ГОСТ 26686–96. Вагоны-платформы магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие техниче-

ские условия. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1997. – 45 с.

2. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – М. : Стандартинформ, 2016. – 45 с.

3. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 317 с.

4. ТР ТС 001/2011. Технический регламент ТС «О безопасности железнодорожного подвижного состава». – Утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 15.07.2011 г. № 710.

5. Вагоны-платформы увеличенной длины. Методика испытаний на сопротивление усталости. – М. : ОАО «РЖД», 2006. – 20 с.

6. Загорский Д. И. Совершенствование методики испытаний на усталость рам длиннобазных контейнерных вагонов-платформ / Д. И. Загорский // Совершенствование конструкций универсальных грузовых вагонов : сб. науч. трудов / под ред. А. А. Битюцкого. – СПб. : ОМ-Пресс, 2010. – Вып. 8. – С. 65–74.

7. ГОСТ 33788. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамическая качества. – М. : Стандартинформ, 2016. – 33 с.

8. РД 24.050.37.95. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. – М. : ГосНИИВ, 1995. – 102 с.

9. Загорский Д. И. Совершенствование расчетного метода определения амплитуды динамических напряжений при оценке усталостной прочности рамы вагона-платформы / Д. И. Загорский // Исследование параметров грузовых вагонов : сб. науч. трудов / под ред. А. А. Битюцкого. – СПб. : ОМ-Пресс, 2011. – Вып. 10. – С. 110–122.

10. ГОСТ 34387–2018. Скользуну тележек грузовых вагонов. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2018. – 13 с.

Дата поступления: 30.06.2020

Решение о публикации: 20.07.2020

Контактная информация:

ЗАГОРСКИЙ Денис Игоревич – зам. руководителя отдела комплексных испытаний;
zdi@engcenter.ru

МЯДЕЛЕЦ Максим Геннадьевич – инженер-испытатель; mmg@engcenter.ru

Comparative assessment of dynamic loading long-base flat wagons

D. I. Zagorsky, M. G. Myadelets

LLC “ICPS” [Engineering Center of Carriage Building], 108, Fontanka River nab., Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

For citation: Zagorsky D. I., Myadelets M. G. Comparative assessment of dynamic loading long-base flat wagons. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 4, pp. 525–533. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-525-533

Summary

Objective: Comparative analysis of dynamic loading of long-base flatcars on bogies of various types. **Methods:** Comparison of experimental data of running strength tests of long-base flatcars obtained by the Engineering Center of the rolling stock in the conditions of a test site on the Belorechensk–Maikop track of the North Caucasian Railway was carried out. The division of platform cars into conditional groups was used depending on the truck. **Results:** It was found that the use of constant contact side bearers in the bogie design reduces the dynamic loading of the flatcar on straight track sections by 1,2–1,5 times. The obtained dependences of the coefficients of vertical dynamics for the center and side sill showed that for all flat cars they are identical in nature and differ only in the level of values. The use of modern bogies with nonlinear spring suspension and constant contact side bearers in long-base flatcars leads to a decrease in the dynamic loading of the frame by an average of 15–25 %, thereby reducing the likelihood of possible damage to the flatcar in operation. **Practical importance:** It is shown that it is necessary to clarify the normative dependence of the speed distribution of the vertical dynamics coefficients for flatcars

on various types of bogies. Its correction will improve the accuracy of determining the parameters of the stress-strain state of the platform car frame. The comparison results can be recommended for practical use in assessing the strength and fatigue resistance of the flat car structure.

Keywords: Long-base flatcars, side bearer, fatigue tests, running strength tests, fatigue safety factor, running tests, vertical dynamics coefficient.

References

1. *State standart GOST 26686–96. Vagony-platformy magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya [Flatcars of 1520 mm gauge mainline railways. General technical conditions]*. Moscow, IPK Standards Publishing House, 1997, 45 p. (In Russian)
2. *State standart GOST 33211–2014. Vagony gruzovyye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam [Freight wagons. Requirements for strength and dynamic properties]*. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 45 p. (In Russian)
3. *Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Standards for the calculation and design of 1520 mm gauge railroad cars of the Ministry of Railways (unpowered cars)]*. Moscow, GosNIIV-VNIIZhT [State Research Institute of Carriage Building – All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport] Publ., 1996, 317 p. (In Russian)
4. *TR TS 001/2011. Tekhnicheskiy reglament TS “O bezopasnosti zheleznodorozhnogo pod-vizhnogo sostava” [CU TR 001/2011. Technical Regulations of the CU “On the Safety of Railway Rolling Stock”]*. Utv. Resheniyem Komissii Tamozhennogo soyuza ot 15 iulia 2011 g. no. 710. [Approved by the decision of the Customs Union Commission of Yuly 15, 2011 no. 710]. (In Russian)
5. *Vagony-platformy uvelichennoy dliny. Metodika ispytaniy na soprotivleniye ustalosti [Flatcars of increased length. Fatigue resistance test procedure]*. Moscow, OAO “RZHD” [JSC “Russian Railways”] Publ., 2006, 20 p. (In Russian)
6. Zagorskiy D.I. Sovershenstvovaniye metodiki ispytaniy na ustalost' ram dlinnobaznykh konteynernykh vagonov-platform [Improvement of the fatigue test method for frames of long-base container flatcars]. *Sovershenstvovaniye konstruksiy universal'nykh gruzovykh vagonov [Improvement of the designs of universal freight cars]*. Sb. nauch. trudov. Pod red. A. A. Bityutskogo [Collection of articles. Ed. by A. A. Bityutsky]. Saint Petersburg, OM-Press, 2010, iss. 8, pp. 65–74. (In Russian)
7. *State standart GOST 33788. Vagony gruzovyye i passazhirskiye. Metody ispytaniy na prochnost' i dinamicheskaya kachestva [Freight and passenger cars. Test methods for strength and dynamic properties]*. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 33 p.
8. *RD 24.050.37.95. Vagony gruzovyye i passazhirskiye. Metody ispytaniy na prochnost' i khodovyye kachestva [Freight and passenger cars. Test methods for strength and riding performance]*. Moscow, GosNIIV [State Research Institute of Carriage Building] Publ., 1995, 102 p. (In Russian)
9. Zagorskiy D.I. Sovershenstvovaniye raschetnogo metoda opredeleniya amplitudy dinamicheskikh napryazheniy pri otsenke ustalostnoy prochnosti ramy vagona-platformy [Improvement of the calculation method for determining amplitudes of dynamic stresses in assessing the fatigue strength of the flat car frame]. *Issledovaniye parametrov gruzovykh vagonov*. Sb. nauch. trudov. Pod red. A. A. Bityutskogo [Research of parameters of freight cars. Collection of research papers. Ed. by A. A. Bityutsky]. Saint Petersburg, OM-Press, 2011, iss. 10, pp. 110–122. (In Russian)
10. *State standart GOST 34387–2018. Skol'zuniye telezhok gruzovykh vagonov. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya [Side bearing of freight car bogies. General technical conditions]*. Moscow, Standartinform Publ., 2018, 13 p. (In Russian)

Received: June 30, 2020

Accepted: July 20, 2020

Author's information:

Denis I. ZAGORSKIY – Deputy Head of Comprehensive Testing Department; zdi@engcenter.ru
Maxim G. MYADELETS – Test Engineer; mmg@engcenter.ru

УДК 621.316.722.076.12

Исследование энергетических характеристик устройства компенсации реактивной мощности с регулируемой индуктивностью в электротяговой сети на экспериментальной установке

А. Н. Марикин, В. А. Мирощенко

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

Для цитирования: Марикин А. Н., Мирощенко В. А. Исследование энергетических характеристик устройства компенсации реактивной мощности с регулируемой индуктивностью в электротяговой сети на экспериментальной установке // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 534–544. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-534-544

Аннотация

Цель: Проверка теоретических положений возможности регулирования реактивной мощности компенсирующего устройства с переменной индуктивностью. Опробовать и оптимизировать алгоритм работы регулятора реактивной мощности. Оценить энергетическую эффективность устройства. Проверить устойчивость работы устройства в переходных режимах. Предложить методы по улучшению устойчивости системы. Провести гармонический анализ кривых тока и напряжения, полученных в результате физического моделирования, разработать способы подавления высших гармоник тока и напряжения. **Методы:** Построена схема экспериментальной установки, подобрана электротехническая элементная база, определены используемые измерительные приборы, собран экспериментальный стенд. На физической модели сняты кривые изменения тока, напряжения, активной и реактивной мощностей для режимов работы без компенсирующего устройства, с нерегулируемым и регулируемым компенсирующим устройством. Проанализировано изменение тока для критичных переходных процессов. Для оценки фильтрации высших гармоник тока и напряжения компенсирующим устройством были сняты осциллограммы в рабочем режиме с нагрузкой и добавлением в цепь электровоза диодного моста, произведен их гармонический анализ. **Результаты:** Регулируемое устройство обеспечивает компенсацию реактивной мощности в диапазоне нагрузок не менее 90%. Необходимы дополнительные меры для понижения активного сопротивления реактора компенсирующего устройства. Применение реактора, включенного последовательно с конденсатором, обеспечивает уменьшение коммутационного тока и перенапряжений в устройстве. Компенсирующее устройство может работать в режиме широкополосного фильтра высших гармоник. **Практическая значимость:** Создана физическая модель тяговой сети переменного тока с устройством компенсации реактивной мощности и управляемой переменной индуктивностью, позволяющая анализировать как мгновенные, так и длительные процессы в тяговой сети.

Ключевые слова: Компенсация реактивной мощности, управляемый реактор, электротяговая сеть, моделирование тяговой сети.

Введение

В предыдущей публикации [1] были обобщены основные схемотехнические решения

устройства компенсации реактивной мощности на основе регулируемой индуктивности, в качестве которой использовался реактор с подвижным сердечником, перемещение которого

с помощью электропривода приводит к плавному изменению индуктивности. Параллельно реактору подключается емкостная нагрузка. При регулировании индуктивности реактора происходит изменение реактивного сопротивления компенсирующего устройства и, как следствие, регулирование компенсируемой реактивной мощности устройством. Было произведено физическое моделирование такой системы.

Основными целями эксперимента являются: подтверждение точности расчетов на математической модели; подтверждение правильности выдвигаемой гипотезы компенсации реактивной мощности; разработка методики и алгоритма настройки регулятора. При этом ставились следующие задачи: проверка теоретических положений возможности регулирования реактивной мощности компенсирующего устройства с переменной индуктивностью; проверка и оптимизация алгоритма регулятора; оценка

энергетической эффективности регулируемого устройства по сравнению с нерегулируемым; проверка устойчивости устройства в переходных режимах; гармонический анализ кривых тока и напряжения, полученных в результате моделирования; разработка методов снижения высших гармоник тока и напряжения.

Схема и описание эксперимента

Расчет параметров модели был произведен ранее [2]. Масштабные коэффициенты по току и напряжению составляют 76,4 и 764 соответственно [3]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Установка подключается к внешней сети 380 В через трансформатор Т1 380/36 В. Установку защищает автоматический выключатель QF1, тип С10. Для измерений основных физи-

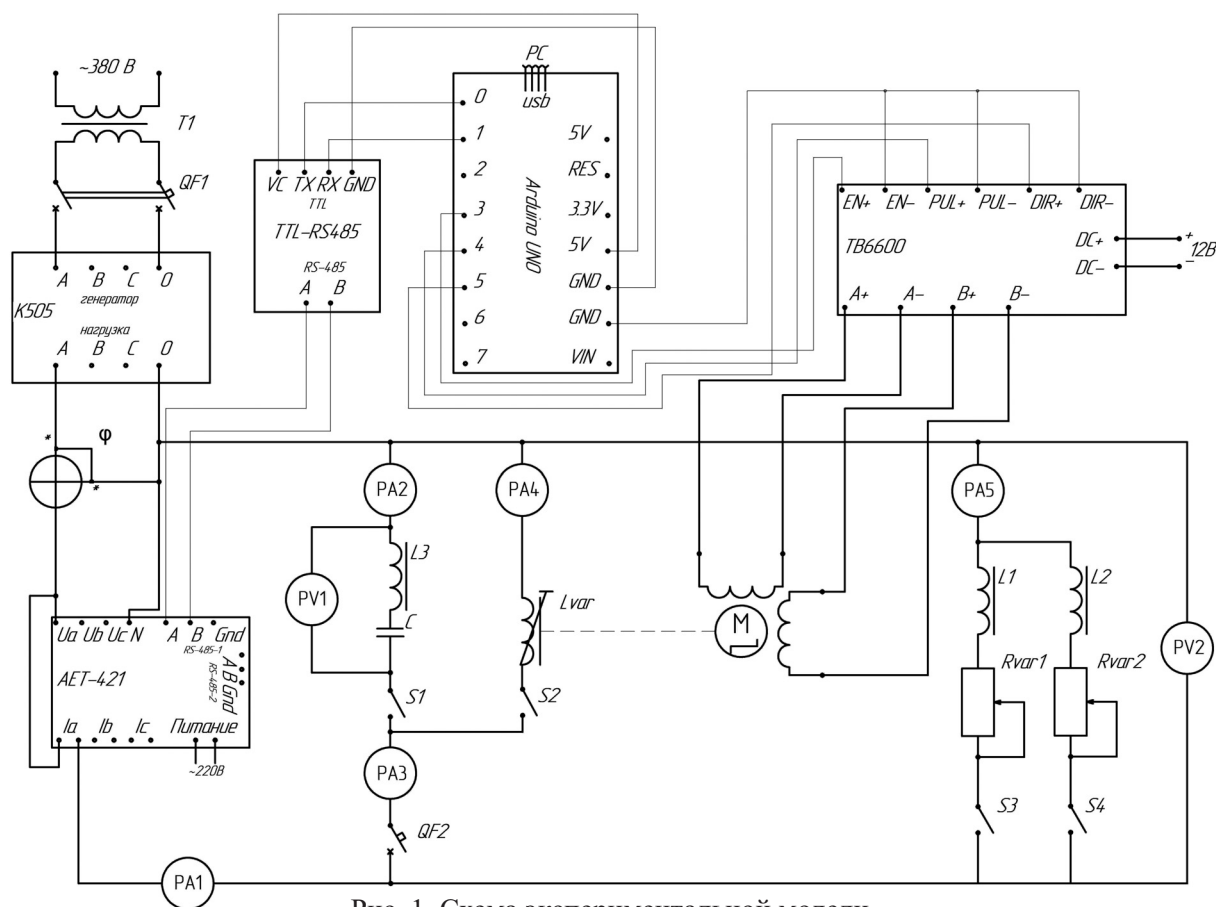


Рис. 1. Схема экспериментальной модели

ческих величин используются измерительный комплекс K505 и фазометр ф типа Д578. Обратная связь компенсатора осуществляется с помощью преобразователя АЕТ-421, который по интерфейсу RS-485 (протокол Modbus RTU) через преобразователь TTL/RS-485 передает значения активной и реактивной мощностей сети в микроконтроллерную плату Arduino Uno [4]. В плате обрабатываются данные с АЕТ-421, сравниваются с заданным углом между током и напряжением ($0,5-2^\circ$) и выдается сигнал управления на привод ТВ6600 в зависимости от разницы углов. Привод ТВ6600 управляет шаговым двигателем NEMA17, вращательное движение которого через винтовую передачу переходит в поступательное движение сердечника реактора L_{var} , меняя его индуктивность. Параллельно регулируемому реактору подключена конденсаторная батарея С (4 параллельно подключенных конденсатора емкостью 100 мкФ). Размыкатели S1 и S2 позволяют подключать отдельно L_{var} и

С. Для защиты устройства используется автоматический выключатель QS2, тип С10.

Нагрузкой служит модель имитации электровоза, состоящая из резисторов R1 и R2 с максимальным сопротивлением 12,5 Ом и реакторами L1 и L2 индуктивностью 36 и 22 мГн соответственно. Для возможности отключения электровозов применяются разъединители S3 и S4.

Фотография экспериментальной установки представлена на рис. 2.

Для снятия статических показаний в схеме используются аналоговые приборы амперметры PA1, PA2, PA3, PA4, PA5, тип Э527, диапазон измерений 5 А/10 А, и вольтметры PV1, PV2, тип Э59, диапазон измерений 75 В; для снятия динамических показаний и осциллограмм – преобразователи измерительные Е9527/15 для токовых измерений и Е8527/13 для измерения напряжений. Эти преобразователи передают по токовой петле значения в регистратор аварийных событий «Нева» БРКУ 32/24.

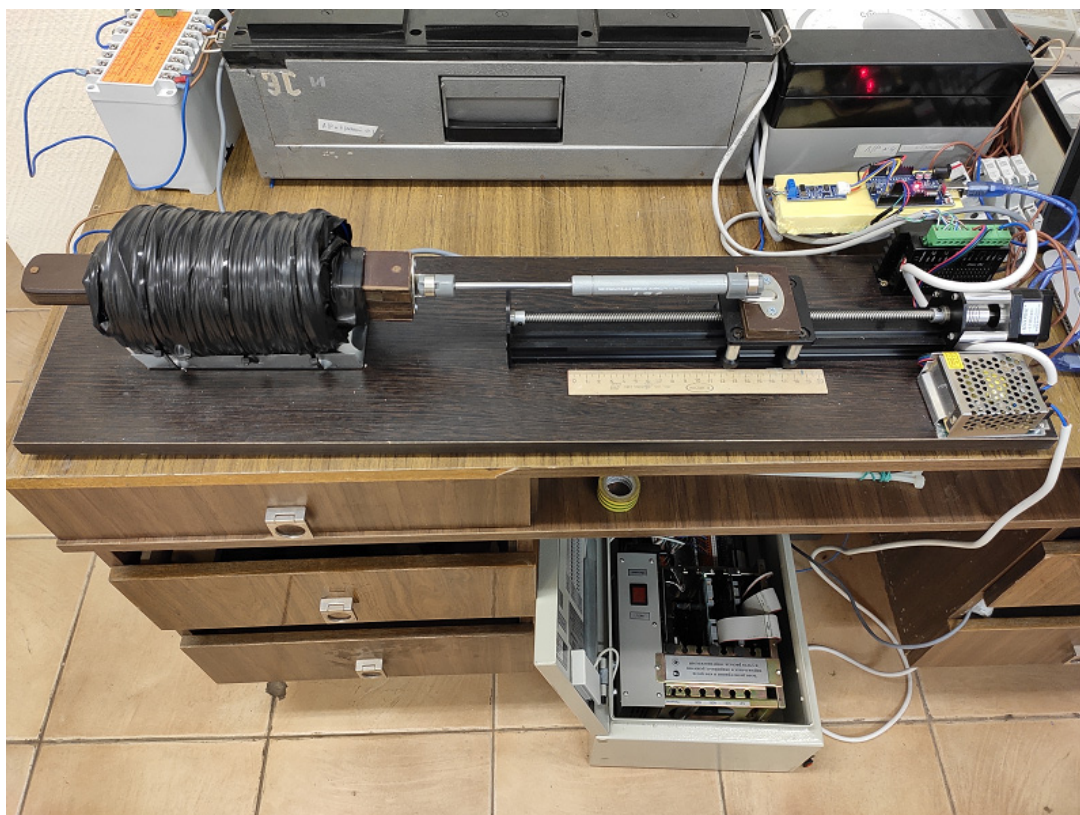


Рис. 2. Фотография экспериментальной установки

Энергетическая эффективность устройства

Для определения энергетической эффективности регулируемого компенсирующего устройства необходимо сравнить значения тока, активной, реактивной и полной мощностей подстанции при одинаковой нагрузки в электроотяговой сети для режимов работы без компенсирующего устройства, с нерегулируемым и регулируемым компенсирующим устройством. Сопротивление нагрузки изменялось во времени со снятиями данных с приборов. Были сняты показания амперметров PA1, PA5, вольтметра PV2, фазометра ф для режимов трех режимов работы. Значения сопротивлений нагрузки задавались с помощью изменения положения регулируемых резисторов Rvar1 и Rvar2 отключением ветвей нагрузки с помощью размыкателей S3 и S4.

Для оценки эффективности компенсации реактивной мощности приведены кривые изменения реактивной мощности для трех режимов работы (рис. 3, а).

Осциллограммы показывают, что при плавном регулировании (рис. 3, а, кривая 3) компенсирующее устройство способно поддерживать величину реактивной мощности в питающей сети в течение суток на минимальном уровне. Было рассчитано среднеквадратичное значение реактивной мощности для каждого из режимов: без КУ – 54,3 ВАр, с нерегулируемым КУ – 46,4 ВАр, с регулируемым КУ – 4,5 ВАр. Произведен подсчет суммарной реактивной энергии для полученных кривых: в режиме без компенсирующего устройства – 20,6 ВАр·ч, в режиме с нерегулируемым КУ – 16,5 ВАр·ч, в режиме с регулируемым КУ – 1,3 ВАр·ч.

Зависимости на рис. 3, а доказывают целесообразность применения плавного регулирования в устройствах компенсации реактивной мощности.

Для оценки энергетической эффективности использования регулируемого КУ приведены кривые изменения активной мощности для трех режимов работы (рис. 3, б). Осциллограммы показывают, что в режиме с регулируемым КУ

(кривая 3) потребление активной мощности выше, чем в остальных режимах. Произведен подсчет суммарной активной энергии для полученных кривых: в режиме без КУ – 29,3 Вт·ч, в режиме с нерегулируемым КУ – 29,6 Вт·ч, в режиме с регулируемым КУ – 42,9 Вт·ч.

В данном эксперименте следует учитывать, что реактор для регулируемого компенсирующего устройства был сделан обычной стержневой конструкции, без дополнительных магнитопроводов, увеличивающих индуктивность катушки при том же количестве витков [5]. Ранее были рассмотрены реакторы специальной конструкции с уменьшенным активным сопротивлением катушки [6].

Этот эксперимент показывает, что необходимы дополнительные меры по снижению потребления активной мощности реактором, и разработанные конструкции являются одной из таких мер.

Снятие мгновенных зависимостей тока и напряжения в коммутационных режимах

При использовании дополнительных реактивных элементов в схеме электроснабжения большой интерес вызывают кривые тока и напряжения при коммутации [7]. Некоторые установки компенсации реактивной мощности в настоящий момент не включены на подстанциях из-за бросков тока и напряжения при переходных процессах. Для определения устойчивости системы с регулируемым компенсирующим устройством были сняты мгновенные характеристики тока и напряжения при таких режимах работы как включение и отключение номинальной нагрузки, отрыв токоприемника, при отключении и включении компенсирующего устройства без нагрузки и с ней и др. Самый тяжелый режим – включение в сеть устройства без нагрузки на линии. На схеме (см. рис. 1) размыкатели S1 и S2 замкнуты, S3 и S4 разомкнуты, автоматический выключатель QF1 включен. В момент снятия характеристик включается ав-

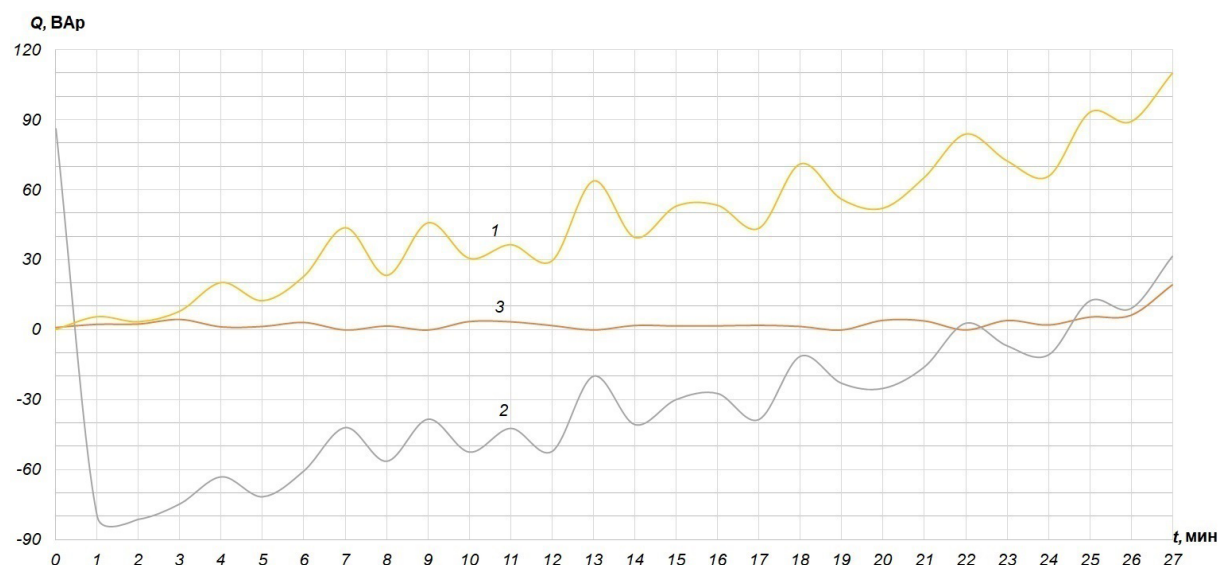
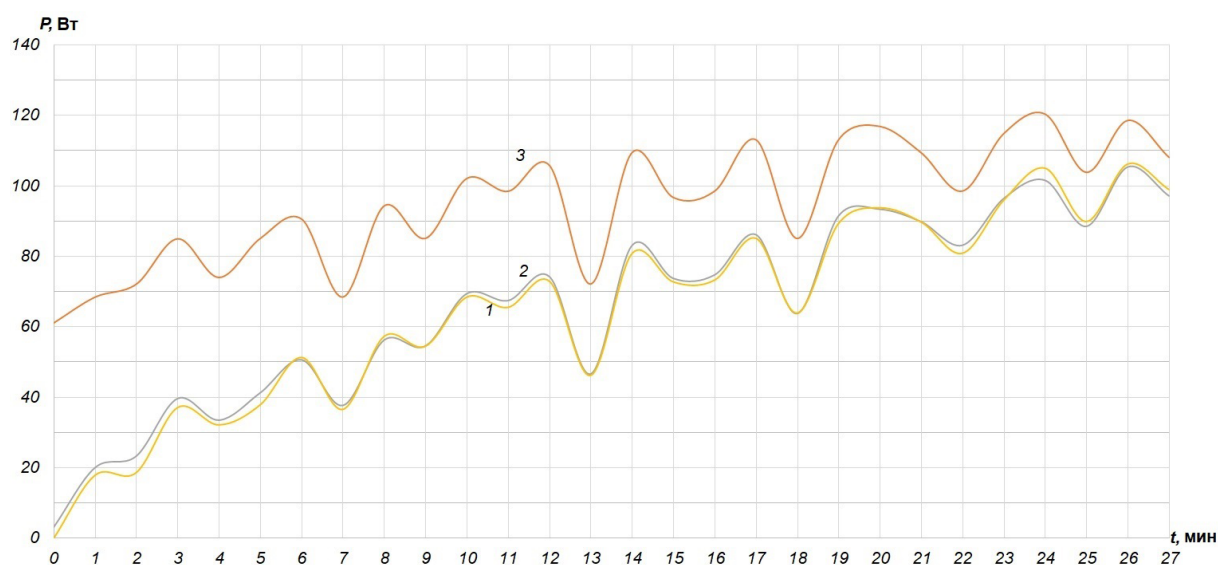
a*б*

Рис. 3. Кривые изменения реактивной (*a*) и активной (*б*) мощности для трех режимов работы:
1 – режим без КУ; 2 – режим с нерегулируемым КУ; 3 – режим с регулируемым КУ

томатический выключатель QF2. График данного режима представлен на рис. 4, *a*.

При моделировании момент включения устройства практически совпал с пиком напряжения питающей сети. Нагрузка в сети отсутствует, поэтому ток подстанции совпадает с током в КУ. Пусковой ток устройства I превышает номинальное значение в 6 раз. Его умень-

шение до номинального тока КУ составляет 1 период.

Ранее была предложена схема включения в цепь компенсирующего устройства последовательно с конденсатором реактора такой индуктивности, которая создает резонанс напряжений для частоты третьей гармоники [8]. Это предлагалось как для фильтрации третьей гармоники

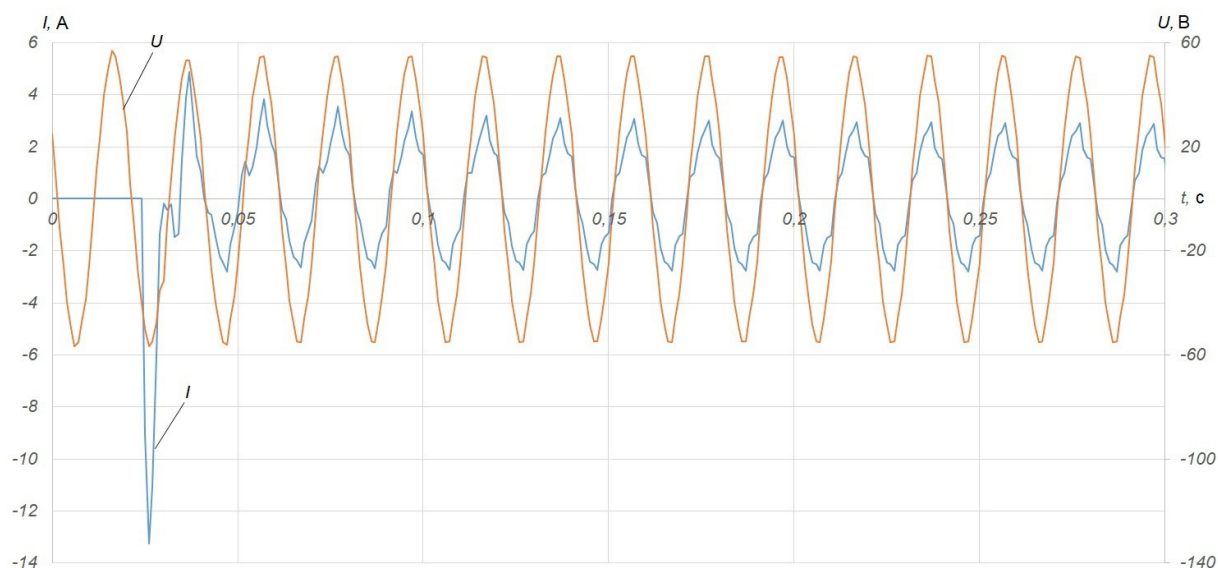
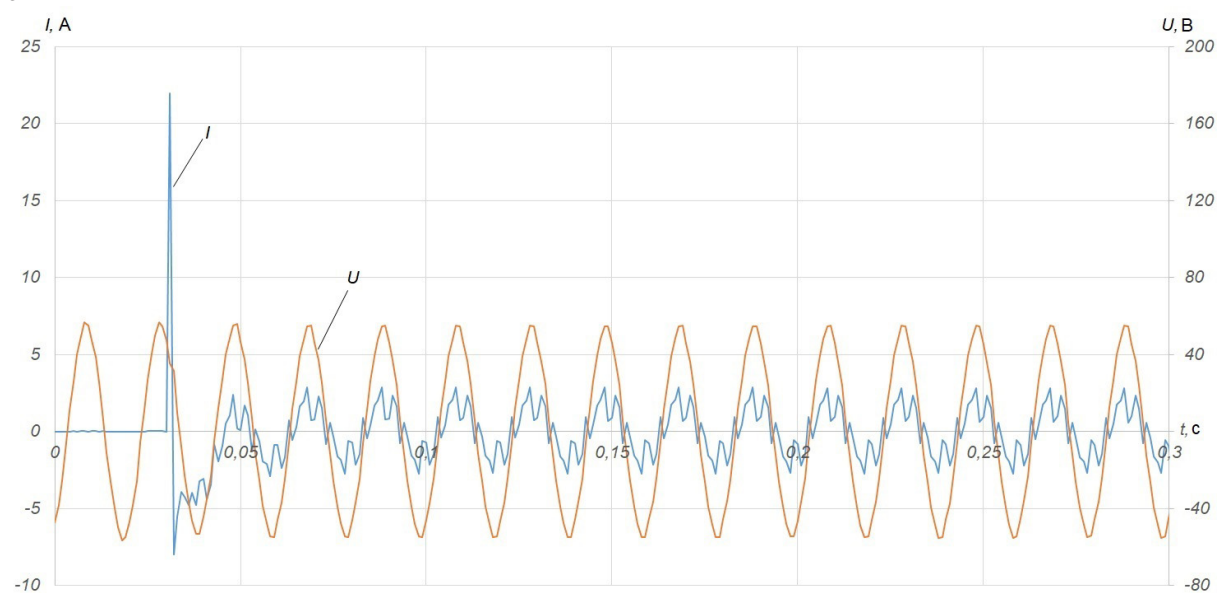
а*б*

Рис. 4. Включение устройства в сеть (*а*) и с дополнительным реактором (*б*) без нагрузки на линии: *I* – ток подстанции, *U* – напряжение подстанции

тока, так и для снижения коммутационного тока. На рис. 4, *б* приведены графики при дополнительном включении неуправляемого реактора индуктивностью $L = 2,7$ мГн последовательно с конденсатором.

Использование дополнительного реактора позволяет снизить пусковой ток в 1,7 раза, что положительно сказывается на оборудовании.

Для определения времени становления регулятора система подключалась к нагрузке, близкой к номинальной для рассматриваемого компенсирующего устройства. Оценивалось время, за которое регулируемый параметр $\text{tg}\varphi$ будет ниже задания 0,1. График становления регулятора представлен на рис. 5. Из него следует, что время становления регулятора в рассмотренной

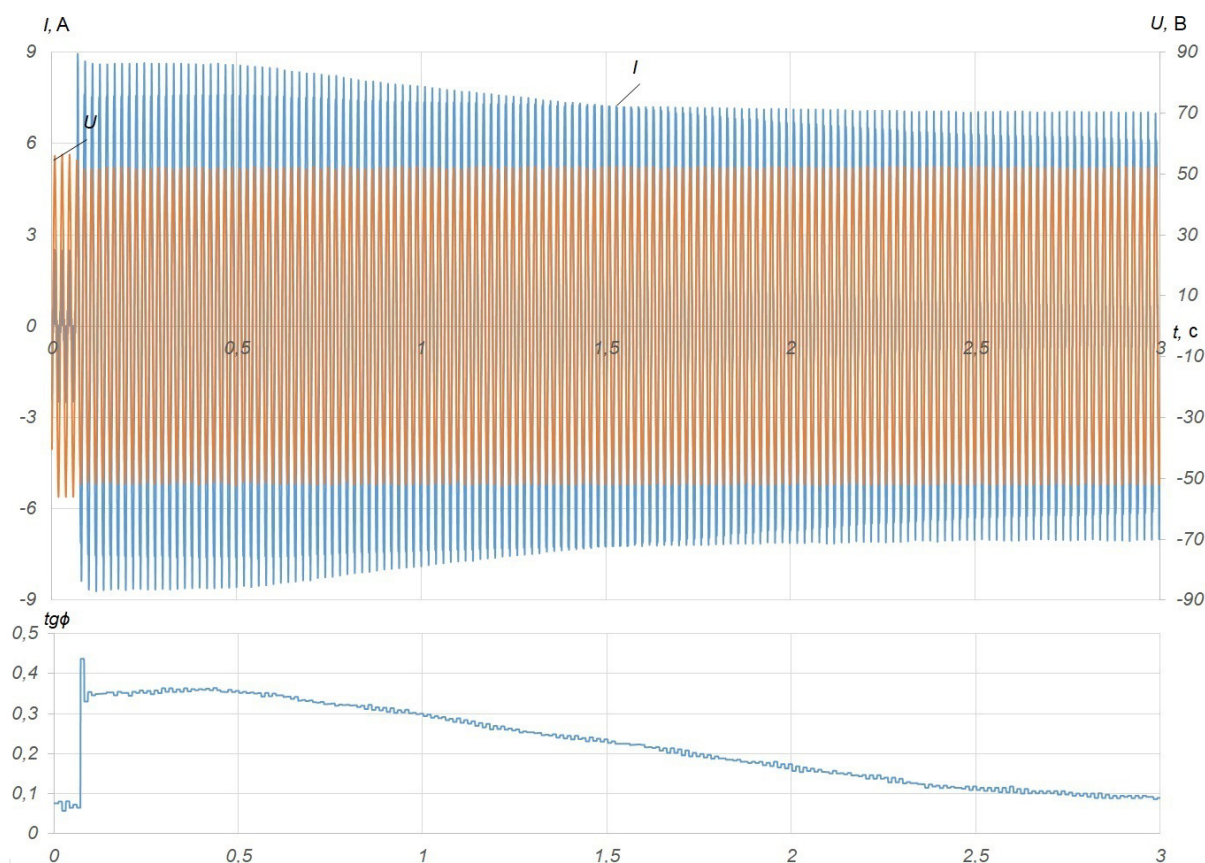


Рис. 5. График становления регулятора

физической модели не превышает 3 с. Время становления регулятора в реальной системе зависит от скорости работы электропривода и параметров ПИД-регулятора. В модели скорость регулятора ограничена параметрами электропривода.

Гармонический анализ полученных данных

Компенсирующее устройство может применяться в качестве фильтрующего [9]. Для оценки фильтрации высших гармоник тока и напряжения компенсирующим устройством были сняты осциллограммы с добавлением в цепь нагрузки диодного моста, и произведен их гармонический анализ с помощью программы «Осциллограф» информационной системы «Нева» [10]. Полученные данные иллюстрирует рис. 6.

На рис. 6 первый столбец – значение тока поезда $I_{\text{п}}$, второй – тока подстанции $I_{\text{п/ст}}$. Диаграмма показывает, что компенсирующее устройство уменьшает ток высших гармоник. Добавление реактора в цепь, последовательно с конденсатором, не только понижает ток при коммутации, но и уменьшает значение тока третьей гармоники во внешней сети более чем в 2 раза.

Заключение

По результатам физического моделирования устройства компенсации реактивной мощности с переменной индуктивностью можно сделать следующие выводы:

1) регулируемое устройство обеспечивает компенсацию реактивной мощности в диапазоне нагрузок не менее 90 %;

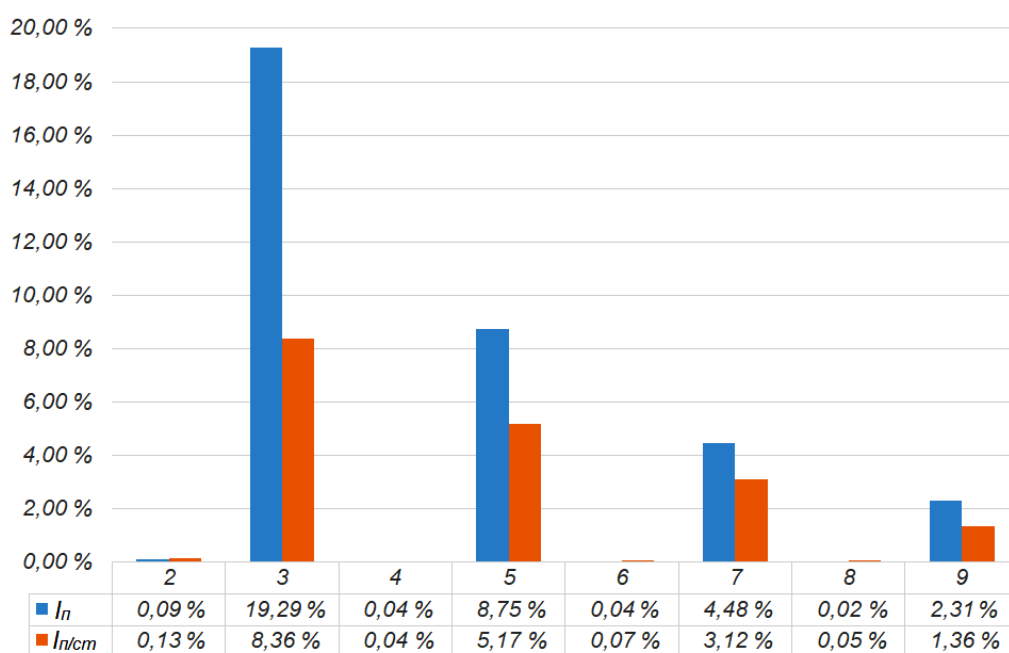


Рис. 6. Гармонический анализ тока поезда I_n и тока подстанции $I_{n/ct}$

2) необходимы дополнительные меры для снижения активного сопротивления реактора компенсирующего устройства, например увеличение сечения проводов обмотки реактора, уменьшение числа витков;

3) применение реактора, включенного последовательно с конденсатором, обеспечивает понижение величины коммутационного тока и перенапряжений в устройстве;

4) компенсирующее устройство может работать в режиме широкополосного фильтра высших гармоник.

Библиографический список

1. Кузьмин С. В. Устройство поперечной компенсации реактивной мощности с изменяющейся индуктивностью / С. В. Кузьмин, А. Н. Марикин, В. А. Мирощенко // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Вып. 3 (44). – С. 77–84.

2. Марикин А. Н. Обоснование схмотехнических решений экспериментальной установки устройства компенсации реактивной мощности с переменной индуктивностью / А. Н. Марикин, В. А. Мирощенко //

Прорывные технологии электрического транспорта : материалы Десятого Междунар. симпозиума «Элтранс–2017», 18–20 октября 2017 г., Санкт-Петербург. – СПб. : ПГУПС, 2017. – С. 278–284.

3. Веников В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) : учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, доп. и перераб. / В. А. Веников. – М. : Высшая школа, 1976. – 479 с.

4. Петин В. А. Проекты с использованием контроллера Arduino / В. А. Петин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2014. – 400 с. – (Сер. Электроника).

5. Александров Г. Н. Управляемые реакторы. Изд. 3-е / Г. Н. Александров, В. П. Лунин. – СПб. : Центр подготовки кадров энергетики, 2005. – 200 с.

6. Марикин А. Н. Управляемый реактор переменного тока в составе устройства компенсации реактивной мощности / А. Н. Марикин, В. А. Мирощенко // Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта : материалы VIII Междунар. симпозиума «Элтранс–2015», 7–9 октября 2015 г., Санкт-Петербург. – СПб. : ПГУПС, 2017. – 477 с.

7. Довгун В. П. Регулируемые фильтрокомпенсирующие устройства для систем тягового электро-

снабжения / В. П. Довгун Д. Э. Егоров, И. Г. Важенина, А. Ф. Синяговский // Омск. науч. вестн. – 2018. – № 5 (161). – С. 45–50.

8. Марикин А. Н. Анализ электромагнитных процессов в устройстве компенсации реактивной мощности с переменной индуктивностью / А. Н. Марикин, В. А. Мирошенко // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 14. – Вып. 2. – С. 298–306.

9. Минина А. А. Методика выбора параметров средств компенсации реактивной мощности в тяговых сетях переменного тока / А. А. Минина, В. И. Пантелеев, Е. В. Платонова // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. – 2013. – Вып. 1 (47). – С. 59–63.

10. Система регистрации и контроля нормальных и аварийных режимов и учета расхода энергоносителей «Нева»: руководство по эксплуатации. – М. : ЗАО «Научно-производственная фирма “Энергосоюз”», 2004. – 18 с.

Дата поступления: 04.06.2020

Решение о публикации: 14.07.2020

Контактная информация:

МАРИКИН Александр Николаевич – д-р техн. наук, профессор; marikin_s@mail.ru
МИРОЩЕНКО Василий Анатольевич – аспирант; vasilymir@yahoo.com

Investigation of the energy characteristics of a reactive power compensating device with adjustable inductance in an electric traction network on an experimental setup

A. N. Marikin, V. A. Miroshchenko

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

For citation: Marikin A. N., Miroshchenko V. A. Investigation of the energy characteristics of a reactive power compensating device with adjustable inductance in an electric traction network on an experimental setup. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 4, pp. 534–544. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-534-544

Summary

Objective: Checking the theoretical provisions of the possibility of controlling the reactive power of an adjustable inductance compensating device. Testing and optimizing the algorithm of the reactive power regulating device. Assessing energy efficiency of the device. Checking stability of the device in transient modes. Suggesting methods to improve stability of the system. Conducting a harmonic analysis of current and voltage curves obtained as a result of physical modeling, developing ways to suppress higher current and voltage harmonic. **Methods:** The scheme of the experimental setup was built, the electrical element base was selected, the measuring instruments used were determined, the experimental stand was assembled. Curves of changes in current, voltage, active and reactive power were taken on the physical model for operating modes without a compensating device, with an unregulated and adjustable compensating device. The change in current for critical transients is analyzed. To evaluate the filtering of higher harmonics of current and voltage by a compensating device, oscillograms were taken in operating mode with a load and after adding a diode bridge to the electric locomotive circuit, and their harmonic analysis was performed. **Results:** The adjustable device provides reactive power compensation in the load range of no less than 90 %. Additional measures are required to lower the active resistance of

the compensating device reactor. The use of a reactor connected in series with a capacitor reduces the switching current and overvoltage in the device. The compensating device can operate in the mode of a broadband filter of higher harmonics. **Practical importance:** A physical model of an alternating current traction network with a reactive power compensating device and a controlled variable inductance has been created, which makes it possible to analyze both instantaneous and long-term processes in the traction network.

Keywords: Compensation of reactive power, controlled reactor, electric traction network, simulation of traction network.

References

1. Kuzmin S. V., Marikin A. N. & Miroshchenko V. A. Ustroystvo poperechnoy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti s izmenyayushcheysoy induktivnost'yu [A device for transverse reactive power compensation with adjustable inductance]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2015, iss. 3 (44), pp. 77–84. (In Russian)
2. Marikin A. N. & Miroshchenko V. A. Obosnovaniye skhemotekhnicheskikh resheniy eksperimental'noy ustanovki ustroystva kompensatsii reaktivnoy moshchnosti s peremennoy induktivnost'yu [Substantiation of circuit solutions for the experimental setup of a reactive power compensating device with adjustable inductance]. *Proryvnyye tekhnologii elektricheskogo transporta*. Materialy Desyatogo Mezhdunar. simpoziuma «Eltrans–2017», 18–20 oktyabrya 2017 g., Sankt-Peterburg [Breakthrough technologies of electric transport. Proceedings of the Tenth Intern. Symposium “Eltrans–2017”, October 18–20, 2017, Saint Petersburg]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, pp. 278–284. (In Russian)
3. Venikov V. A. *Teoriya podobiya i modelirovaniya (primenitel'no k zadacham elektroenergetiki)*. Ucheb. posobiye dlya vuzov. Izd. 2-ye, dop. i pererab. [The theory of similarity and modeling (in relation to the problems of the electric power industry). Textbook. manual for universities. Ed. 2nd, add. and revised]. Moscow, Vysshaya shkola [Higher School] Publ., 1976, 479 p. (In Russian)
4. Petin V. A. *Proyekty s ispol'zovaniyem kontrollera Arduino* [Projects using the Arduino controller]. Saint Petersburg, BKHV-Peterburg Publ., 2014, 400 p. (Series Electronics). (In Russian)
5. Aleksandrov G. N. & Lunin V. P. *Upravlyayemye reaktory*. Izd. 3-ye [Controlled reactors. 3rd ed.]. Saint Petersburg, Tsentr podgotovki kadrov energetiki [Energy Training Center] Publ., 2005, 200 p. (In Russian)
6. Marikin A. N. & Miroshchenko V. A. Upravlyayemyy reaktor peremennogo toka v sostave ustroystva kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Controlled AC reactor as part of a reactive power compensation device]. *Elektrifikatsiya, razvitiye elektroenergeticheskoy infrastruktury i elektricheskogo podvizhnogo sostava skorostnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta*. Materialy VIII Mezhdunar. simpoziuma “Eltrans–2015”, 7–9 oktyabrya 2015 g., Sankt-Peterburg [Electrification, development of electric power infrastructure and electric rolling stock of high-speed and high-speed rail transport. Proceedings of the 8th Intern. Symposium “Eltrans–2015”, 7–9 October 2015, Saint Petersburg]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, 477 p. (In Russian)
7. Dovgun V. P., Egorov D. E., Vazhenina I. G. & Sinyagovsky A. F. Reguliruyemye fil'trokompensiruyushchiye ustroystva dlya sistem tyagovogo elektrosnabzheniya [Adjustable filter compensating devices for traction power supply systems]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2018, no. 5 (161), pp. 45–50. (In Russian)
8. Marikin A. N. & Miroshchenko V. A. Analiz elektromagnitnykh protsessov v ustroystve kompensatsii reaktivnoy moshchnosti s peremennoy induktivnost'yu [Analysis of electromagnetic processes in a reactive power compensation device with adjustable inductance]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2017, vol. 14, iss. 2, pp. 298–306. (In Russian)

9. Minina A.A., Panteleyev V.I. & Platonova Ye. V. Metodika vybora parametrov sredstv kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v tyagovykh setyakh peremennogo toka [Methodology for selecting parameters of reactive power compensation means in AC traction networks]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev], 2013, iss. 1 (47), pp. 59–63. (In Russian)

10. Sistema registratsii i kontrolya normal'nykh i avariynykh rezhimov i ucheta raskhoda energonositeley "Neva". Rukovodstvo po ekspluatatsii [System for re-

gistration and control of normal and emergency modes and metering of energy consumption "Neva". Operation manual]. Moscow, ZAO "Nauchno-proizvodstvennaya firma "Energosoyuz" [JSC Scientific and Production Firm "Energosoyuz"] Publ., 2004, 18 p. (In Russian)

Received: June 04, 2020

Accepted: July 14, 2020

Authors' information:

Alexander N. MARIKIN – D. Sci. in Engineering, Professor; marikin_s@mail.ru

Vasily A. MIROSCHENKO – Postgraduate Student; vasilymir@yahoo.com

УДК 625.033.34

Построение дескриптивной модели логистической цепи доставки грузов при взаимодействии железнодорожного и морского транспорта

Г. И. Никифорова

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

Для цитирования: *Никифорова Г. И.* Построение дескриптивной модели логистической цепи доставки грузов при взаимодействии железнодорожного и морского транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 545–551. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-545-551

Аннотация

Цель: Рассмотреть вопрос о поэтапном моделировании логистической цепи доставки грузов с использованием железнодорожного и морского транспорта. Установить цель и результаты каждого этапа моделирования. Перейти к построению дескриптивной модели исследуемого процесса. **Методы:** Применяются анализ логистической цепи доставки груза в смешанной перевозке, моделирование логистической цепи доставки груза с построением на начальном этапе дескриптивной модели. **Результаты:** Представлена развернутая схема этапов моделирования с установленными целями и результатами каждого этапа. Построен фрагмент дескриптивной модели на этапе отправления грузопотока с железнодорожной станции. **Практическая значимость:** Показана важность последовательного моделирования логистического процесса с соблюдением принципов адекватности и экономичности модели. Оценена значимость маршрутизации грузопотоков в адрес морских портов.

Ключевые слова: Логистическая цепь, терминал, железнодорожная станция, морской порт, эксплуатационные показатели, этапы моделирования, дескриптивная модель, маршрутизация, отправительский маршрут, оператор подвижного состава.

Любая модель – это отображение свойств объекта при его изучении [1]. Моделирование представляет собой отображение объекта с некоторым упрощением, но с сохранением важных для решения поставленной задачи свойств. Примем, что оптимизация суммарных затрат всех элементов логистической цепи с использованием железнодорожного транспорта при взаимодействии с морским является задачей моделирования. Такая модель будет прагматической, так как моделирование будет задавать определенные границы [1]. Математическая модель должна отражать важнейшие особенности исследуемого процесса, учитывать все существенные факторы. Однако важно, чтобы модель была пригод-

на для математического анализа, отсутствовала чрезмерная сложность, причем результаты моделирования должны решать поставленную задачу. Таким образом, модель должна быть адекватной, т. е. соответствовать исследуемому объекту в значимых свойствах, и экономичной, т. е. не быть излишне сложной и громоздкой. В связи с этим возникает вопрос об этапах моделирования при соблюдении перечисленных выше условий и области и границах применения модели. Построение математической модели изучаемого процесса можно провести в 6 этапов (рис. 1) [2].

Для достижения поставленной цели важен каждый этап построения модели. Например, де-

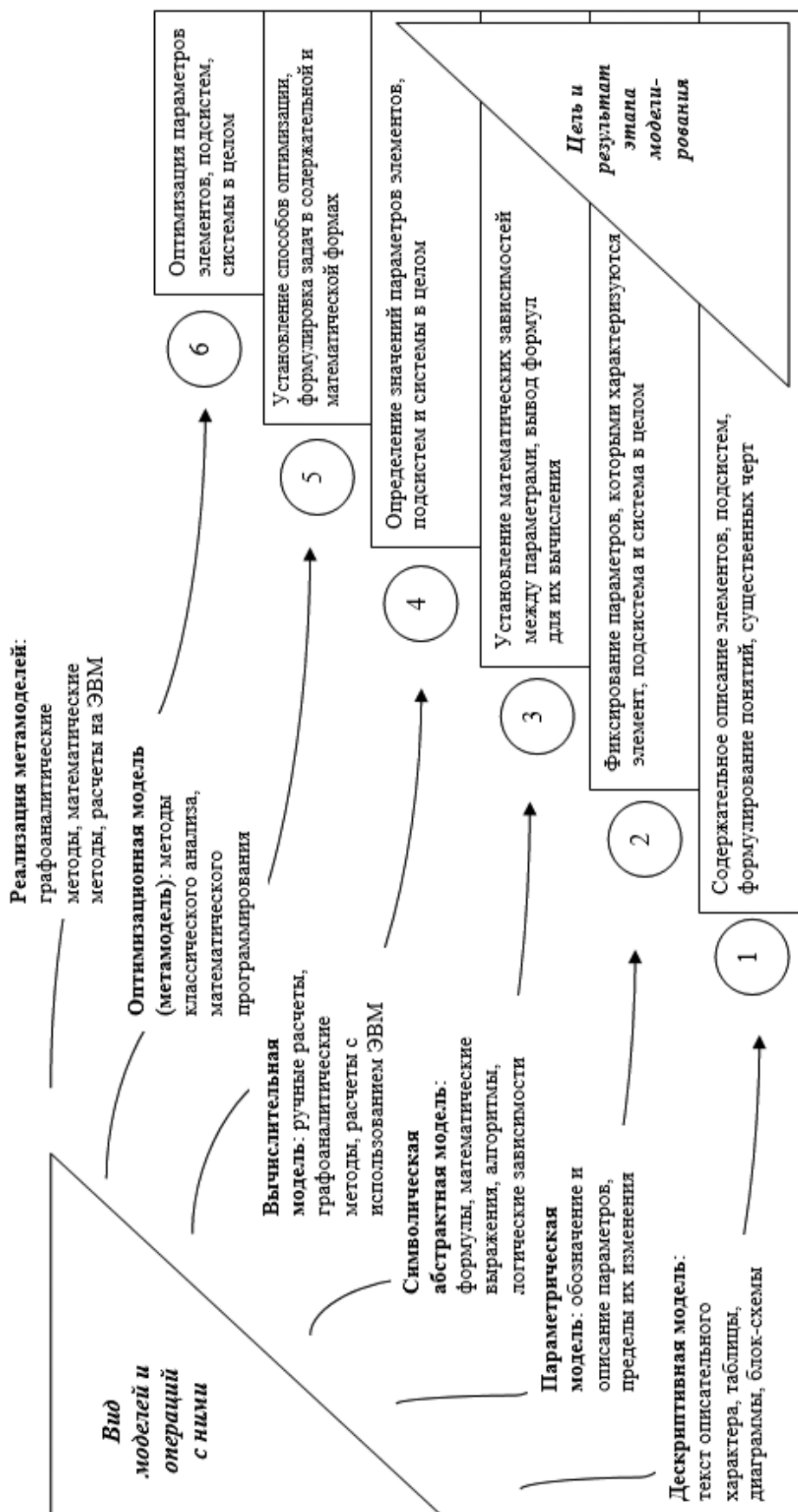


Рис. 1. Этапы математического моделирования

скриптивная модель позволяет в общем виде охарактеризовать систему, обозначить границы и область применения модели. Оптимизация затрат элементов логистической цепи, состоящей из продвижения вагонов от терминала станции отправления железнодорожным транспортом с возможной переработкой в пути следования до терминала морского порта и обслуживания вагонопотока в системе припортовая станция/морской порт, может на первом этапе моделирования описываться общей схемой (рис. 2).

Логистическая цепь доставки груза охватывает полный цикл физического перемещения груза и информационного сопровождения от грузоотправителя до грузополучателя. Однако для дальнейшего математического анализа целесообразно ограничить модель логистической цепи погрузкой вагонов на терминале станции отправления (этапы 1, 2), продвижением грузопотока железнодорожным транспортом с возможной переработкой в пути следования (этапы 3, 4), процессом передачи грузопотока с железнодорожного на морской транспорт (этапы 5, 6) и выгрузкой на терминал морского порта (этап 7) [3]. При этом в модели должны учитываться субъекты логистического процесса: ОАО «РЖД», оператор железнодорожного подвижного

состава, администрации порта и портовых терминалов [4]. Таким образом, удастся прийти к адекватности и экономичности модели для достижения основной цели – оптимизации затрат логистической цепи на описанных выше этапах.

Рассмотрим подробнее этапы 1 и 2, приведенные на рис. 2, для построения фрагмента дескриптивной модели (рис. 3). Продвижение грузопотока в выстраиваемой модели будет начинаться с погрузки груза в вагоны на терминале станции отправления – она может осуществляться на путях необщего и общего пользования. Далее необходимо изучить комплексную задачу маршрутизации перевозок с мест погрузки [5]. Маршрутизация перевозок позволяет снизить объемы переработки вагонов на технических станциях (этапы 3, 4), уменьшить показатель оборота вагонов и минимизировать суммарные затраты всех элементов логистической цепи. Маршрутизацию перевозок с мест погрузки в рамках данного исследования следует рассматривать только в адрес портов. От того, каков процент маршрутизации, будет зависеть работа всей логистической цепи и эксплуатационной составляющей. Традиционные задачи роста пропускной способности [6], по-

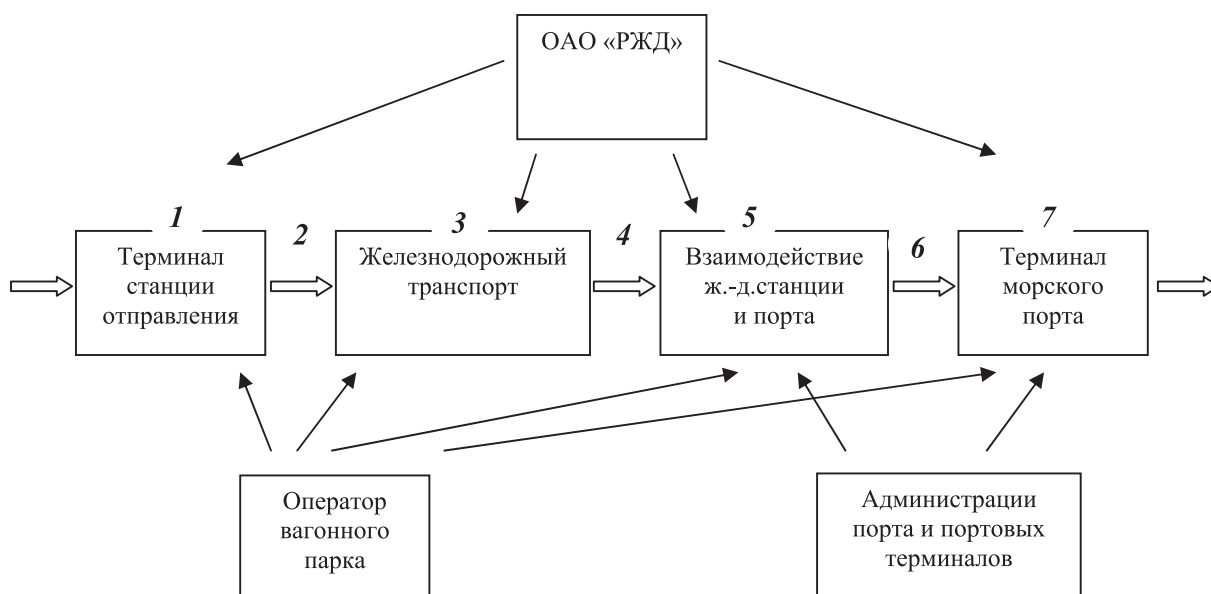


Рис. 2. Общая схема фрагмента логистической цепи продвижения грузопотока:
1, 2, ..., 7 – этапы продвижения грузопотока в логистической цепи

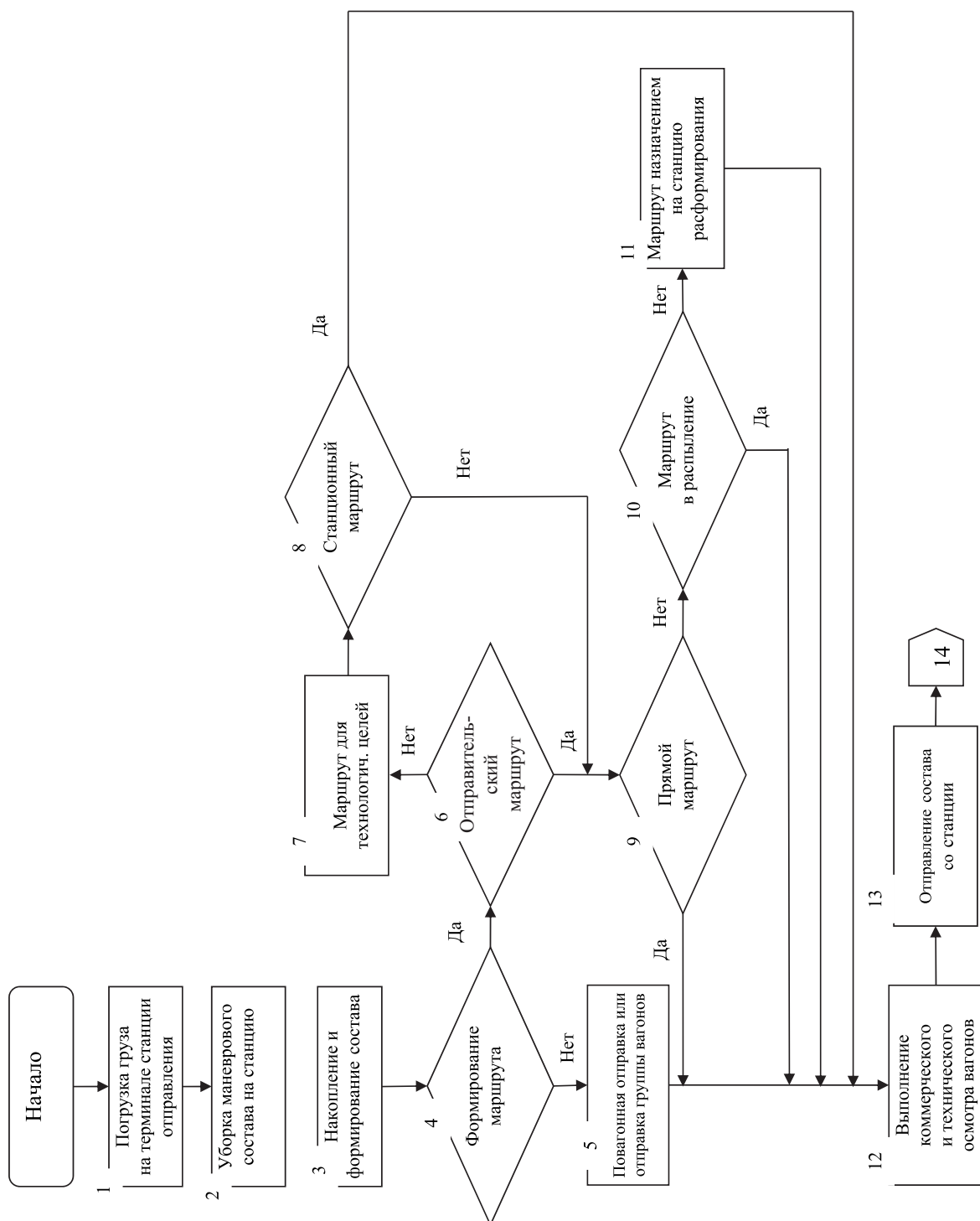


Рис. 3. Фрагмент дескриптивной модели

вышения эффективности оперативного управления [7] также соответствуют логистическим принципам организации перевозок, однако отправление грузов в маршрутах [8, 9] дает возможность увеличивать эффективность работы железнодорожного транспорта в целом, повысить конкурентоспособность и клиентоориентированность. Для дальнейшего развития и построения дескриптивной модели следует подробнее изучить классификацию маршрутов, статистические данные об объемах маршрутизации, показатели Плана маршрутных перевозок, оценить экономическую эффективность маршрутов.

Классификация маршрутов, согласно [10], представляет собой деление на отправительские маршруты и организованные перевозчиком (ОАО «РЖД») для технологических целей. Эти маршруты, в свою очередь, подразделяются по полигонам обращения на межгосударственные, междорожные и внутридорожные. В рамках проводимого исследования подразделение по полигонам обращения не носит принципиальный характер (рис. 3).

Отправительские маршруты могут быть сформированы на путях общего и необщего пользования и по назначению вагонов в маршрутах могут быть прямыми, в распыление, назначением на станцию расформирования.

Маршруты, организованные перевозчиком для технологических целей, по условиям организации и назначениям включаемых вагонов подразделяются на станционные, прямые, ступенчатые.

В результате было установлено, что необходимо изучить показатели маршрутизации грузовых железнодорожных перевозок в адрес морских портов с целью выявления значимых направлений исследования и дальнейшего построения дескриптивной модели.

Библиографический список

1. Жилин Д. М. Теория систем : Опыт построения курса / Д. М. Жилин. – М. : ЛЕНАНД, 2020. – 176 с.
2. Никифорова Г. И. Взаимодействие железнодорожного и морского транспорта при передаче контейнеропотока на основе принципов логистики : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.08 / Г. И. Никифорова. – СПб. : ПГУПС, 2005. – 195 с.
3. Никифорова Г. И. Взаимодействие железнодорожного и морского транспорта в логистической цепи доставки внешнеторгового грузопотока / Г. И. Никифорова // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2019. – Т. 16. – Вып. 3. – С. 339–346.
4. Сергеева Т. Г. Совершенствование управления парком частных вагонов / Т. Г. Сергеева // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2019. – Т. 16. – Вып. 3. – С. 449–454.
5. Ковалев В. И. Управление эксплуатационной работой на железнодорожном транспорте : учебник. В 2-х т. / В. И. Ковалев, А. Т. Осьминин, В. А. Кудрявцев и др.; под ред. В. И. Ковалева, А. Т. Осьминина. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2011. – Т. 2. – 440 с.
6. Абдуллаев Ж. Я. Методика увеличения пропускной способности линии при росте объема перевозок / Ж. Я. Абдуллаев, Г. М. Грошев, А. А. Грачев, Ан. В. Сугоровский, А. С. Аль-Шумари // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2019. – № 5 (84). – С. 26–29.
7. Грошев Г. М. Основные положения методики количественной оценки факторов эффективности автоматизации процессов оперативного управления перевозками на полигонах железных дорог / Г. М. Грошев, И. Ю. Романова, Я. В. Кукушкина, Т. Г. Сергеева, Ан. В. Сугоровский // Б. П. Бещев. Выдающийся выпускник, великий железнодорожник. К 115-летию со дня рождения. – СПб. : ПГУПС, 2019. – С. 121–132.
8. Грунтов П. С. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте : учебник для вузов / П. С. Грунтов, Ю. В. Дьяков, А. М. Макарович и др.; под ред. П. С. Грунтова. – М. : Транспорт, 1994. – 543 с.
9. Котенко А. Г. Определение порогового значения вагонопотока, оптимального в условиях неравномерности / А. Г. Котенко, А. П. Бадецкий, А. С. Бессолицын // Вестн. транспорта Поволжья. – 2013. – № 4 (40). – С. 20–27.
10. Инструкция по планированию, организации и учету перевозок грузов маршрутами. – Распоряже-

ние ОАО «РЖД» от 21 октября 2015 г. № 2509р «Об утверждении Инструкции по планированию, организации и учету перевозок грузов маршрутами». – URL : <http://docs.cntd.ru/document/420314685> (дата обращения : 01.09.2020 г.).

Дата поступления: 22.09.2020

Решение о публикации: 05.10.2020

Контактная информация:

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

Construction of a descriptive model of the logistics chain for the delivery of goods in the interaction of rail and sea transport

G. I. Nikiforova

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

For citation: Nikiforova G. I. Construction of a descriptive model of the logistics chain for the delivery of goods in the interaction of rail and sea transport. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 4, pp. 545–551. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-545-551

Summary

Objective: To consider the issue of phased modeling of the logistics chain for the delivery of goods using rail and sea transport. To establish the goal and results of each stage of the simulation. To move to the construction of a descriptive model of the process under study. **Methods:** The analysis of the logistics chain of cargo delivery in multimodal transport, modeling of the logistics chain of cargo delivery with the construction of a descriptive model at the initial stage is applied. **Results:** A detailed diagram of the modeling stages is presented with the set goals and results of each stage. A fragment of the descriptive model was built at the stage of dispatching cargo traffic from a railway station. **Practical importance:** The importance of consistent modeling of the logistic process is shown in compliance with the principles of the adequacy and efficiency of the model. The importance of routing cargo flows to seaports is estimated.

Keywords: Logistic chain, terminal, railway station, seaport, performance indicators, modeling stages, descriptive model, routing, dispatch route, rolling stock operator.

References

1. Zhilin D. M. *Teoriya sistem: Opyt postroyeniya kursa* [Systems theory: On building a course]. Moscow, LENAND Publ., 2020, 176 p. (In Russian)

2. Nikiforova G. I. *Vzaimodeystviye zheleznodorozhnogo i morskogo transporta pri peredache konteyneropotoka na osnove printsipov logistiki*. Dis. na soiskaniye uchenoy stepeni kand. tekhn. nauk, spetsial'nost': 05.22.08 [Interaction of railway and sea transport in the transfer of container traffic based on the principles of

logistics. PhD thesis, specialty: 05.22.08]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2005, 195 p. (In Russian)

3. Nikiforova G. I. *Vzaimodeystviye zheleznodorozhnogo i morskogo transporta v logisticheskoy tsepi dostavki vneshnetorgovogo gruzopotoka* [Interaction of railway and sea transport in the logistics chain of delivery of foreign trade cargo traffic]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport Univer-

sity] Publ., 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 339–346. (In Russian)

4. Sergeeva T. G. Sovershenstvovaniye upravleniya parkom privatnykh vagonov [Improving the management of private cars fleet]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 449–454. (In Russian)

5. Kovalev V. I., Os'minin A. T., Kudryavtsev V. A. et al. *Upravleniye ekspluatatsionnoy rabotoy na zheleznodorozhnom transporte*. Uchebnik. V 2 t. Pod red. V. I. Kovaleva, A. T. Os'minina [Management of field operation work in railway transport. Textbook. In 2 vol. Ed. by V. I. Kovalev, A. T. Os'minin]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodological Center for Education in Railway Transport] Publ., 2011, vol. 2, 440 p. (In Russian)

6. Abdullaev Zh. Ya., Groshev G. M., Grachev A. A., Sugorovsky An. V. & Al-Shumari A. S. Metodika uvelicheniya propusknoy sposobnosti linii pri roste ob'yema perezovok [Methods of increasing the carrying capacity of the line with the growth of traffic]. *Transport Rossiyskoy Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike [Transport of the Russian Federation. Journal of Science, Practice, Economics]*, 2019, no. 5 (84), pp. 26–29. (In Russian)

7. Groshev G. M., Romanova I. Yu., Kukushkina Ya. V., Sergeyeva T. G. & Sugorovskiy An. V. Osnovnyye polozheniya metodiki kolichestvennoy otsenki faktorov effektivnosti avtomatizatsii protsessov operativnogo upravleniya perezovkami na poligonakh zheleznykh dorog [The main provisions of the methodology for the quantitative assessment of the factors of the effectiveness of automation of the processes of operational management of transportation at the railway operating domains]. *B. P. Beshchev. Vydayushchiysya vypusnik, velikiy zheleznodoro-*

zhnik. K 115-letiyu so dnya rozhdeniya [B. P. Beshchev. An outstanding graduate, a great railroad worker. To the 115th anniversary of birth]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, pp. 121–132. (In Russian)

8. Gruntov P. S., D'yakov Yu. V., Makarochkin A. M. et al. *Upravleniye ekspluatatsionnoy rabotoy i kachestvom perezovok na zheleznodorozhnom transporte*. Uchebnik dlya vuzov. Pod. red. P. S. Gruntova [Field operation management and the quality of railway transportation. Textbook for universities. Ed. by P. S. Gruntov]. Moscow, Transport Publ., 1994, 543 p. (In Russian)

9. Kotenko A. G., Badetskiy A. P. & Bessolitsyn A. S. Opredeleniye porogovogo znacheniya vagonopotoka, optimal'nogo v usloviyakh neravnomernosti [Determination of the threshold value of the car traffic, optimal in conditions of irregularity]. *Vestnik transporta Povolzh'ya [Volga Transport Bulletin]*, 2013, no. 4 (40), pp. 20–27. (In Russian)

10. *Instruktsiya po planirovaniyu, organizatsii i uchetu perezovok gruzov marshrutami. Rasporyazheniye OAO "RZHD" ot 21 oktyabrya 2015 g. no. 2509r "Ob utverzhdenii Instruktsii po planirovaniyu, organizatsii i uchetu perezovok gruzov marshrutami [Instructions for planning, organizing and accounting for the transportation of goods by routes. Order of JSC "Russian Railways" dated October 21, 2015 N 2509r "On approval of the Instructions for planning, organizing and accounting of cargo transportation by routes"]*. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/420314685> (accessed: September 01, 2020). (In Russian)

Received: September 22, 2020

Accepted: October 05, 2020

Author's information:

NIKIFOROVA Guzel Islyamovna – PhD in Engineering, Associate Professor, guzel.spb@mail.ru

УДК 625.1:656.2

Обеспечение комплексной безопасности на железнодорожном транспорте в контексте стратегического развития

П. А. Плеханов

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

Для цитирования: Плеханов П. А. Обеспечение комплексной безопасности на железнодорожном транспорте в контексте стратегического развития // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 552–565.
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-552-565

Аннотация

Цель: Определение понятия и компонентов комплексной безопасности на железнодорожном транспорте, описание подходов к обеспечению комплексной безопасности. **Методы:** Применены общие методы эмпирического (наблюдение и сравнение) и теоретического (анализ и синтез) исследований. **Результаты:** На основе анализа отечественной нормативной базы в области безопасности предложено определение понятия комплексной безопасности на железнодорожном транспорте как отсутствия недопустимого риска возникновения опасных событий, связанных с нанесением ущерба жизни и здоровью людей, вреда окружающей природной среде и материальным ценностям. Выявлены основные виды безопасности, составляющие комплексную безопасность на железнодорожном транспорте, к которым относятся безопасность движения, транспортная безопасность, пожарная безопасность, санитарно-эпидемиологическая безопасность, информационная безопасность, кибербезопасность, безопасность труда, экологическая безопасность, промышленная безопасность, безопасность в чрезвычайных ситуациях. На основе международного опыта показана необходимость формирования интегрированной системы менеджмента комплексной безопасности на железнодорожном транспорте. Описана концепция ситуационного центра управления комплексной безопасностью перевозочного процесса на железнодорожном транспорте. **Практическая значимость:** Предложенные характеристика понятия комплексной безопасности на железнодорожном транспорте и механизмы ее обеспечения могут быть использованы для организации практической деятельности по достижению стратегических целей повышения уровня безопасности на отечественных железных дорогах.

Ключевые слова: Комплексная безопасность на железнодорожном транспорте, нормативная база, система менеджмента безопасности, ситуационный центр.

Стратегия научно-технологического развития России [1] определяет следующие приоритеты и перспективы научно-технологического развития страны в области транспорта:

– переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источ-

ников, способов транспортировки и хранения энергии;

– связанность территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использова-

нии космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики.

В свою очередь, в Транспортной стратегии России [2] обозначены следующие цели развития транспортной системы страны на период до 2030 года:

1) формирование единого транспортного пространства России на базе сбалансированного опережающего развития эффективной транспортной инфраструктуры;

2) обеспечение доступности и качества транспортно-логистических услуг в области грузовых перевозок на уровне потребностей развития экономики страны;

3) обеспечение доступности и качества транспортных услуг для населения в соответствии с социальными стандартами;

4) интеграция в мировое транспортное пространство и реализация транзитного потенциала страны;

5) повышение уровня безопасности транспортной системы;

6) снижение негативного воздействия транспортной системы на окружающую среду.

В отношении целей в области обеспечения безопасности и экологичности транспорта стратегией поставлены задачи по их достижению (табл. 1).

Таким образом, повышение уровня безопасности является одним из стратегических приоритетов развития отечественного транспорта. В то же время для реализации этого приоритета необходимо иметь ясное представление о том, какие компоненты определяют комплексную безопасность на транспорте.

На основании имеющегося опыта в отношении железнодорожного (как, впрочем, и любого другого вида) транспорта понятием *комплексной безопасности* предлагается объединить следующие основные виды безопасности:

- безопасность движения;
- транспортная безопасность;
- пожарная безопасность;
- санитарно-эпидемиологическая безопасность;
- информационная безопасность;

- кибербезопасность;
- безопасность труда;
- экологическая безопасность;
- промышленная безопасность;
- безопасность в чрезвычайных ситуациях.

Каждый из указанных видов безопасности регулируется своими нормативными правовыми и нормативными техническими документами (рис. 1, табл. 2) [3].

Обобщая приведенные в соответствующих федеральных законах определения, можно обозначить понятие комплексной безопасности как *отсутствие недопустимого риска возникновения опасных событий, связанных с нанесением ущерба жизни и здоровью людей, вреда окружающей природной среде и материальным ценностям*. Иными словами, для конечного потребителя железнодорожной перевозочной услуги (пассажира и грузовладельца), как и для работника железнодорожного транспорта и общества в целом, важна именно комплексная безопасность.

Мировая и отечественная практика обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте [14, 15] рассматривает риск возникновения нарушения через комбинацию вероятности возникновения нарушения и ущерба от него. В работе [16] описан риск-ориентированный подход к обеспечению транспортной безопасности, который в целом применим и к другим видам безопасности. При этом в отношении комплексной безопасности все относящиеся к конкретным видам безопасности причины нарушений можно условно отнести к четырем факторам – техническому, человеческому, организационному и природному. Например, в транспортной безопасности рассматриваются действия нарушителей, т.е. причины, вызванные человеческим фактором. Обладая значением уровня допустимого риска, обусловленного угрозами возникновения нарушений, можно определить необходимые мероприятия по обеспечению комплексной безопасности. Проблема состоит в том, что в нормативной базе комплексной безопасности на железнодорожном транспорте отсутствует критерий допустимости риска.

ТАБЛИЦА 1. Цели Транспортной стратегии России в области обеспечения безопасности и экологичности транспорта и задачи по их достижению

Цели	Задачи по достижению целей
Повышение уровня безопасности транспортной системы	Повышение безопасности движения, полетов и судоходства. Повышение уровня технической и технологической безопасности объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств. Обеспечение состояния защищенности объектов транспортной инфраструктуры от актов незаконного вмешательства. Обеспечение деятельности специализированных аварийно-спасательных служб на уровне, соответствующем международным и национальным требованиям. Обеспечение мобилизационной готовности транспортного комплекса. Повышение уровня безопасности перевозок грузов, требующих особых условий. Усиление государственного регулирования допуска к транспортной деятельности в соответствии с требованиями безопасности. Развитие систем надзора, контроля и обеспечения общественной безопасности в сфере транспорта. Обеспечение потребности в специалистах с уровнем профессиональной подготовки, отвечающим требованиям безопасности и устойчивости транспортной системы
Снижение негативного воздействия транспортной системы на окружающую среду	Модернизация транспортных средств и объектов транспортной инфраструктуры, направленная на снижение их негативного воздействия на окружающую среду. Повышение доли использования экологически чистых видов топлива, гибридных и электрических двигателей транспортных средств, материалов и технологий. Повышение энергоэффективности транспорта до уровня показателей передовых стран. Обеспечение экологически безопасного обращения с отходами транспортного комплекса, предупреждение и сокращение их образования. Внедрение систем экологического менеджмента и управления качеством в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности на транспорте. Привлечение граждан и организаций к участию в общественной экспертизе и решении вопросов, связанных с охраной окружающей среды и обеспечением экологической безопасности транспортного комплекса

В контексте стратегического развития железнодорожного транспорта к главным вопросам относится формирование *системы менеджмента комплексной безопасности*.

Современные системы менеджмента позволяют наиболее эффективно выполнить требования нормативных правовых и нормативных технических документов и обеспечить необхо-

димый уровень качества и безопасности перевозочных услуг [17].

В настоящее время в отечественных и зарубежных организациях железнодорожного транспорта и на предприятиях железнодорожной промышленности происходит активное внедрение различных систем менеджмента качества и безопасности, соответствующих стан-

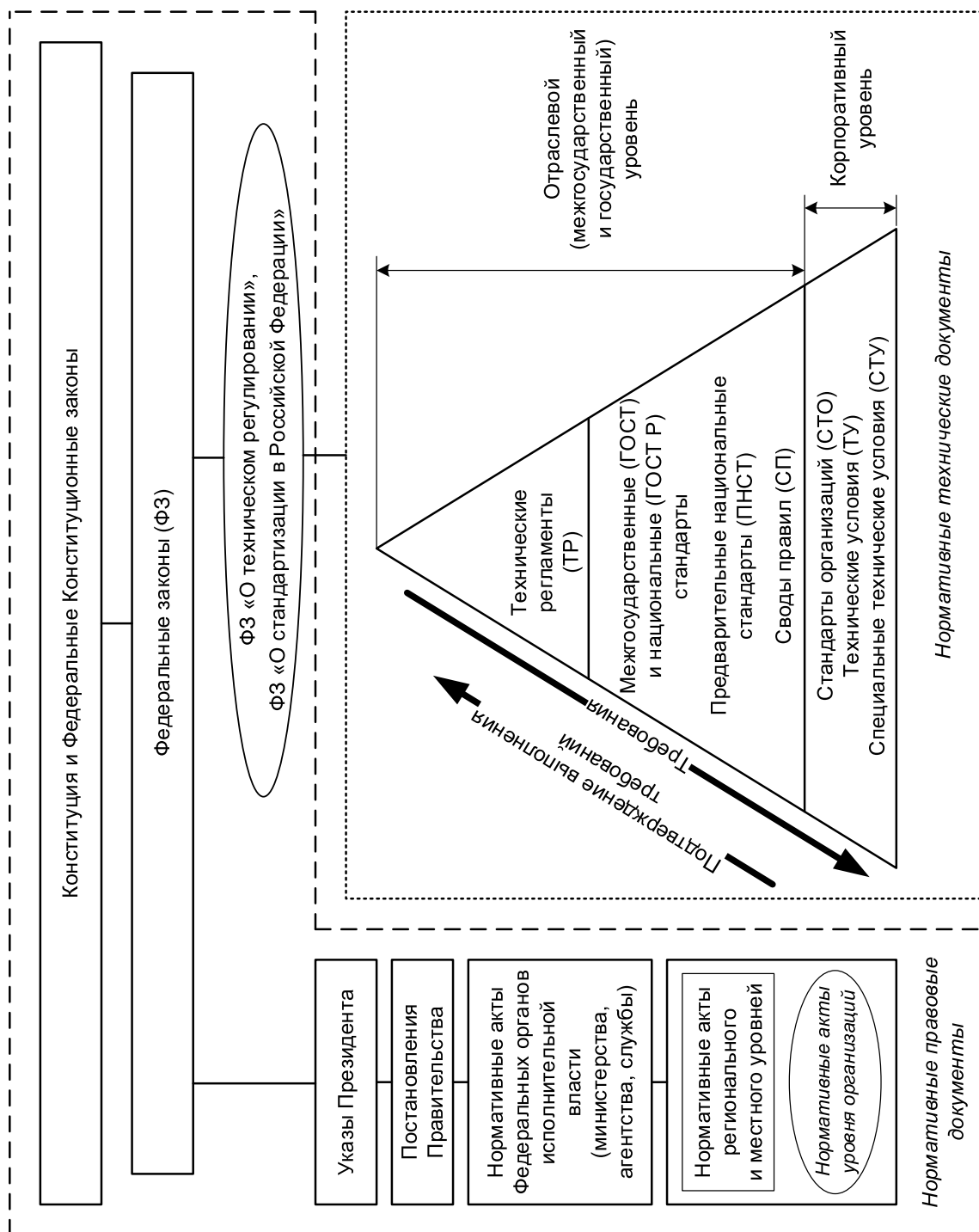


Рис. 1. Структура отечественной нормативной базы комплексной безопасности

ТАБЛИЦА 2. Описание основных видов безопасности, входящих в комплексную безопасность на железнодорожном транспорте

Вид безопасности	Нормативное понятие вида безопасности и его определение	Основной федеральный закон, регламентирующий вид безопасности
Безопасность движения	<i>Безопасность движения и эксплуатации железнодорожного транспорта</i> – состояние защищенности процесса движения железнодорожного подвижного состава и самого железнодорожного подвижного состава, при котором отсутствует недопустимый риск возникновения транспортных происшествий и их последствий, влекущих за собой причинение вреда жизни или здоровью граждан, вреда окружающей среде, имуществу физических или юридических лиц [4]	«О железнодорожном транспорте в Российской Федерации» [4]
Транспортная безопасность	<i>Транспортная безопасность</i> – состояние защищенности объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств от актов незаконного вмешательства [5]	«О транспортной безопасности» [5]
Пожарная безопасность	<i>Пожарная безопасность</i> – состояние защищенности личности, имущества, общества и государства от пожаров [6]	«О пожарной безопасности» [6]
Санитарно-эпидемиологическая безопасность	<i>Санитарно-эпидемиологическое благополучие населения</i> – состояние здоровья населения, среды обитания человека, при котором отсутствует вредное воздействие факторов среды обитания на человека и обеспечиваются благоприятные условия его жизнедеятельности [7]	«О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» [7]
Информационная безопасность	<i>Защита информации</i> представляет собой принятие правовых, организационных и технических мер, направленных на: 1) обеспечение защиты информации от неправомерного доступа, уничтожения, модифицирования, блокирования, копирования, предоставления, распространения, а также от иных неправомерных действий в отношении такой информации; 2) соблюдение конфиденциальности информации ограниченного доступа; 3) реализацию права на доступ к информации [8]	«Об информации, информационных технологиях и о защите информации» [8]
Кибербезопасность	<i>Безопасность критической информационной инфраструктуры</i> – состояние защищенности критической информационной инфраструктуры, обеспечивающее ее устойчивое функционирование при проведении в отношении ее компьютерных атак [9]	«О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [9]

Окончание табл. 2

Вид безопасности	Нормативное понятие вида безопасности и его определение	Основной федеральный закон, регламентирующий вид безопасности
Безопасность труда	<i>Безопасные условия труда</i> – условия труда, при которых воздействие на работающих вредных и (или) опасных производственных факторов исключено либо уровни их воздействия не превышают установленных нормативов [10]	Трудовой кодекс Российской Федерации [10], раздел X «Охрана труда»
Экологическая безопасность	<i>Экологическая безопасность</i> – состояние защищенности природной среды и жизненно важных интересов человека от возможного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, их последствий [11]	«Об охране окружающей среды» [11]
Промышленная безопасность	<i>Промышленная безопасность опасных производственных объектов</i> – состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах и последствий указанных аварий [12]	«О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [12]
Безопасность в чрезвычайных ситуациях	<i>Предупреждение чрезвычайных ситуаций</i> – это комплекс мероприятий, проводимых заблаговременно и направленных на максимально возможное уменьшение риска возникновения чрезвычайных ситуаций, а также на сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба окружающей среде и материальных потерь в случае их возникновения [13]	«О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [13]

дартам Международной организации по стандартизации (ISO, International Organization for Standardization). Среди таких стандартов можно выделить следующие:

- стандарты ISO 9001 [18] на менеджмент качества и ISO 31000 [19] на менеджмент риска, а также отраслевой стандарт ISO 22163 [20] на менеджмент бизнеса для железнодорожных организаций, разработанный на основе Международного стандарта железнодорожной промышленности IRIS (International Railway Industry Standard) – данные стандарты охватывают все указанные выше виды безопасности, состав-

ляющие комплексную безопасность на железнодорожном транспорте;

- стандарт ISO 22301 [21] на менеджмент непрерывности бизнеса, который также может быть применим ко всем рассмотренным видам безопасности;

- стандарт ISO 28001 [22] на менеджмент безопасности цепи поставок – распространяется на транспортную безопасность;

- стандарт ISO 27001 [23] на менеджмент информационной безопасности – используется в отношении информационной и кибербезопасности;

– стандарт ISO 45001 [24] на менеджмент профессионального здоровья и безопасности – применим относительно безопасности труда и промышленной безопасности;

– стандарт ISO 14001 [25] на экологический менеджмент – используется для экологической безопасности.

Лучшие практики систем менеджмента железнодорожных организаций основаны на концепции жизненного цикла железнодорожной техники с применением методологии управления комплексом взаимоувязанных показателей RAMS/LCC: надежность (Reliability), готовность (Availability), ремонтпригодность (Maintainability), безопасность (Safety) и стоимость (Life Cycle Cost) на всех этапах жизненного цик-

ла [26]. Также широко используется процессный подход, на котором основана пятиуровневая модель оценки технологической зрелости системы управления организацией (табл. 3) [27].

Практически любая система менеджмента реализуется с использованием управленческого цикла PDCA: планирование (Plan) – выполнение (Do) – контроль (Check) – корректировка (Act). При этом каждый из этапов цикла связан с одним или несколькими компонентами системы менеджмента, которые, в свою очередь, документально регламентируются соответствующими процедурами.

Очевидно, что общие процедуры (регламенты) различных систем менеджмента одной организации нецелесообразно тиражировать в каж-

ТАБЛИЦА 3. Характеристика уровней технологической зрелости системы управления организацией

Номер уровня	Условная характеристика системы управления, соответствующей уровню	Краткое описание системы управления, соответствующей уровню
1	Система примитивного управления	Управление деятельностью организации носит реактивный характер, результаты принятых управленческих решений и деятельности в целом плохо предсказуемы (условно можно считать, что каждый рабочий день является «подвигом» без гарантий его повторения в следующий раз) – при этом процессное описание деятельности организации может быть приведено в самом общем виде
2	Система функционального управления	Процессами представлена производственная деятельность организации – для управленческой деятельности процессное описание отсутствует, в связи с чем управление носит в основном реактивный характер и уязвимо перед внутренними и внешними изменениями
3	Система процессного управления	Вся деятельность организации имеет процессное представление – управление регламентировано внутренними стандартами и является главным образом проактивным
4	Система измеримого управления	Применяется система ключевых показателей эффективности деятельности KPI (Key Performance Indicators), на основе которых осуществляется измеримое управление всеми процессами деятельности организации
5	Система оптимизированного управления	Оптимизация управления всеми процессами деятельности организации происходит на основе их измеримости при помощи KPI

дой из этих систем. В качестве примера можно привести такие обязательные процедуры как управление документацией и записями, корректирующие и предупреждающие действия, внутренние аудиты и управление несоответствиями. В этой связи перспективными направлениями развития являются интеграция систем менеджмента [28–30] и формирование *интегрированной системы менеджмента комплексной безопасности*.

На тактическом и оперативном уровнях управления комплексной безопасностью перевозочного процесса на железнодорожном транспорте ключевой составляющей представляется создание и функционирование *ситуационного центра*, объединяющего оперативный и аналитический блоки, работа которых должна быть основана на взаимодействии с соответствующими внешними субъектами (рис. 2).

К основным задачам оперативного блока центра относятся мониторинг состояния систем и технических средств объектов инфраструктуры и подвижного состава, подготовка первичной информации для анализа и оценки рисков нарушений безопасности и надежности перевозочного процесса (БиНПП), в том числе:

- сбор и систематизация информации о БиНПП, получаемой от системы мониторинга объектов инфраструктуры и подвижного состава, информации о метеорологической обстановке на участках движения поездов, о террористических угрозах и несанкционированном доступе по отношению к объектам железнодорожного транспорта, о чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера, затрагивающих границы железных дорог, а также о других событиях, влияющих на БиНПП;

- оперативный учет нарушений БиНПП с передачей всей необходимой информации в соответствующие корпоративные и ведомственные базы данных;

- контроль движения поездов в сложных метеорологических условиях;

- анализ готовности аварийно-восстановительных формирований (восстановительные и пожарные поезда) к ликвидации последствий

нарушений БиНПП, контроль ликвидации последствий нарушений БиНПП и координация работы соответствующих подразделений;

- оперативное взаимодействие с единым диспетчерским центром управления перевозками и с соответствующими эксплуатационными подразделениями железных дорог по вопросам обеспечения БиНПП;

- оповещение руководства железных дорог и информирование органов государственной власти о возникновении нарушений БиНПП, организация взаимодействия с центром оповещения при главе государства и национальным центром управления в кризисных ситуациях, а также, при необходимости, с другими органами государственной власти и организациями.

Основными задачами аналитического блока центра являются анализ и оценка рисков, прогнозирование развития ситуации и подготовка проектов управленческих решений для руководства, в том числе:

- анализ достижения целевых показателей БиНПП и подготовка предложений по его результатам;

- совместная с эксплуатационными и ремонтными подразделениями железных дорог работа по формированию информационно-аналитических баз данных источников угроз БиНПП и подготовка предложений по устранению угроз БиНПП;

- выявление новых потенциальных угроз БиНПП и подготовка предложений по их устранению;

- анализ процессов технической эксплуатации (технического обслуживания и ремонта) объектов инфраструктуры и подвижного состава, прогноз влияния их состояния на БиНПП и подготовка предложений по совершенствованию процессов.

В свою очередь, руководство центра принимает решения о реализации мер по обеспечению безопасности и надежности перевозочного процесса и организует их исполнение. При этом все меры можно разделить на оперативные и профилактические, а также по минимизации ущерба в случае возникновения нарушений.

Таким образом, понимание основных компонентов комплексной безопасности на железнодорожном транспорте, формирование и развитие интегрированной системы менеджмента комплексной безопасности, а также реализация механизмов оперативного управления комплексной безопасностью на основе функционирования ситуационного центра создают методологическую основу для достижения стратегических целей повышения уровня безопасности отечественных железных дорог.

Библиографический список

1. Указ Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=207967&dst=1000000001&date=08.09.2020> (дата обращения : 08.09.2020 г.).
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р «О Транспортной стратегии Российской Федерации» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=297899&dst=1000000001&date=08.09.2020> (дата обращения : 08.09.2020 г.).
3. Плеханов П. А. Формирование нормативной базы обеспечения безопасности движения в условиях реформирования российских железных дорог / П. А. Плеханов, В. Г. Иванов // Вестн. транспорта Поволжья. – 2011. – № 4 (28). – С. 6–13.
4. Федеральный закон Российской Федерации от 10 января 2003 г. № 17-ФЗ «О железнодорожном транспорте в Российской Федерации» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=330134&dst=1000000001&date=08.09.2020> (дата обращения : 08.09.2020 г.).
5. Федеральный закон Российской Федерации от 9 февраля 2007 г. № 16-ФЗ «О транспортной безопасности» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=339242&dst=1000000001&date=08.09.2020> (дата обращения : 08.09.2020 г.).
6. Федеральный закон Российской Федерации от 21 декабря 1994 г. № 69-ФЗ «О пожарной безопасности» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=341901&dst=100005&date=08.09.2020> (дата обращения: 08.09.2020 г.).
7. Федеральный закон Российской Федерации от 30 марта 1999 г. № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=357147&dst=1000000001&date=08.09.2020> (дата обращения : 08.09.2020 г.).
8. Федеральный закон Российской Федерации от 27 июля 2006 г. № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=349433&dst=1000000001&date=08.09.2020> (дата обращения : 08.09.2020 г.).
9. Федеральный закон Российской Федерации от 26 июля 2017 г. № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=220885&dst=1000000001&date=08.09.2020> (дата обращения : 08.09.2020 г.).
10. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 декабря 2001 г. № 197-ФЗ // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=357134&dst=1000000001&date=08.09.2020> (дата обращения : 08.09.2020 г.).
11. Федеральный закон Российской Федерации от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=358870&dst=1000000001&date=08.09.2020> (дата обращения : 08.09.2020 г.).
12. Федеральный закон Российской Федерации от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=303638&dst=1000000001&date=08.09.2020> (дата обращения : 08.09.2020 г.).

13. Федеральный закон Российской Федерации от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – URL : <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=355662&dst=1000000001&date=08.09.2020> (дата обращения : 08.09.2020 г.).

14. Красковский А. Е. Развитие системы управления безопасностью движения на железнодорожном транспорте в международном сообщении / А. Е. Красковский, В. Г. Рейнгардт, П. А. Плеханов // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 6 (31). – С. 40–43.

15. Красковский А. Е. Менеджмент безопасности движения поездов на «пространстве 1520» / А. Е. Красковский, В. А. Касаткин, П. А. Плеханов // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 5. – С. 51–56.

16. Плеханов П. А. Риск-ориентированный подход к обеспечению транспортной безопасности как части комплексной безопасности железнодорожного транспорта / П. А. Плеханов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2019. – Т. 16. – Вып. 4. – С. 539–551.

17. Плеханов П. А. Проблема формирования требований к качеству и безопасности перевозочных услуг железнодорожного транспорта / П. А. Плеханов // Экономика железных дорог. – 2015. – № 10. – С. 20–27.

18. ISO 9001:2015. Системы менеджмента качества. Требования. – М. : Стандартинформ, 2015. – 40 с.

19. ISO 31000:2018. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – М. : Стандартинформ, 2018. – 24 с.

20. ISO/TS 22163:2017. Железнодорожные приложения. Система менеджмента качества. Требования к системе менеджмента бизнеса для железнодорожных организаций : ISO 9001:2015 и особые требования для применения в железнодорожной отрасли. – М. : Стандартинформ, 2017. – 84 с.

21. ISO/IEC 22301:2019. Безопасность и устойчивость к негативным внешним воздействиям. Системы менеджмента непрерывности бизнеса. Требования. – М. : Стандартинформ, 2019. – 30 с.

22. ISO 28001:2007. Системы менеджмента безопасности цепи поставок. Наилучшие практики обе-

спечения безопасности цепи поставок, оценки и планы. Требования и руководство по применению. – М. : Стандартинформ, 2007. – 34 с.

23. ISO/IEC 27001:2013. Информационные технологии. Методы обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования. – М. : Стандартинформ, 2013. – 30 с.

24. ISO 45001:2018. Системы менеджмента профессионального здоровья и безопасности. Требования и руководство по применению. – М. : Стандартинформ, 2018. – 52 с.

25. ISO 14001:2015. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению. – М. : Стандартинформ, 2015. – 44 с.

26. Шматченко В. В. Стандарты комитета CENELEC как составная часть международного стандарта железнодорожной промышленности IRIS / В. В. Шматченко, П. А. Плеханов // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. трудов / под ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 75–79.

27. Шматченко В. В. Комплексная система менеджмента в хозяйстве телекоммуникаций на железнодорожном транспорте / В. В. Шматченко, П. А. Плеханов, В. Г. Иванов. – СПб. : ПГУПС, 2018. – 55 с.

28. Шматченко В. В. Управление безопасностью субъектов предпринимательства / В. В. Шматченко, П. А. Плеханов, В. Г. Иванов, В. В. Конюшков // Экономическое возрождение России. – 2009. – № 4 (22). – С. 25–28.

29. Шматченко В. В. Проектирование интегрированных систем менеджмента / В. В. Шматченко, В. Г. Иванов, П. А. Плеханов // Эксплуатация морского транспорта. – 2009. – № 3 (57). – С. 15–20.

30. Шматченко В. В. Интеграция систем менеджмента качества, охраны труда, охраны природы и безопасности движения / В. В. Шматченко, В. Г. Иванов, П. А. Плеханов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2009. – Вып. 3. – С. 207–219.

Дата поступления: 08.09.2020

Решение о публикации: 18.09.2020

Контактная информация:

ПЛЕХАНОВ Павел Андреевич – канд. техн. наук, доцент; pavelplekhanov@gmail.com

Ensuring integrated safety in railway transport in the context of strategic development

P. A. Plekhanov

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

For citation: Plekhanov P. A. Ensuring integrated safety in railway transport in the context of strategic development. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 4, pp. 552–565. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-552-565

Summary

Objective: Definition of the concept and components of integrated safety in railway transport, description of approaches to ensuring integrated safety. **Methods:** The general methods of empirical (observation and comparison) and theoretical (analysis and synthesis) research were applied. **Results:** Drawing on the analysis of the national regulatory framework in the field of safety, it is proposed to define the concept of integrated safety in railway transport as the absence of an unacceptable risk of hazardous events associated with damage to human life and health, damage to the environment and material values. The main types of safety that constitute integrated safety in railway transport are identified, which include traffic safety, transport security, fire safety, sanitary and epidemiological safety, information security, cybersecurity, labor safety, environmental safety, industrial safety, safety in emergency situations. On the basis of international experience, the necessity of forming an integrated management system for integrated safety in railway transport is shown. The concept of a situational center for managing the integrated safety of the transportation process in railway transport is described. **Practical importance:** The proposed characteristics of the concept of integrated safety in railway transport and mechanisms for its ensuring can be used to organize practical activities to achieve the strategic goals of increasing the level of safety on domestic railways.

Keywords: Integrated safety in railway transport, regulatory framework, safety management system, situation center.

References

1. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 1 dekabrya 2016 g. no. 642 "O Strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii" [Decree of the President of the Russian Federation of December 1, 2016 N 642 "On the Strategy of Scientific and Technological Development of the Russian Federation"]. Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=207967&dst=1000000001&date=08.09.2020> (accessed: September 08, 2020). (In Russian)
2. Rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 22 noyabrya 2008 g. no. 1734-r "O Transportnoy strategii Rossiyskoy Federatsii" [Order of the Government of the Russian Federation of November 22, 2008 N 1734-r "On the Transport Strategy of the Russian Federation"].

Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=297899&dst=1000000001&date=08.09.2020> (accessed: September 08, 2020). (In Russian)

3. Plekhanov P. A. & Ivanov V. G. Formirovaniye normativnoy bazy obespecheniya bezopasnosti dvizheniya v usloviyakh reformirovaniya rossiyskikh zheleznnykh dorog [Formation of a regulatory framework for ensuring traffic safety in the context of reforming Russian railways]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Volga Transport Bulletin], 2011, no. 4 (28), pp. 6–13. (In Russian)
4. Federal'nyy zakon Rossiyskoy Federatsii ot 10 yanvarya 2003 g. no. 17-FZ "O zheleznodorozhnom transporte v Rossiyskoy Federatsii" [Federal Law of the Russian Federation of January 10, 2003 N 17-FZ "On Railway Transport in the Russian Federation"]. Available at:

<http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=330134&dst=1000000001&date=08.09.2020> (accessed: September 08, 2020). (In Russian)

5. *Federal'nyy zakon Rossiyskoy Federatsii ot 9 fevralya 2007 g. no. 16-FZ "O transportnoy bezopasnosti"* [Federal Law of the Russian Federation of February 9, 2007 N 16-FZ "On Transport Safety"]. Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=339242&dst=1000000001&date=08.09.2020> (accessed: September 08, 2020). (In Russian)

6. *Federal'nyy zakon Rossiyskoy Federatsii ot 21 dekabrya 1994 g. no. 69-FZ "O pozharной bezopasnosti"* [Federal Law of the Russian Federation of December 21, 1994 N 69-FZ "On Fire Safety"]. Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=341901&dst=100005&date=08.09.2020> (accessed: September 08, 2020). (In Russian)

7. *Federal'nyy zakon Rossiyskoy Federatsii ot 30 marta 1999 g. no. 52-FZ "O sanitarno-epidemiologicheskom blagopoluchii naseleniya"* [Federal Law of the Russian Federation of March 30, 1999 N 52-FZ "On the sanitary and epidemiological well-being of the population"]. Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=357147&dst=1000000001&date=08.09.2020> (accessed: September 08, 2020). (In Russian)

8. *Federal'nyy zakon Rossiyskoy Federatsii ot 27 iyulya 2006 g. no. 149-FZ "Ob informatsii, informatsionnykh tekhnologiyakh i o zashchite informatsii"* [Federal Law of the Russian Federation of July 27, 2006 N 149-FZ "On Information, Information Technologies and Information Protection"]. Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=349433&dst=1000000001&date=08.09.2020> (accessed: September 08, 2020). (In Russian)

9. *Federal'nyy zakon Rossiyskoy Federatsii ot 26 iyulya 2017 g. no. 187-FZ "O bezopasnosti kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii"* ["On the security of the critical information infrastructure of the Russian Federation"]. Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=220885&dst=1000000001&date=08.09.2020> (accessed: September 08, 2020). (In Russian)

10. *Trudovoy kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 30 dekabrya 2001 g. no. 197-FZ* [Labor Code of the Russian Federation of December 30, 2001 N 197-FZ]. Available at:

<http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=357134&dst=1000000001&date=08.09.2020> (accessed: September 08, 2020). (In Russian)

11. *Federal'nyy zakon Rossiyskoy Federatsii ot 10 yanvarya 2002 g. no. 7-FZ "Ob okhrane okruzhayushchey sredy"* [Federal Law of the Russian Federation dated January 10, 2002 N 7-FZ "On environmental protection"]. Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=358870&dst=1000000001&date=08.09.2020> (accessed: September 08, 2020). (In Russian)

12. *Federal'nyy zakon Rossiyskoy Federatsii ot 21 iyulya 1997 g. no. 116-FZ "O promyshlennoy bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob'yektov"* [Federal Law of the Russian Federation of July 21, 1997 N 116-FZ "On industrial safety of hazardous production facilities"]. Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=303638&dst=1000000001&date=08.09.2020> (accessed: September 08, 2020). (In Russian)

13. *Federal'nyy zakon Rossiyskoy Federatsii ot 21 dekabrya 1994 g. no. 68-FZ "O zashchite naseleniya i territoriy ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogenogo kharaktera"* [Federal Law of the Russian Federation of December 21, 1994 N 68-FZ "On the protection of the population and territories from natural and man-made emergencies"]. Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=355662&dst=1000000001&date=08.09.2020> (accessed: September 08, 2020). (In Russian)

14. Kraskovskiy A. Ye., Reyngardt V. G. & Plekhanov P. A. Razvitiye sistemy upravleniya bezopasnost'yu dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte v mezhdunarodnom soobshchenii [Development of a traffic safety management system on railway transport in international traffic]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2010, no. 6 (31), pp. 40–43. (In Russian)

15. Kraskovskiy A. Ye., Kasatkin V. A. & Plekhanov P. A. Menedzhment bezopasnosti dvizheniya poyezdov na "prostranstve 1520" [Train traffic safety management in "1520 space"]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport], 2011, no. 5, pp. 51–56. (In Russian)

16. Plekhanov P. A. Risk-orientirovanny podkhod k obespecheniyu transportnoy bezopasnosti kak chasti

kompleksnoy bezopasnosti zheleznodorozhnogo transporta [Risk-based approach to ensuring transport security as part of the integrated security of railway transport]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, vol. 16, iss. 4, pp. 539–551. (In Russian)

17. Plekhanov P.A. Problema formirovaniya trebovaniy k kachestvu i bezopasnosti perevozhnykh uslug zheleznodorozhnogo transporta [The problem of the formation of requirements for the quality and safety of railway transportation services]. *Ekonomika zheleznikh dorog* [Railway economics], 2015, no. 10, pp. 20–27. (In Russian)

18. ISO 9001:2015. *Quality management systems. Requirements*. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 40 p. (In Russian)

19. ISO 31000:2018. *Risk management. Guidelines*. Moscow, Standartinform Publ., 2018, 24 p. (In Russian)

20. ISO/TS 22163:2017. *Railway applications. Quality management system. Business management system requirements for rail organizations: ISO 9001:2015 and particular requirements for application in the rail sector*. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 84 p. (In Russian)

21. ISO/IEC 22301:2019. *Security and resilience. Business continuity management systems. Requirements*. Moscow, Standartinform Publ., 2019, 30 p. (In Russian)

22. ISO 28001:2007. *Security management systems for the supply chain. Best practices for implementing supply chain security, assessments and plans. Requirements and guidance*. Moscow, Standartinform Publ., 2007, 34 p. (In Russian)

23. ISO/IEC 27001:2013. *Information technology. Security techniques. Information security management systems. Requirements*. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 30 p. (In Russian)

24. ISO 45001:2018. *Occupational health and safety management systems. Requirements with guidance for use*. Moscow, Standartinform Publ., 2018, 52 p. (In Russian)

25. ISO 14001:2015. *Environmental management systems. Requirements with guidance for use*. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 44 p. (In Russian)

26. Shmatchenko V.V. & Plekhanov P.A. Standarty komiteta CENELEC kak sostavnaya chast' mezhdunarodnogo standarta zheleznodorozhnoy promyshlennosti IRIS [Standards of the CENELEC Committee as an integral part of the international railway industry standard IRIS]. *Aktual'nyye voprosy razvitiya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki*. Sb. nauchnykh trudov. Pod red. V.I. V. Sapozhnikova [Topical issues of the development of railway automation and telemechanics systems. Collection of scientific papers. Ed. by V.I. V. Sapozhnikov]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2013, pp. 75–79. (In Russian)

27. Shmatchenko V.V., Plekhanov P.A. & Ivanov V.G. *Kompleksnaya sistema menedzhmenta v khozyaystve telekommunikatsiy na zheleznodorozhnom transporte* [Integrated management system in the telecommunications sector in railway transport]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2018, 55 p. (In Russian)

28. Shmatchenko V.V., Plekhanov P.A., Ivanov V.G. & Konyushkov V.V. Upravleniye bezopasnost'yu sub'yektov predprinimatel'stva [Security management of business entities]. *Ekonomicheskoye vozrozhdeniye Rossii* [Economic revival of Russia], 2009, no. 4 (22), pp. 25–28. (In Russian)

29. Shmatchenko V.V., Ivanov V.G. & Plekhanov P.A. *Proyektirovaniye integrirovannykh sistem menedzhmenta* [Designing integrated management systems]. *Ekspluatatsiya morskogo transporta* [Operation of sea transport], 2009, no. 3 (57), pp. 15–20. (In Russian)

30. Shmatchenko V.V., Ivanov V.G. & Plekhanov P.A. Integratsiya sistem menedzhmenta kachestva, okhrany truda, okhrany prirody i bezopasnosti dvizheniya [Integration of quality management systems, labor protection, environmental protection and traffic safety]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2009, iss. 3, pp. 207–219. (In Russian)

Received: September 08, 2020

Accepted: September 18, 2020

Author's information:

Pavel A. PLEKHANOV – PhD in Engineering, Associate Professor; pavelplekhanov@gmail.com



УДК 621.313.5

Электромеханическая система отопления пассажирского вагона**К. К. Ким¹, С. Н. Иванов², М. И. Хисматулин¹**

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

² Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Российская Федерация, 681013, Дальневосточный федеральный округ, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27

Для цитирования: Ким К. К., Иванов С. Н., Хисматулин М. И. Электромеханическая система отопления пассажирского вагона // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 566–574. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-566-574

Аннотация

Цель: Разработка электромеханической системы отопления пассажирского вагона с применением теплогенерирующего электромеханического преобразователя (ТЭМП). **Методы:** Использованы методы математического анализа, аспекты теории электромеханического преобразования энергии и теории управления. **Результаты:** Разработана оригинальная схема электромеханической системы отопления пассажирского вагона, выполнен гидравлический расчет мощности системы отопления пассажирского вагона. **Практическая значимость:** На основании сопоставления полученных данных с технико-экономическими показателями классических систем отопления доказана целесообразность эффективного применения ТЭМП как источника тепловой энергии для пассажирских вагонов. В результате повышаются надежность работы и коэффициент полезного действия системы отопления пассажирского вагона за счет применения в качестве теплогенерирующего блока управляемого ТЭМП, что позволяет регулировать скорость движения и нагрева теплоносителя в зависимости от разности между требуемой температурой нагрева воздуха в вагоне и ее текущим значением.

Ключевые слова: Теплогенерирующий электромеханический преобразователь, отопление, автоматизирование, надежность, коэффициент полезного действия, гидравлический расчет.

В настоящее время, учитывая технические условия, в процессе проектирования и постройки железнодорожных вагонов, предназначенных для пассажирского движения [1], внутривагонная температура должна быть в пределах 20 ± 2 °С при температуре снаружи до -40 °С. Скорость движения допускается не более 160 км/ч; также изменение значения указанной температуры по

габаритным размерам высоты и длины вагона соответственно не должно превышать 3 °С.

Жесткие требования мирового сообщества, касающиеся загрязнения окружающей среды и эффективности работы железнодорожной техники, требуют углубленной проработки и дальнейшего изучения данного направления отечественными разработчиками и производителями.

Стратегия развития ОАО «РЖД» до 2030 года [2] предполагает достижение ряда приоритетных целей, в числе которых:

- предоставлять преимущество «экологическим» технологиям, сделать возможным уменьшение воздействия на окружающую среду в 2 раза;

- увеличить степень удовлетворенности клиентов, благодаря повышению качеств услуг, но в то же время с сохранением конкурентоспособной цены перевозок;

- сохранить лидирующие позиции в мире в плане безопасности, эффективности, предоставляемых качеств услуг инфраструктуры.

Все это, в свою очередь, будет способствовать созданию эффективного обслуживания широкомасштабных цепочек доставок одних из самых крупных клиентов российского и международного рынка, а также расширению перевозочного и логистического бизнеса на евроазиатском пространстве.

Парк пассажирских вагонов России в 90 % от общего числа оснащен котлом водогрейного типа. В нем расположены 24 трубчатых электронагревательных элемента (ТЭНа), а также имеется топочная камера для угля.

Величина коэффициента полезного действия (КПД) котла не превышает 47 %. Также следует отметить достаточно невысокие значения «экологичности» производств угольной промышленности.

В процессе применения ТЭНов нужно либо «отбирать» определенные объемы электроэнергии у локомотивов при системе централизованного электропитания, которые нужны для питания ТЭНов, либо использовать автономные дизель-генераторы. Кроме вышеперечисленного, одним из возможных решений является ввод в состав вагона-электростанции в процессе эксплуатации, что, в свою очередь, значительно увеличивает итоговую стоимость системы [3–6].

В качестве альтернативного решения по сравнению с уже имеющимися отопительными системами сотрудниками кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения

и Комсомольского-на-Амуре государственного университета был предложен и разработан оригинальный метод, при применении которого используется теплогенерирующий электро-механический преобразователь (ТЭМП), который выполняет функцию теплогенерирующего и перекачивающего устройства. На базе этого метода был создан ряд конструктивных разработок, новизна которых защищена 13 патентами.

Основным элементом ТЭМП по своей сути является асинхронный двигатель, однако отличительной особенностью от последнего, где нагревание конструкции, которое сопровождает процесс преобразования электрической энергии в механическую, носит негативный характер, теплота, выделяющаяся в элементах конструкции ТЭМП, направляется на нагрев теплоносителя, т. е. непосредственно на отопление вагона. Все это, в свою очередь, приводит к увеличению показателя КПД устройства.

Конструктивная схема ТЭМП показана на рис. 1, а, б.

Конструкция ТЭМП, являющегося составной частью автоматизированной системы отопления пассажирского вагона, включает в себя статор с первичной трехфазной обмоткой 1 и вращающуюся короткозамкнутую вторичную обмотку 2, изготовленную в виде сплошного полого цилиндра. На внутренней поверхности этого цилиндра жестко закреплены напорные лопасти 3. Статор капсулирован с помощью изоляционного антифрикционного самосмазывающегося материала. На внутренней поверхности расточки статора жестко закреплен неподвижный нагревательный элемент 4, который изготавливается из тонкостенной немагнитной электропроводящей фольги из меди, гальванически не связанной с электропроводящими элементами статора, и размещается в специальной кольцевой канавке. Его закрепление и электрическое соединение обеспечиваются с помощью пайки высокотемпературным припоем непосредственно в месте установки.

Между вращающейся вторичной обмоткой 2 и статором находится теплоизолирующий слой из антифрикционного неэлектропроводя-

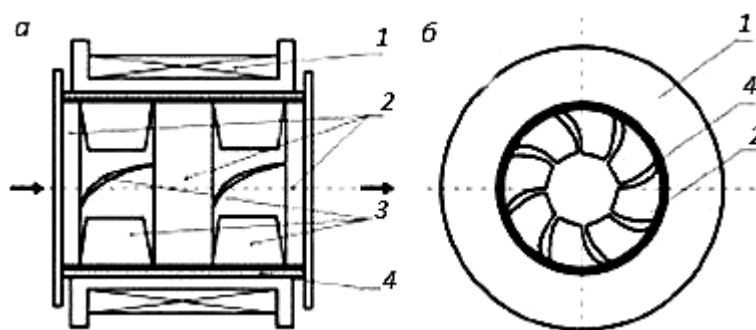


Рис. 1. Конструктивная схема ТЭМП:

а – вид со стороны боковой поверхности; *б* – вид со стороны торцевой поверхности; 1 – статор с первичной трехфазной обмоткой; 2 – вращающаяся короткозамкнутая вторичная обмотка; 3 – напорные лопасти; 4 – неподвижный нагревательный элемент

щего материала, выполняющего функцию одно-стороннего радиально-упорного подшипника скольжения. Данный слой жестко закреплен относительно статора и составляет единую конструкцию с магнитопроводом статора и первичной обмоткой. Соединение ТЭМП с внешним отопительным контуром осуществляется с помощью резьбовых штуцеров, закрепленных на торцевых крышках. Между вращающейся вторичной обмоткой 2 и торцевой фиксирующей крышкой расположено уплотнительное кольцо из самосмазывающегося материала, ограничивающее перемещение вращающейся вторичной обмотки в осевом направлении.

Ноу-хау данной конструкции – отсутствие традиционных подшипников, благодаря чему теплоноситель проходит насквозь ТЭМП через внутреннюю полость вращающейся вторичной обмотки, что, в свою очередь, обуславливает низкое гидравлическое сопротивление устройства.

Приводится в движение теплоноситель напорными лопастями, которые начинают вращаться после запитывания первичной трехфазной обмотки.

Вихревые токи во вторичной обмотке и неподвижном нагревательном элементе индуцируются вращающимся магнитным полем первичной трехфазной обмотки, тем самым вызывая их нагрев. Теплота с этих элементов передается теплоносителю.

Статор электродвигателя 4 А180 М2У3 мощностью 30 кВт является базовой конструкцией неподвижной части теплогенератора.

Была проведена серия экспериментов, в которых температура теплоносителя (воды) на выходе ТЭМП была в диапазоне 90–95 °С. Температура теплоносителя при применении ТОСОЛа или масла с легкостью повышалась при помощи регулятора статорного напряжения, постоянное напряжение в котором преобразуется в переменное промышленной частоты, а после этого в переменное регулируемой частоты [7, 8].

В табл. 1 приведены основные технико-экономические показатели и геометрические размеры одного из вариантов ТЭМП.

Показатель производительности данного генератора составил 0,0045 м³/с, скорость теплоносителя – 1 м/с. Было принято максимально низкое (которое может наблюдаться в зимнее время на территории РФ) значение температуры наружного воздуха, равное –50 °С [9, 10].

Предполагается ТЭМП интегрировать в автоматизированную систему отопления пассажирского вагона, как это показано на рис. 2.

Отличительной особенностью данной системы являются такие показатели как повышенные надежность работы и КПД, которые возможно реализовать с помощью применения в качестве теплогенерирующего блока управляемого ТЭМП.

ТАБЛИЦА 1. Основные технико-экономические показатели ТЭМП

№	Наименование величины	Значение
1	КПД	0,825
2	Коэффициент мощности	0,88
3	Подводимая мощность, кВт	3,03
4	Наружный диаметр сердечника статора, м	0,131
5	Длина сердечника статора, м	0,0983
6	Принятое значение длины сердечника, м	0,1
7	Отношение длины сердечника к наружному диаметру	0,748
8	Предельное значение отношения длины сердечника к наружному диаметру	0,775
9	Внутренний диаметр сердечника статора, м	0,0775
10	Воздушный зазор между статором и неподвижным нагревательным элементом, м	0,0001
11	Воздушный зазор между статором и вращающимся нагревательным элементом, м	0,001
12	Наружный диаметр вращающегося нагревательного элемента, м	0,073
13	Число витков в обмотке	192
14	Номинальный фазный ток, А	4,6
15	Линейная нагрузка статора, А/м	22 800
16	Допустимая линейная нагрузка, А/м	25 000
17	Плотность тока в обмотке статора, А/м ²	6 488 000
18	Тепловая нагрузка, А/м ³	$1,533 \cdot 10^{-11}$

Это, в свою очередь, способствует возможности проведения регулировки скорости движения, а также нагрева теплоносителя в зависимости от разности показаний требуемой температуры нагрева воздуха в вагоне и ее текущим значением.

На рис. 2 показана автоматизированная система отопления пассажирского вагона.

Работа автоматизированной системы отопления пассажирского вагона (рис. 2) происходит следующим образом: при подключении теплогенерирующего блока 2, который выполнен в виде управляемого ТЭМП, к сети переменного тока последний начинает нагревать теплоноситель, в то же время приводя его в движение. Теплоноситель по напорным трубам 4 поступает в калорифер 5, а затем в расширитель 7, из которого в отопительные ветви 9 купейной и коридорной сторон.

Нагревание осуществляется в соответствии с заданным алгоритмом управления, обеспечивая необходимый температурный режим, так как ТЭМП подключается к сети переменного тока через блок управления 20, в который входит оптимальный регулятор (на основе нейронной сети и/или нечеткой системы).

В торцевую крышку ТЭМП (под ее поверхность, обращенной к торцу ротора, заподлицо) жестко закреплены тензодатчики 22, способствующие при нормальном режиме работы выдаче тока номинального значения на устройство отключения 3 питания статорной обмотки.

В случае аварийного режима (резкого изменения напора теплоносителя) происходит обесточивание первичной обмотки ТЭМП, тем самым предотвращая ее перегорание.

В качестве примера был выполнен расчет двухтрубной системы водяного отопления ва-

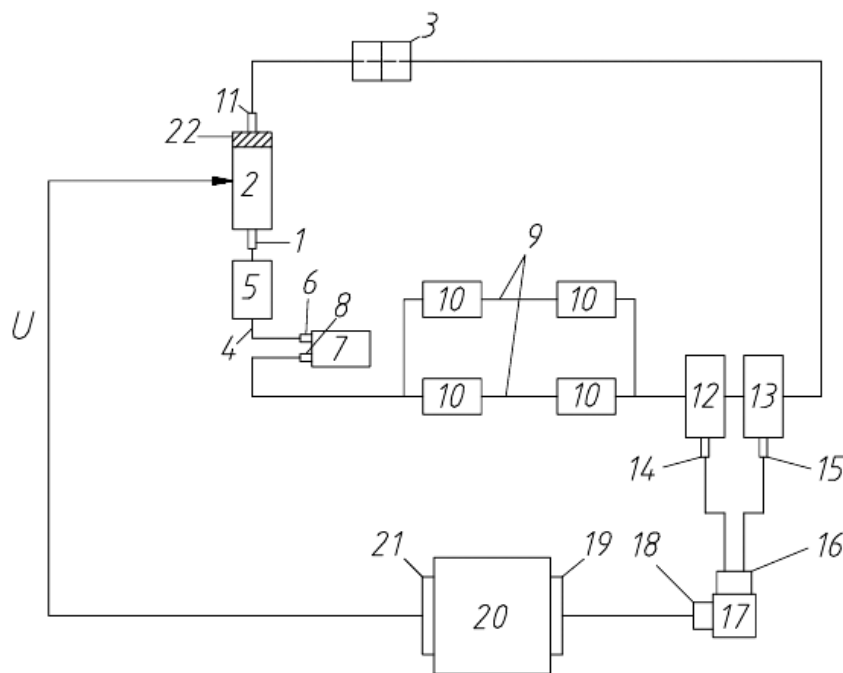


Рис. 2. Автоматизированная система отопления пассажирского вагона:

- 1 – выход теплогенерирующего блока; 2 – теплогенерирующий блок; 3 – устройство отключения; 4 – напорные трубы; 5 – калорифер; 6 – вход расширителя; 7 – расширитель; 8 – выход расширителя; 9 – отопительные ветви купейной и коридорной сторон; 10 – нагревательные трубы; 11 – вход теплогенерирующего блока; 12 – измерительный датчик; 13 – измерительный датчик; 14 – выход измерительного датчика; 15 – выход измерительного датчика; 16 – вход сумматора; 17 – сумматор; 18 – выход сумматора; 19 – вход блока управления; 20 – блок управления; 21 – выход блока управления; 22 – тензодатчики

гона с нижней разводкой с использованием ТЭМП.

Основные технико-экономические показатели ТЭМП приведены в табл. 1. Установленная мощность системы отопления принималась равной 22 кВт. Результаты расчета даны в табл. 2.

Гидравлический расчет был проведен по двум циркуляционным кольцам (общая длина 44,1 м) и сведен к подбору диаметров труб с обеспечением суммарных потерь напора в системе 343,7 Па, которые не превышают расчетное циркуляционное давление.

По результатам расчета площадей теплоотдающих поверхностей помещений вагона (с учетом номинальных плотностей теплового потока при стандартных условиях работы, температурного напора, равного разности полусуммы теплоносителя на входе (95 °C) и выходе (70 °C)

отопительного прибора, и необходимой температуры воздуха в помещениях) были выбраны 16 настенных конвекторов без кожуха типа «Прогресс 15». При этом учитывались номинальные плотности теплового потока при стандартных условиях работы, температурный напор, равный разности полусуммы теплоносителя на входе (95 °C) и выходе (70 °C) отопительного прибора, и требуемая температура воздуха в помещениях. На основе полученных данных было проведено сравнение с технико-экономическими показателями традиционных систем отопления и подтвердилась возможность эффективного применения ТЭМП в качестве источников тепловой энергии для пассажирских вагонов.

В заключение следует отметить, что предлагаемая автоматизированная система отопления пассажирского вагона с применением ТЭМП

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета мощности системы отопления

№ помещения	Тип помещения	Температура внутренняя, °С	Ограждающие конструкции			Q _{пом} , Вт
			Элементы	Размеры, м		
				длина	ширина	
			Наружные стены	1,15	2,3	
1, 13	Туалет	18	Пол	1,15	1,3	412
			Окно	0,64	0,8	
			Потолок	1,15	1,3	
			Наружные стены	1,9	2,3	
2	Служебное помещение	22	Пол	1,9	1,5	786
			Потолок	1,9	1,5	
			Окно	0,64	0,8	
			Наружные стены	1,8	2,3	
3...12	Купе	22	Пол	1,8	2,1	1253
			Потолок	1,8	2,1	
			Окно	0,96	0,8	
			Наружные стены	1,15	2,3	
14	Тамбур	20	Пол	1,15	1,55	633
			Потолок	1,15	1,55	
			Окно	0,64	0,8	
			Наружные стены	18	2,3	
			Пол	18	0,75	
			Потолок	18	0,75	
15	Коридор	20	Окно 1	0,64	0,8	4753
			Окно 2	0,96	0,8	
			...	...	...	
			Окно 10	0,96	0,8	
			Наружные стены	3,05	2,3	
	Тамбур	20	Пол	3,05	1,45	969
			Потолок	3,05	1,45	
			Окно	0,64	0,8	
Суммарная мощность, Вт						20487

выгодно отличается от систем, содержащих котел водогрейного типа с топочной камерой для угля и трубчатые электронагревательные элементы, не только повышенными надежностью и КПД, но и экологичностью (отсутствие загрязнения окружающей среды) и более высоким уровнем электробезопасности (наведенное напряжение на вращающейся вторичной обмотке составляет величину в несколько вольт).

Библиографический список

1. ГОСТ Р 55182–2012. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Общие технические требования. – URL: docs.cntd.ru/document/1200098590 (дата обращения : 12.07.2020 г.).
2. Краткое описание стратегии развития ОАО «РЖД» до 2030 года. – URL : <http://ar2016.rzd.ru/ru/strategy/development-strategy-2030> (дата обращения : 20.08.2020 г.).
3. Ким К. К. Основы проектирования гидроэлектродинамических теплогенераторов / К. К. Ким, С. Н. Иванов, С. В. Уханов // Электроэнергетика. Электротехника. Электротехническая промышленность. – 2008. – № 4. – С. 14–16.
4. Ким К. К. Теплогенерирующий электромеханический преобразователь / К. К. Ким, С. Н. Иванов, И. М. Карпова // Электротехника. – 2008. – № 9. – С. 46–52.
5. Компьютерная программа для проведения инженерного анализа и двумерного моделирования методом конечных элементов. – URL : <http://www.elcut.ru> (дата обращения : 07.09.2020 г.).
6. Kim K. K. The stability of a synchronous machine with zero-flux stator winding to small radial disturban-

ces / K. K. Kim // Electrical Technology Russia. – 1999. – Iss. 4. – P. 66–77.

7. Kim K. K. New type of electroheat-generator / K. K. Kim, S. N. Ivanov // Digests of XVIII International Conference on Electrical Machines, ICEM'08. – Vilamoura, Portugal. 669 September 2008. – PC. 5.12.

8. Васильев П. Ю. Определение параметров технических средств контроля силовых полупроводниковых приборов путем математического моделирования теплофизических процессов, возникающих при воздействии импульсов тока / П. Ю. Васильев, В. В. Никитин // Материалы Всерос. науч.-техн. конференции «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» : в 4 т. Красноярск, 19–21 мая 2005 г. – Красноярск, 2005. – Т. I. – С. 539–543.

9. Елшин А. И. и др. Экономическая целесообразность электроотопления / А. И. Елшин и др. // Образование, наука и производство : проблемы, достижения и перспективы : материалы Междунар. науч.-технич. конференции «Электротехнические системы и комплексы». Комсомольск-на-Амуре, 21–22 октября 2010 г. : в 5 т. / Редкол. : А. М. Шпилев (отв. ред.) и др. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. – Т. 3. – С. 190–196.

10. Кузьмин В. М. Электронагревательные устройства трансформаторного типа / В. М. Кузьмин. – Владивосток : Дальнаука, 2001. – 143 с.

Дата поступления: 09.09.2020

Решение о публикации: 22.09.2020

Контактная информация:

КИМ Константин Константинович – д-р техн. наук, профессор; kimkk@inbox.ru
 ИВАНОВ Сергей Николаевич – д-р техн. наук, профессор; snivanov57@mail.ru
 ХИСМАТУЛИН Марат Ильдусович – аспирант; lokomotivlar@gmail.com

Electromechanical heating system for a passenger car

K. K. Kim¹, S. N. Ivanov², M. I. Khismatulin¹

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

² Komsomolsk-on-Amur State University, 27, Lenin pr., Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory, Far Eastern Federal District, 681013, Russian Federation

For citation: Kim K. K., Ivanov S. N., Khismatulin M. I. Electromechanical heating system for a passenger car. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 4, pp. 566–574. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-566-574

Summary

Objective: Development of an electromechanical heating system for a passenger car using a heat-generating electromechanical converter (HGEC). **Methods:** Methods of mathematical analysis, aspects of the theory of electromechanical energy conversion and control theory were used. **Results:** An original diagram of the electromechanical heating system of a passenger car was developed, a hydraulic calculation of the power of the heating system of a passenger car was performed. **Practical importance:** Based on the comparison of the obtained data with the technical and economic indicators of classical heating systems, the expediency of the effective use of HGEC as a source of thermal energy for passenger cars has been proved. As a result, the reliability and efficiency of the passenger car heating system are increased due to the use of a controlled HGEC as a heat generating unit, which makes it possible to regulate the speed of movement and heating of the coolant depending on the difference between the required temperature of heating the air in the car and its current value.

Keywords: Heat generating electromechanical converter, heating, automation, reliability, efficiency, hydraulic calculation.

References

1. *State standart GOST R 55182–2012. Vagony pas-sazhirskiye lokomotivnoy tyagi. Obshchiye tekhnicheskkiye trebovaniya (Pereizdaniye)* [Locomotive-hauled passenger cars. General technical requirements (Reissue)]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200098590> (accessed: July 12, 2020). (In Russian)
2. *Kratkoye opisaniye strategii razvitiya OAO “RZHD” do 2030 goda* [Brief description of the development strategy of JSC “Russian Railways” until 2030]. Available at: <http://ar2016.rzd.ru/ru/strategy/development-strategy-2030> (accessed: August 20, 2020). (In Russian)
3. Kim K. K., Ivanov S. N. & Ukhonov S. V. Osnovy proyektirovaniya gidroelektrodinamicheskikh teplogeneratov [Fundamentals of designing hydroelectrodynamical heat generators]. *Elektroenergetika. Elektrotehnika. Elektrotekhnicheskaya promyshlennost’* [Power engineering. Electrical engineering. Electrical industry], 2008, no. 4, pp. 14–16. (In Russian)
4. Kim K. K., Ivanov S. N. & Karpova I. M. Teplogeneriruyushchiy elektromekhanicheskiy preobrazovatel’ [Heat-generating electromechanical converter]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2008, no. 9, pp. 46–52. (In Russian)
5. *ELCUT*. Available at: <http://www.elcut.ru> (accessed: September 07, 2020). (In Russian)
6. Kim K. K. The stability of a synchronous machine with zero-flux stator winding to small radial disturbances. *Electrical Technology Russia*, 1999, iss. 4, pp. 66–77.
7. Kim K. K. & Ivanov S. N. New type of electroheat-generator. *Digests of XVIII International Conference on Electrical Machines, ICEM’08*. Vilamoura, Portugal, 669 September 2008, PC. 5.12.
8. Vasil’yev P. Yu. & Nikitin V. V. Opredeleniye parametrov tekhnicheskikh sredstv kontrolya silovyykh poluprovodnikovyykh priborov putem matematicheskogo modelirovaniya teplofizicheskikh protsessov, voznikayushchikh pri vozdeystvii impul’sov toka [Determination of parameters of technical means of control of power semiconductor devices by means of mathematical modeling of thermophysical processes arising under the influence of current pulses]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Resursosberegayushchiye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte”*. V 4 t. Krasnoyarsk, 19–21 maya 2005 g. [Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference “Resource-saving technologies in railway transport”. In 4 vol. Krasnoyarsk, May 19–21, 2005]. Krasnoyarsk, 2005, vol. I, pp. 539–543. (In Russian)

9. Yelshin A. I. et al. Ekonomicheskaya tselesoobraznost' elektrootopleniya [Economic feasibility of electric heating]. *Obrazovaniye, nauka i proizvodstvo: problemy, dostizheniya i perspektivy. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы"*. Komsomol'sk-na-Amure, 21–22 oktyabrya 2010 g. V 5 t. [Education, science and production: problems, achievements and prospects. Proceedings of the international scientific and technical conference "Electrical systems and complexes". Komsomolsk-on-Amur, October 21–22, 2010. In 5 vol.]. Komsomolsk-on-Amur, GOUVPO "KnAGTU" [Komsomolsk-on-Amur State Technical University] Publ., 2010, vol. 3, pp. 190–196. (In Russian)

10. Kuz'min V. M. *Elektronagrevatel'nyye ustroystva transformatornogo tipa* [Electric heating devices of transformer type]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2001, 143 p. (In Russian)

Received: September 09, 2020

Accepted: September 22, 2020

Authors' information:

Konstantin K. KIM – D. Sci. in Engineering, Professor; kimkk@inbox.ru

Sergey N. IVANOV – D. Sci. in Engineering, Professor; snivanov57@mail.ru

Marat I. HISMATULIN – Graduate Student; lokomotivlar@gmail.com

УДК 656.2

О равновесном уклоне станционного профиля

В. И. Смирнов, С. А. Видюшенков

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

Для цитирования: Смирнов В. И., Видюшенков С. А. О равновесном уклоне станционного профиля // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 575–582. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-575-582

Аннотация

Цель: Определение крутизны уклона продольного профиля станционного пути, при которой возможен самопроизвольный уход незакрепленного подвижного состава. **Методы:** Применяется моделирование движения подвижного состава, основанное на аналитическом решении дифференциального уравнения равновесия вагонного отцепа. Отцеп на станционном пути рассматривается как тело на наклонной плоскости с массой, равной массе отцепа. Продольный профиль пути аппроксимируется кусочно-линейной прямой. **Результаты:** Показано, что наибольшую вероятность самопроизвольного ухода имеют хопперы за счет высокого коэффициента воздушного сопротивления. Для трехэлементного профиля допустимая скорость ветра, при которой возможен уход вагонов, остается сравнительно невысокой, – порядка 14 м/с, что по-прежнему оставляет актуальной проблеме надежного закрепления вагонов на станции. **Практическая значимость:** Полученное решение позволяет проверить вероятность ухода незакрепленного подвижного состава под действием силы тяжести и воздействия ветровой нагрузки и уточнить нормы закрепления вагонов на станции. Предложенная расчетная схема дает возможность также определить силу, с которой будут действовать на тормозной упор движущиеся вагоны, если таковой установлен в конце участка пути.

Ключевые слова: Станционный путь, продольный профиль, уход вагонов, эквивалентный уклон.

Действующими Правилами технической эксплуатации железных дорог [1] для предотвращения самопроизвольного ухода вагонов или составов (без локомотива) рекомендуется трехэлементный вогнутый продольный профиль станционной площадки с уклонами, не превышающими 2,5‰. Однако к настоящему времени на сети железных дорог эксплуатируется большее количество отдельных пунктов, продольный профиль которых значительно отличается от нормативного. Как следствие, по мере насыщения парка подвижного состава вагонами на роликовых подшипниках участились случаи самопроизвольного ухода вагонов со станционных путей. Очевидно, что, в силу экономических причин, переустройство таких отдельных пунктов в короткие сроки произвести невозможно.

В связи с этим при переустройстве отдельных пунктов допускается сохранять существующие уклоны и длины отдельных элементов в неперестраиваемой части. Кроме того, как показывает анализ, частыми причинами самопроизвольного ухода вагонов являются искажения продольного профиля в процессе эксплуатации, а нормы на периодичность инструментальных проверок профиля часто не выполняются. Между тем на станциях встречаются случаи продольного профиля с выпуклой формой (горб), который весьма опасен с точки зрения ухода подвижного состава. В этих условиях повышаются требования к работникам, отвечающим за закрепление подвижного состава тормозными башмаками. Для уточнения норм закрепления прежде всего целесообразно проверить возможность ухода

незакрепленного подвижного состава под действием силы тяжести и воздействия ветровой нагрузки.

Влияние продольного профиля на скорость движения отцепов на сортировочных путях было изучено в [2–8]. В данной работе такой анализ сделан применительно к приемоотправочным путям. Теоретические основы приводимых ниже расчетов заложены М. В. Стрелковым [9].

Оценим влияние величины уклонов продольного профиля станционной площадки на возможность трогания с места незакрепленных вагонов. На рис. 1 приведен продольный профиль одного из пути эксплуатируемой промежуточной станции [10]. Как видно из рисунка, профиль пути имеет выпуклое очертание с точкой перелома посередине пути. Средний уклон пути $i_{\text{ср}} = 0,8\%$ со спуском в сторону Б. Однако на станции произошел случай ухода состава в сторону А, так как с этой стороны располагались груженные вагоны, в то время как со стороны Б – порожние. Последнее говорит о том, что при укладке тормозных башмаков составителю необходимо учитывать соотношение масс частей состава, расположенных на различных элементах профиля.

Условие предотвращения самопроизвольного ухода незакрепленного состава (группы вагонов) со станционных путей можно определить из выражения [11]

$$v_B \leq \sqrt{\lambda/\mu}, \quad (1)$$

где v_B – допустимая скорость ветра, направление которого совпадает с направлением возможного ухода вагонов (при боковом ветре следует учесть угол между направлением ветра и осью пути),

$$\lambda = g' (i_3 - w \cdot 10^{-3}), \quad (2)$$

В формуле (2) i_3 – эквивалентный уклон, равный

$$i_3 = \sum_{v=1}^N \frac{\gamma_v \cdot i_v}{\sqrt{i_v^2 + 10^6}};$$

N – количество вагонов в составе; v – порядковый номер вагона; i_v – уклон элемента профиля в точке расположения центра тяжести v -го вагона, ‰;

$$\gamma_v = m_v / M;$$

m_v – масса v -го вагона в составе, т; M – масса всего состава, т,

$$M = \sum_{v=1}^N m_v;$$

w – средневзвешенное по массе основное удельное сопротивление движению вагонов при трогании с места, Н/кН, равное

$$w = \sum_{v=1}^N \frac{m_v \cdot w_v}{M};$$

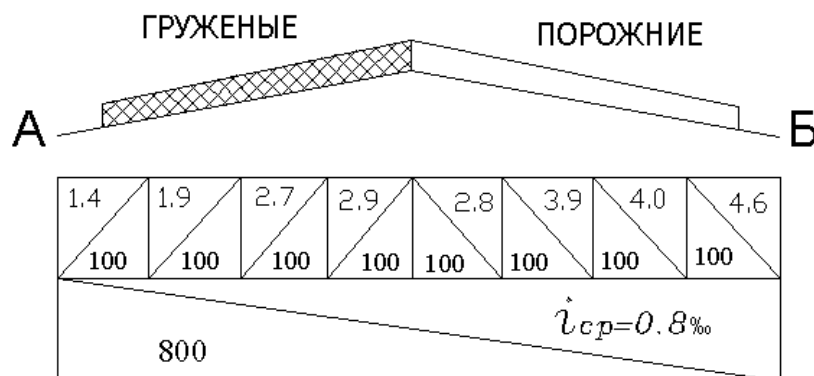


Рис. 1. Продольный профиль станционного пути (уклон в ‰/длина, м)

w_v – удельное сопротивление движению при трогании с места v -го вагона, Н/кН; g' – ускорение силы тяжести с учетом инерции вращения колес состава, м/с² [12],

$$g' = \frac{Mg}{M + 0,925 \cdot n};$$

n – количество осей в составе; $g = 9,81$ м/с²;

$$\mu = c / M;$$

c – аэродинамический коэффициент, т/м,

$$c = \frac{0,0667p}{287(273 + t^\circ)} \sum_{v=1}^N C_{xv} S_v;$$

C_{xv} – коэффициент воздушного сопротивления v -го вагона; S_v – площадь поперечного сечения v -го вагона (мидель), м²; p – атмосферное давление, мм рт. ст.; 287 – удельная газовая постоянная для воздуха, Дж/(кг·К); 0,0667 – переводной коэффициент (масса вагона принимается в тоннах); t° – температура воздуха, °С.

Условие (1) сформулировано для случая, когда состав располагается на прямом пути при отсутствии на нем (в пределах полезной длины) стрелочных переводов. В других случаях необходимо принимать во внимание сопротивление движению от стрелок и кривых.

Выражение для эквивалентного уклона приведено для случая так называемой вагонной модели состава, в которой каждый вагон рассматривается как материальная точка с массой, равной массе вагона и сосредоточенной в его центре тяжести. При длиннобазных вагонах и коротких элементах профиля это может привести к неточности в определении допустимой силы ветра, согласно условию (1). Следует принимать во внимание то обстоятельство, что различные оси вагона будут находиться на разных уклонах и, следовательно, массы вагона, приходящиеся на такие оси, будут испытывать разную движущую силу. В этом случае лучше использовать так называемую осевую модель отцепы, отлича-

ющей от вагонной состоит в уточненной величине эквивалентного уклона [13].

Согласно выражению (1), для приведенного на рис. 1 профиля был выполнен расчет скорости лобового ветра, при которой возможен самопроизвольный уход состава, состоящего из следующих типов вагонов: 1) крытые, КР (53 вагона, 27 груженых + 26 порожних), 2) полувагоны, ПВ (57 = 29 груженых + 28 порожних), 3) платформы, ПЛ (53 = 27 груженых + 26 порожних), 4) цистерны, ЦС (66 = 33 груженых + 33 порожних), 5) хопперы, ХП (66 = 33 груженых + 33 порожних). Масса груженого вагона принималась равной 86 т, порожнего – 22 т, все вагоны четырехосные. Удельное сопротивление движению при трогании с места определено в соответствии с Правилами тяговых расчетов по формуле $w_{тр} = 28/(q_0 + 7)$, Н/кН, где q_0 – средняя для состава нагрузка от оси на рельсы, для груженых вагонов $q_0 = 21,5$ т/ось, для порожних – $q_0 = 5,5$ т/ось. Температура воздуха принята равной 25 °С, атмосферное давление $p = 760$ мм рт. ст.

Результаты расчетов приведены в табл. 1. Как из нее видно, наибольшую вероятность самопроизвольного ухода имеют хопперы – за счет высокого коэффициента воздушного сопротивления. На рис. 2 представлена зависимость критической скорости ветра от величины эквивалентного уклона для разных типов вагонов.

Рассмотрим теперь возможность самопроизвольного ухода вагонов с отдельного пункта, имеющего, согласно действующим нормам, трехэлементный вогнутый продольный профиль (рис. 3). Такой профиль состоит из горизонтальной разделительной площадки длиной $l_{рп}$ и двух противоуклонов с крутизной $i = 1,5\text{--}2,5\text{‰}$ и длиной $l_i = k \cdot 10/i$, где $k = 0,45\text{--}0,55$, l_0 – полезная длина пути [14]. Варианты профиля при $l_0 = 850$ м приведены в табл. 2. Расчет критической скорости ветра выполнен для состава, состоящего из хопперов, половина из которых порожние, а половина – груженые. Исходные условия прежние. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 1. Расчетные параметры движения вагонов

Параметр	Тип вагона				
	Крытые (КР)	Полувагоны (ПВ)	Платформы (ПЛ)	Цистерны (ЦС)	Хопперы (ХП)
Количество осей, n	212	228	212	264	264
Суммарный коэффициент воздушного сопротивления, $\sum_{v=1}^N C_{xv} S_v$	121,8	249,6	328,1	381,6	607,2
Аэродинамический коэффициент, c , т/м	0,072	0,148	0,194	0,194	0,360
Масса состава, т	2894	3110	2894	3564	3564
Средневзвешенное сопротивление движению, w , Н/кН	1,416	1,417	1,416	1,426	1,426
Приведенное ускорение силы тяжести, g' , м/с ²	9,187	9,187	9,187	9,181	9,181
Параметр λ , м/с ²	$3,674 \cdot 10^{-3}$	$3,795 \cdot 10^{-3}$	$3,674 \cdot 10^{-3}$	$4,103 \cdot 10^{-3}$	$4,103 \cdot 10^{-3}$
Параметр μ , 1/м	$2,495 \cdot 10^{-5}$	$4,756 \cdot 10^{-5}$	$6,720 \cdot 10^{-5}$	$5,457 \cdot 10^{-5}$	$1,010 \cdot 10^{-5}$
Эквивалентный уклон, i_3	$-1,016 \cdot 10^{-3}$	$-1,004 \cdot 10^{-3}$	$-1,016 \cdot 10^{-3}$	$-9,79 \cdot 10^{-4}$	$-9,79 \cdot 10^{-4}$
Критическая скорость ветра, $v_{\text{в}}$, м/с	12,1	8,9	7,4	8,0	6,4

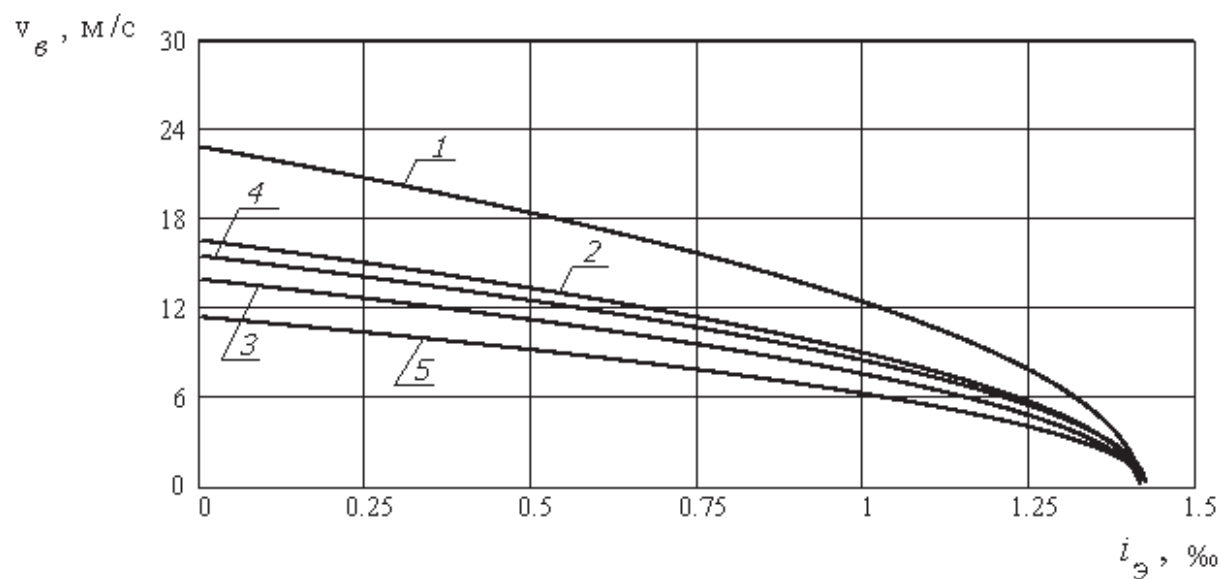


Рис. 2. Зависимость критической скорости ветра от эквивалентного уклона:

1 – КР; 2 – ПВ; 3 – ПЛ; 4 – ЦС; 5 – ХП

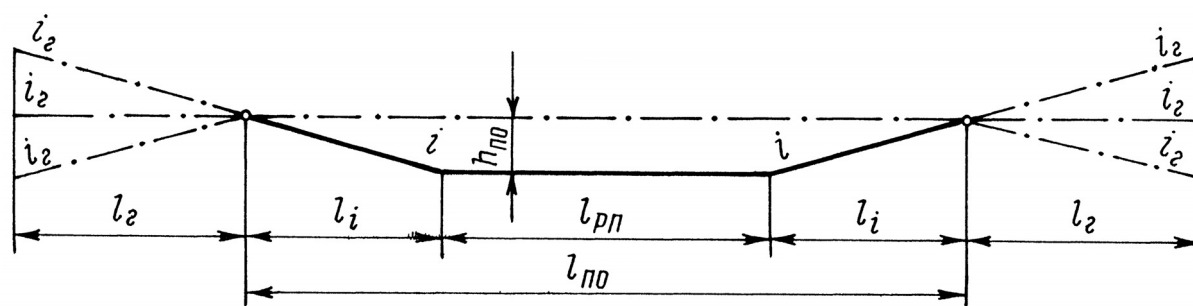


Рис. 3. Трехэлементный продольный профиль

ТАБЛИЦА 2. Варианты продольного трехэлементного профиля

Длина, м			
противоуклона, l_i		разделительной площадки, l_{pp}	
k	$i, \%$		
	A. 1.5	B. 2.0	C. 2.5
I. 0.45	255	191	153
	340	468	544
II. 0.50	283	213	170
	284	424	510
III. 0.55	312	234	187
	226	382	476

ТАБЛИЦА 3. Допустимая скорость ветра для разных вариантов продольного профиля

Вариант профиля	I.A	I.B	I.C	II.A	II.B	II.C	III.A	III.B	III.C
Критическая скорость ветра, м/с	13,6	13,7	13,8	13,7	13,9	13,9	14,1	14,0	14,0

Как видно из табл. 3, и для трехэлементного профиля допустимая скорость ветра остается сравнительно невысокой – порядка 14 м/с, что по-прежнему оставляет проблему надежности закрепления вагонов на станции актуальной. Заметим, что в случае, когда профиль станционной площадки имеет нулевой уклон на всем протяжении, допустимая скорость ветра равна для состава из хопперов 11,4 м/с; это ненамного меньше, чем для трехэлементного профиля. Кроме

того, нужно учитывать, что трехэлементный продольный профиль должен иметь *каждый* станционный путь, что, как следствие, значительно усложняет проектирование, строительство и содержание станции, в особенности горловин [15]. Таким образом, целесообразность сооружения такого профиля требует серьезного обоснования.

Предложенная расчетная схема позволяет также определить силу, с которой будут дей-

ствовать на тормозной упор движущиеся вагоны, если таковой установлен в конце участка пути [16].

Библиографический список

1. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации (с изменениями на 25 декабря 2018 года). – Утв. Приказом Минтранса России от 21 декабря 2010 г. № 286. – М. : ООО «Техинформ»; ООО Центр «Транспорт», 2012. – 520 с.
2. Бессоненко С. А. Принципы оптимизации параметров сортировочных горок / С. А. Бессоненко // Транспорт : наука, техника, управление. – 2010. – № 5. – С. 17–20.
3. Осипов Д. В. Влияние искажений продольного профиля перевальной части сортировочной горки на проход отцепов без саморасцепа / Д. В. Осипов // Современная наука : теоретический и практический взгляд : сб. науч. статей. – Уфа : АЭТЕРНА, 2015. – Ч. 1. – С. 32–36.
4. Корниенко К. И. Исследование влияния профиля горки на скорость движения отцепов в сортировочном парке при встречном ветре / К. И. Корниенко // Наука и молодежь СГУПС в третьем тысячелетии. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2017. – № 6. – С. 104–111.
5. Ахмаев Е. А. Исследования влияния профиля горки на скорость движения отцепов в сортировочном парке при попутном ветре / Е. А. Ахмаев, С. А. Бессоненко, В. В. Борисов, К. И. Корниенко // Вестн. Сибирск. гос. ун-та путей сообщения. – 2017. – № 1 (40). – С. 13–18.
6. Ахмаев Е. А. Исследование движения отцепа в сортировочном парке / Е. А. Ахмаев, С. А. Бессоненко, В. В. Борисов, К. И. Корниенко // Транспорт Урала. – 2017. – № 4 (55). – С. 49–53.
7. Корниенко К. И. Алгоритм расчета точки останова отцепа в сортировочном парке / К. И. Корниенко // Транспорт : наука, техника, управление. – 2017. – № 11. – С. 36–40.
8. Пазойский Ю. О. К вопросу о движении вагона по уклону железнодорожного пути / Ю. О. Пазойский, В. А. Кобзев, И. П. Старшов, В. М. Рудановский // Бюл.

транспорт. инфраструктуры. – 2018. – № 2 (272). – С. 35–37.

9. Стрелков М. В. Исследование вопросов предотвращения ухода со станционных путей вагонов, оборудованных роликовыми подшипниками / М. В. Стрелков : автореф. дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.22.08. – Л. : ЛИИЖТ, 1976. – 20 с.

10. Сычев Е. И. Влияние системы нормативных документов на безопасность движения поездов / Е. И. Сычев // Транспорт : наука, техника, управление. – 1999. – № 5. – С. 57–59.

11. Смирнов В. И. Динамика скатывания одновагонных отцепов с сортировочной горки / В. И. Смирнов // Транспорт : наука, техника, управление. – 1993. – № 10. – С. 29–34.

12. Смирнов В. И. Динамические особенности скатывания вагонов с сортировочной горки / В. И. Смирнов, С. А. Видюшенков, А. С. Кухарева // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2019. – Т. 16. – Вып. 2. – С. 241–250.

13. Смирнов В. И. Динамика скатывания многовагонных отцепов с сортировочной горки / В. И. Смирнов // Транспорт : наука, техника, управление. – 1994. – № 1. – С. 17–23.

14. Ефименко Ю. И. Железнодорожные станции и узлы : учеб. пособие / Ю. И. Ефименко, С. И. Логинов, В. С. Суходоев, М. М. Уздин, П. К. Рыбин, В. В. Костенко, В. И. Смирнов. – М. : Академия, 2006. – 336 с.

15. Методические указания по проектированию железнодорожных узлов и станций : особенности проектирования трехэлементного профиля станционных путей. – Киев : Киевгипротранс, 1982. – 38 с.

16. Исаев К. С. Упоры для механизированного закрепления подвижного состава / К. С. Исаев, В. П. Шейкин, В. М. Сорокодумов, М. Ф. Бобылев // Автоматика, телемеханика и связь. – 1996. – № 1. – С. 25–27.

Дата поступления: 29.06.2020

Решение о публикации: 19.07.2020

Контактная информация:

СМИРНОВ Владимир Игоревич – д-р техн. наук, профессор; vsmirnov1@gmail.com
ВИДЮШЕНКОВ Сергей Александрович – канд. техн. наук, доцент; baklava@mail.ru

On equilibrium slope of station gradient

V. I. Smirnov, S. A. Vidiushenkov

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

For citation: Smirnov V.I., Vidiushenkov S.A. On equilibrium slope of station gradient. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 4, pp. 575–582. (In Russian)
DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-575-582

Summary

Objective: Definition of slope gradient for station track profile elevation at which self-induced running-off of loose running stock. **Methods:** Simulation of rolling stock movement based on analytical solution of differential equation of equilibrium of cut of wagons. Cut of wagons on station track is treated as a solid on a gradient plane with a mass equal to the mass of the cut of wagons. Track profile elevation is approximated by piecewise-linear right line. **Results:** The paper shows that hopper wagons have the highest probability of self-induced running-off due to high air resistance coefficient. For three-element profile the hypothetical wind speed at which running-off of wagons is possible remains relatively low, about 14 metres per second, which leaves the problem of effective fastening of wagons at stations still current. **Practical importance:** The solution obtained permits evaluating the probability of running-off of loose rolling stock under the action of gravity and under the impact of wind loading, as well as refine the norms for fastening of wagons at a station. The proposed calculation scheme also permits gauging the strength with which moving wagons would impact the backing thrust in case it is installed at the end of a track section.

Keywords: Station track, profile elevation, running-off of wagons, equivalent grade.

References

1. *Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii zheleznnykh dorog Rossiiskoi Federatsii* [Rules of technical operation of the Russian Federation railways]. Updated as on December 25, 2018. As approved by the order of Russian Transport Ministry, December 21, 2010 N 286. Moscow, OOO Tekhinform and OOO Tsentr Transport Publ., 2012, 520 p. (In Russian)
2. Bessonenko S.A. Printsipy optimizatsii parametrov sortirovochnykh gorok [Principles of optimisation of gravity humping yards' parameters]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, technics, management], 2010, no. 5, pp. 17–20. (In Russian)
3. Osipov D. V. Vliianie iskazhenii prodol'nogo profil'ia pereval'noi chasti sortirovochnoi gorki na prokhoz ottsepov bez samorastsepa [Impact of deformations of profile elevation of a transshipping section of a gravity hump yard on passage of a cut of wagons without unwanted uncoupling]. *Sovremennaya nauka: teoreticheskii i prakticheskii vzgliad*. Sb. nauchnykh statei [Modern science: theoretical and practical view. Coll. sci. papers]. Ufa, AETERNA Publ., 2015, ch. 1, pp. 32–36. (In Russian)
4. Kornienko K. I. Issledovanie vlianiia profil'ia gorki na skorost' dvizheniia ottsepov v sortirovochnom parke pri vstrechnom vetre [A study of the impact of hump profile on cut of wagons' movement speed in a sorting yard in head wind]. *Nauka i molodezh' SGUPSa v tret'em tysyacheletii* [Siberian Transport University's science and youth in the 3rd millennium]. Novosibirsk, Izdatel'stvo SGUPSa [Siberian Transport University Publ.], 2017, no. 6, pp. 104–111. (In Russian)
5. Akhmaev E. A., Bessonenko S. A., Borisov V. V. & Kornienko K. I. Issledovaniia vlianiia profil'ia gorki na skorost' dvizheniia ottsepov v sortirovochnom parke pri poputnom vetre [Studies of the impact of hump profile on cut of wagons' movement speed in a sorting yard in tail wind]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia* [Siberian Transport University Herald], 2017, no. 1 (40), pp. 13–18. (In Russian)

6. Akhmaev E. A., Bessonenko S. A., Borisov V. V. & Kornienko K. I. Issledovanie dvizheniia ottsepa v sortirovochnom parke [A study of movement of a cut of wagons in a sorting yard]. *Transport Urala [Urals transport]*, 2017, no. 4 (55), pp. 49–53. (In Russian)
7. Kornienko K. I. Algoritm rasscheta tochki ostanovki ottsepa v sortirovochnom parke [Calculation algorithm for a stopping point of a cut of wagons in a sorting yard]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie [Transport: science, technics, management]*, 2017, no. 11, pp. 36–40. (In Russian)
8. Pazoiskii Yu. O., Kobzev V. A., Starshov I. P. & Rudanovskii V. M. K voprosu o dvizhenii vagona po uklonu zheleznodorozhnogo puti [On the question of wagon movement on railway track slope]. *Biulleten' transportnoi infrastruktury [Transport infrastructure bulletin]*, 2018, no. 2 (272), pp. 35–37. (In Russian)
9. Strelkov M. V. Issledovanie voprosov predotvrashcheniia ukhoda so stantsionnykh putei vagonov, oborudovannykh rolikovymi podshipnikami [A study into the problems of preventing running off of wagons equipped with tapered roller bearings from station tracks]. Extended abstract of Cand. Sci. Eng. dissertation, speciality: 05.22.08. Leningrad, LIIZhT [Leningrad Institute of Railway Transport] Publ., 1976, 20 p. (In Russian)
10. Sychev E. I. Vliianie sistemy normativnykh dokumentov na bezopasnost' dvizheniia poezdov [Influence of regulatory documents' system on train movement safety]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie [Transport: science, technics, management]*, 1999, no. 5, pp. 57–59. (In Russian)
11. Smirnov V. I. Dinamika skatyvaniia odnovagonnykh ottsepov s sortirovochnoi gorki [Dynamics of one-wagon cuts' rolling off from humping yard]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie [Transport: science, technics, management]*, 1993, no. 10, pp. 29–34. (In Russian)
12. Smirnov V. I., Vidiushenkov S. A. & Kukhareva A. S. Dinamicheskie osobennosti skatyvaniia vagonov s sortirovochnoi gorki [Dynamic peculiarities of wagons' rolling off from humping yard]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia [Proceedings of Petersburg Transport University]*. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., 2019, vol. 16, iss. 2, pp. 241–250. (In Russian)
13. Smirnov V. I. Dinamika skatyvaniia mnogovagonnykh ottsepov s sortirovochnoi gorki [Dynamics of rolling off of multi-wagon cuts from humping yard]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie [Transport: science, technics, management]*, 1994, no. 1, pp. 17–23. (In Russian)
14. Efimenko Yu. I., Loginov S. I., Sukhodoev V. S., Uzdin M. M., Rybin P. K., Kostenko V. V. & Smirnov V. I. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly. Uchebnoe posobie [Railway stations and junctions. Study guide]*. Moscow, Akademiia Publ., 2006, 336 p. (In Russian)
15. Metodicheskie ukazaniia po proektirovaniu zheleznodorozhnykh uzlov i stantsii: Osobennosti proektirovaniia trekhelementnogo profilia stantsionnykh putei [Recommended practices for designing railway junctions and stations: Special aspects of designing three-element profile of station tracks]. Kiev, Kievgiptrotrans Publ., 1982, 38 p. (In Russian)
16. Isaev K. S., Sheikin V. P., Sorokodumov V. M. & Bobylev M. F. Upory dlia mekhanizirovannogo zakrepleniia podvizhnogo sostava [Arresting devices for mechanical fastening of rolling stock]. *Avtomatika, telemekhanika i sviaz' [Automatics, telemechanics and communications]*, 1996, no. 1, pp. 25–27. (In Russian)

Received: June 29, 2020

Accepted: July 19, 2020

Author's information:

Vladimir I. SMIRNOV – D. Sci. in Engineering, Professor; vsmirnov1@gmail.com

Sergei A. VIDYUSHENKOV – PhD in Engineering, Senior Lecturer; baklava@mail.ru

УДК 331.456.202012

Сравнительный анализ законодательства в области охраны труда в России и Китае

Чжуншэн Тан

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

Для цитирования: Тан Чжуншэн. Сравнительный анализ законодательства в области охраны труда в России и Китае // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2020. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 583–590. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-583-590

Аннотация

Цель: Анализ трудового законодательства об охране труда в Российской Федерации и Китайской Народной Республике с целью постоянного улучшения условий труда, обеспечения безопасности и безвредности небезопасных и вредных для здоровья операций, механизации и автоматизации тяжелого ручного труда, а также реализации безопасного и цивилизованного производства. **Методы:** Применялся анализ законодательства по охране труда с точки зрения занятости, трудовых договоров, рабочего времени и перерывов на отдых, заработной платы, охраны труда, социального страхования, профессионального обучения и т. д. По его результатам установлены отрицательные и положительные последствия законодательства об охране труда в Китае и России. **Результаты:** В конституциях и трудовом законодательстве обеих стран содержатся права работников на правовую защиту, в том числе право на работу в условиях, соответствующих требованиям безопасности, существуют стандарты расследования несчастных случаев на производстве, особое внимание уделяется охране труда женщин и детей. Выявлено, что в Российской Федерации в отличие от Китая было разработано большее количество нормативных законов и нормативных актов, а специальные оценки труда были эффективно отрегулированы, поэтому уровень безопасности на российском рабочем месте выше. **Практическая значимость:** В соответствии с законодательством об охране труда государственные органы, экономические отделы, предприятия и их руководители на всех уровнях должны принимать различные организационные и технические меры для создания безопасных, гигиенических и комфортных условий труда для работников, которые предотвращают и устраняют несчастные случаи, производственные отравления и профессиональные заболевания, защищают здоровье и безопасность работников, поддерживают и улучшают долгосрочную их трудоспособность, избегают неоправданных потерь общественного труда и материальных благ. Следует постоянно совершенствовать трудовое законодательство, позволяющее работать безопасно и защищать законные права работников.

Ключевые слова: Российская Федерация, Китайская Народная Республика, охрана труда, анализ, Международная организация труда.

Институт охраны труда прошел длительную историю формирования и развития. В эпоху глобализации и инновационной модернизации экономики и производства он приобретает особую актуальность в связи с тем, что новые технологические возможности неразрывно сопряже-

ны с повышением рисков для здоровья и жизни трудящихся.

Это обуславливает необходимость включения в трудовое законодательство норм об охране труда на производстве. Цель данной статьи – проведение сравнительного анализа существ-

вующих норм в области охраны труда в России и Китае.

Основными источниками норм об охране труда в Российской Федерации являются [1–6]:

- акты Международной организации труда (МОТ);
- Конституция РФ;
- Трудовой кодекс (ТК) Российской Федерации;
- подзаконные акты, в которые включаются постановления Правительства Российской Федерации, указы Президента Российской Федерации, акты органов исполнительной власти в области охраны труда.

В Китайской Народной Республике к источникам норм, которые регулируют данную область, относятся [1, 7–9]:

- акты МОТ;
- Конституция КНР;
- Закон КНР «О труде» от 5 июля 1994 г., Закон КНР «О безопасности на производстве» от 29 июля 2002 г.;
- подзаконные акты (положения «Об охране труда женщин», «О ежегодном оплачиваемом отпуске»).

В российском законодательстве такое понятие как «охрана труда» было впервые установлено в основах законодательства Российской Федерации об охране труда от 6 августа 1993 г. № 5600 [10], согласно ст. 1 которого охрана труда характеризовалась как «система обеспечения безопасности жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающая правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия».

Практически полностью данное определение было использовано в Федеральном законе от 17 июля 1999 г. № 181-ФЗ «Об основах охраны труда в Российской Федерации» [11], который не действует в настоящее время – вместо него охрана труда регулируется разделом X ТК Российской Федерации.

Охрана труда в Российской Федерации характеризуется как система обеспечения благо-

приятных условий с целью сохранения здоровья и жизни работников при осуществлении трудовой деятельности.

Прежде всего для анализа норм об охране труда необходимо обратиться к основному закону страны – Конституции [5], а именно:

1) к ст. 37, согласно которой каждый гражданин Российской Федерации имеет право на безопасные условия труда;

2) к ст. 39, согласно которой каждому гражданину гарантируется социальное обеспечение в случае потери кормильца, болезни и в других случаях;

3) к ст. 41, согласно которой у граждан Российской Федерации существует право на бесплатную медицинскую помощь и охрану своего здоровья.

Согласно Конституции Китайской Народной республики, государство должно создавать условия для трудоустройства граждан, а также содействовать совершенствованию безопасности условий труда, улучшению системы охраны труда и на основе увеличения объемов производства повышать соответственно и оплату труда, тем самым улучшая благосостояние трудящихся [7, ст. 42]. Статья 45 Конституции КНР устанавливает, что каждый гражданин имеет право на материальную помощь в виде пособий в случае болезни, утраты трудоспособности или старости, т. е. социального страхования.

Таким образом, проанализировав нормы основных законов РФ и КНР [5–12], можно прийти к выводу, что они хотя и сформулированы немного иначе, но права в области охраны труда предоставляют трудящимся одинаковые. Это результат имплементации норм международного права в национальные законодательства. Здесь необходимо обратить внимание на ратификацию государствами конвенций МОТ таких, например, как «О безопасности и гигиене труда и производственной среде», которая подчеркивает важность поддержания безопасных условий труда на производстве, закрепляет основные принципы национальной политики в области обеспечения охраны труда, а также предусматривает, что в целях предупреждения

несчастных случаев и профессиональных заболеваний каждое государство должно создать комплекс мер по обеспечению безопасности и гигиены труда.

Кроме того, важное значение имеет Рекомендация № 121 МОТ «О пособиях в случаях производственного травматизма» [2], которая устанавливает необходимость выплаты пособий пострадавшим на производстве в результате несчастного случая или профессионального заболевания. Несмотря на то, что рекомендации МОТ не обладают юридической силой, а являются «руководством» для деятельности государств, многие положения [2] уже давно нашли воплощение в законодательстве как РФ, так и КНР [13, с. 272–280].

МОТ провозгласила курс на продвижение к достойному труду [4], тем самым направив государства к созданию правовой основы системы охраны труда путем разработки и введения в действие новых правовых норм, определения политики государства, разработки и совершенствования государственных программ в области охраны труда [1, 3]. Ежегодно МОТ издает доклады [1], приуроченные ко Всемирному дню охраны труда, в которых находят свое отражение вопросы актуального состояния системы охраны труда в разных странах, а также развития и совершенствования этой системы, что свидетельствует о необходимости учитывать на национальном уровне последние международные тенденции в данной области и приводить национальное законодательство в соответствие с ними.

Важность вопроса обеспечения оптимального уровня охраны труда подтверждается ратификацией как Китаем, так и Россией конвенций МОТ, посвященных:

- 1) применению труда женщин на подземных работах в шахтах;
- 2) безопасности и гигиене труда в строительстве;
- 3) безопасности и гигиене труда в производственной среде;
- 4) вредному влиянию химических веществ на конкретных рабочих местах.

Федеральный закон «Об основах охраны труда в Российской Федерации» от 17 июля 1999 г. № 181-ФЗ [11] утратил силу в 2006 г. В настоящее время единственным актом, регулирующим охрану труда на уровне закона, является ТК РФ [6], раздел 10 которого посвящен требованиям обеспечения охраны труда, правилам ее организации, а также обеспечению прав работников на рабочие условия и места, безопасные для жизни и здоровья.

ТК РФ отражает векторы развития политики государства в области охраны труда, к которым относят: государственное управление охраной труда; осуществление надзора за соблюдением трудового законодательства; проведение государственной экспертизы условий труда; проведение расследования и ведение учета несчастных случаев на производстве и др. Кроме того, содержатся нормы, касающиеся государственного нормативного регулирования условий труда, а именно установления на федеральном уровне правил, процедур, нормативов и критериев, которые направлены на сохранение здоровья и жизни работников.

Данные нормативы должны соблюдаться работодателем с целью обеспечения условий труда, которые безопасны для жизни и здоровья работников. К ним относят:

- 1) создание и мониторинг системы охраны труда;
- 2) применение средств защиты работников, прошедших обязательную сертификацию;
- 3) снабжение работников специальной защитной одеждой.

Не стоит забывать, что на работников также возложены определенные обязанности в области защиты охраны труда (ст. 214 ТК РФ):

- 1) соблюдать требования в области охраны труда на рабочем месте;
- 2) проходить обязательные медицинские осмотры;
- 3) использовать средства защиты строго по назначению и т. д.

Организации системы охраны труда посвящена гл. 35 ТК РФ. Устанавливается, что государственное регулирование реализуется Прави-

тельством или по его поручению другим органом исполнительной власти в пределах полномочий. В этой главе регламентируется также порядок проведения государственной экспертизы условий труда.

ТК РФ устанавливает, что в организациях должна создаваться служба охраны труда, если в ней работают более 50 человек. Если число сотрудников не превышает такое количество, то данная служба формируется руководителем организации с учетом специфики деятельности. По инициативе работодателей или работников могут также образовываться комитеты, которые отражают взаимодействие работников и работодателей в области охраны труда и предупреждения несчастных случаев на рабочих местах.

В гл. 36 ТК РФ закрепляются такие права работников как, например, право на труд в отвечающих требованиям в области охраны труда условиях, равно как и гарантии реализации этого права. При обнаружении несчастного случая закрепляются порядок действий и порядок расследования несчастных случаев.

Что касается Китая, то законом, который регулирует охрану труда, является Закон КНР «О труде» [8]. Статья 3 содержит указание на то, что работники обладают правом на безопасные условия на рабочем месте, а также несут обязанность по выполнению нормативов безопасности в целях нормального функционирования системы охраны труда и предупреждения несчастных случаев.

Безопасности и гигиене труда посвящена гл. VI. В ней так же, как и в ТК РФ, сформулированы обязанности работодателя в части создания и совершенствования системы безопасности труда, снабжения работников средствами обеспечения безопасности на рабочем месте. Обязанность по соблюдению правил техники безопасности и прохождению обучения для работы на специальных видах производства возлагается на работника.

Сходство заключается и в наличии нормы, касающейся порядка учета и разбирательства по несчастным случаям и профессиональным

заболеваниям. Как ТК РФ (главы 41, 42), так и Закон КНР «О труде» (гл. VII) содержат положения, регламентирующие охрану труда женщин и несовершеннолетних в части запрета работы в ночное время, привлечения к сверхурочным работам и выхода на работу в праздничные и выходные дни.

Однако следует отметить, что в ТК РФ положения, касающиеся охраны труда (положения как общие, так и касающиеся отдельных категорий граждан), сформулированы более подробно, чем в Законе КНР «О труде». Это обусловлено тем, что в КНР действуют законы, детализирующие положения Закона «О труде» (например, закон КНР «О безопасности на производстве» [9] и закон «Об охране здоровья матери и ребенка» [2]).

Другим федеральным законом РФ, который имеет отношение к регулированию охраны труда, является закон «О специальной оценке условий труда» [12], в котором устанавливаются требования и порядок проведения такой оценки с целью выявления и оценки влияния опасных факторов, влияющих на здоровье работников. В этом законе устанавливается обязательное проведение специальной оценки условий труда не реже, чем один раз в пять лет, а также регламентируются требования к организациям и экспертам, которые проводят мероприятия в области оценки условий труда.

В Китае же законодательством не предусматриваются какие-либо процедуры оценки условий охраны труда, в результате чего безопасность труда и условий в стране одни из самых низких по сравнению с другими государствами.

Однако стоит отметить, что Закон КНР «О безопасности труда на производстве» от 1 ноября 2002 г. [9] устанавливает требования к созданию системы государственного контроля условий труда на производстве. Целью принятия данного закона в соответствии со ст. 1 являются повышение уровня безопасности рабочих в процессе трудовой деятельности, а также предупреждение и предотвращение несчастных случаев, в результате которых может понизиться уровень трудоспособности рабочих.

В гл. 2 этого закона содержатся меры и требования, которым должно соответствовать рабочее место для обеспечения безопасности работников в процессе трудовой деятельности; в гл. 3 – права и обязанности работников; главы 4 и 5 регламентируют непосредственно организацию системы государственного контроля в сфере охраны труда и порядка расследования несчастных случаев; гл. 6 устанавливает меры ответственности за несоблюдение предусмотренных мер безопасности.

Кроме того, как в России, так и в Китае существует ряд подзаконных актов, которые также содержат положения об охране труда.

Например, в Постановлении Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. содержится положение, регулирующее правила разработки, утверждения и изменения нормативно-правовых актов в области охраны труда. К таким документам относят [3]:

- 1) стандарты безопасности на рабочих местах;
- 2) типовые инструкции и правила в области обеспечения надлежащего уровня охраны труда;
- 3) санитарные правила и нормативы и т. д.

Что касается подзаконных актов в сфере обеспечения охраны труда, то они принимаются в отношении различных вопросов, таких как:

- 1) создание службы и комиссии по охране труда [4];
- 2) учет и расследование в отношении несчастных случаев в организациях [5];
- 3) обеспечение санитарной безопасности на рабочих местах [6].

Согласно Закону КНР «О труде» [8], государство должно регулировать важнейшие аспекты трудовой деятельности граждан, а именно устанавливать нормы продолжительности рабочего времени, разрабатывать нормативы и правила санитарных условий и безопасности труда, вводить социальные нормативы по охране труда женщин. В КНР так же, как и в РФ, действует ряд актов, направленных на обеспечение безопасного труда, например СанПиНы.

Проблему прав женщин в области охраны труда в КНР, помимо положений Закона «О труде», призваны решать Положение «Об охране труда женщин» и Закон «Об охране здоровья матери и ребенка». Они регламентируют порядок и сроки предоставления декретного отпуска, а также конкретизируют положения Закона «О труде», касающиеся запрета привлекать женщин к выполнению отдельных видов работ.

Таким образом, проанализировав основные нормы законодательства РФ и КНР по охране труда, можно сделать вывод, что между ними много общего: в конституциях обеих стран, а также в трудовых законах закреплены основные права рабочих, в частности право на труд в отвечающих требованиям безопасности условиях на рабочем месте; нормы о расследовании несчастных случаев на производстве; особое внимание уделяется охране труда женщин и детей. Однако есть и различия, одним из которых является то, что в РФ в отличие от КНР разработано и действует большое количество нормативно-правовых актов, регламентирующих специальную оценку труда, в связи с чем уровень безопасности на рабочем месте в России выше.

Библиографический список

1. Конвенция МОТ № 187 2006 г. «Об основах, содействующих безопасности и гигиене труда». – URL : <https://base.garant.ru/2565616/> (дата обращения : 15.06.2006 г.).
2. Рекомендация МОТ № 121 «О пособиях в случаях производственного травматизма». – Принята 08.07.1964 г. на 48-й сессии Генеральной конференции МОТ. – Женева : МОТ, 1964. – 53 с.
3. Рекомендация МОТ № 197 2006 г. «Об основах, содействующих безопасности и гигиене труда». – Принята 08.07.1964 г. созданным в Женеве Административным советом Международного бюро труда и собравшимся 31 мая 2006 г. на свою 95-ю сессию. – Женева : МОТ, 2006. – 81 с.
4. Декларация о социальной справедливости и справедливой глобализации. – Женева: МОТ, 2008. – 144 с.

5. Конституция Российской Федерации. – Принята всенародным голосованием 12.12.1993 г. – М., 1993. – 134 с.

6. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 декабря 2001 г. № 197-ФЗ // Российская газета. – 2001. – № 256. – 31 декабря.

7. Конституция КНР. – Принята на 5-й сессии Всекитайского собрания народных представителей пятого созыва 4 декабря 1982 г. – URL : <https://www.doc88.com/p-0384520431249.html?s=rel&id=1> (дата обращения : 14.03.2004 г.).

8. Закон КНР «О труде». – Принят на 8-м заседании Постоянного комитета Всекитайского собрания народных представителей восьмого созыва 5 июля 1994 г. – Введен в действие с 1 января 1995 г. – 8 с.

9. Закон КНР «О безопасности на производстве». – Принят на 28-м заседании Постоянного комитета Всекитайского собрания народных представителей 9-го созыва 29 июля 2002 г. – Введен в действие с 1 января 2003 г. – 7 с.

10. Основы законодательства Российской Федерации об охране труда // Российская газета. – 1993. – № 168. – 1 сентября.

11. Федеральный закон «Об основах охраны труда в Российской Федерации» от 17 июля 1999 г. № 181-ФЗ // Российская газета. – 1999. – № 143. – 24 июля.

12. Федеральный закон «О специальной оценке условий труда» от 28 декабря 2013 г. № 426-ФЗ // Российская газета. – 2013. – № 295. – 30 декабря.

13. Valticos and Potobsky // International Labour Law. y Nicolas Valticos and Geraldo von Potobsky. – Deventer, Boston : Kluwer Law and Taxation Publ., 1995. – P. 272–280.

Дата поступления: 04.06.2020

Решение о публикации: 24.06.2020

Контактная информация:

ТАН Чжуншэн – аспирант;
xy809685543they@gmail.com

Comparative analysis of legislation in the field of labor protection in Russia and China

Zhongsheng Tan

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

For citation: Tan Zhongsheng. Comparative analysis of legislation in the field of labor protection in Russia and China. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2020, vol. 17, iss. 4, pp. 583–590. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2020-4-583-590

Summary

Objective: Analysis of labor legislation on labor protection in the Russian Federation and the People's Republic of China with the aim of constantly improving working conditions, ensuring safety and harmlessness of operations which are unsafe and harmful to health, mechanization and automation of heavy manual labor, as well as the implementation of safe and civilized production. **Methods:** An analysis of legislation on labor protection was applied in terms of employment, labor contracts, working hours and rest breaks, wages, labor protection, social insurance, vocational training, etc. Based on its results, negative and positive consequences of legislation on labor protection in China and Russia were identified. **Results:** The constitutions and labor legislation of both countries contain the rights of workers to legal protection, including the right to work in conditions that meet safety requirements, there are standards for investigating accidents at work, and special attention is paid to the labor protection of women and children. It was revealed that in the Russian Federation, in contrast to China, a greater number of regulatory laws and

regulations were developed, and special labor assessments were effectively regulated, therefore, the safety level in the Russian workplace is higher. **Practical importance:** In accordance with the legislation on labor protection, state bodies, economic departments, enterprises and their leaders at all levels must take various organizational and technical measures to create safe, hygienic and comfortable working conditions for workers which prevent and eliminate accidents, industrial poisoning and occupational diseases, protect the health and safety of workers, maintain and improve their long-term working capacity, avoid unnecessary losses of social labor and material benefits. Constantly improving labor legislation allows working safely and protects the legal rights of employees.

Keywords: Russian Federation, People's Republic of China, labor protection, analysis, International Labor Organization

References

1. *Konventsiya MOT no. 187 2006 g. "Ob osnovakh, sodeystviyushchikh bezopasnosti i gigiyene truda"* [ILO Convention N 187 of 2006 "On the Promotional Framework for Occupational Safety and Health"]. Available at: <https://base.garant.ru/2565616/> (accessed: June 15, 2006). (In Russian)
2. *Rekomendatsiya MOT no. 121 "O posobiyyakh v sluchayakh proizvodstvennogo travmatizma"*. Prinyata 8 iyulya 1964 g. na 48-y sessii General'noy konferentsii MOT [ILO Recommendation N 121 "On benefits in cases of industrial injuries"]. Adopted on Yuly 08, 1964 at the 48th session of the ILO General Conference. Geneva, ILO Publ., 1964, 53 p. (In Russian)
3. *Rekomendatsiya MOT no. 197 2006 g. "Ob osnovakh, sodeystviyushchikh bezopasnosti i gigiyene truda"*. Prinyata 8 iyulya 1964 g. sozvanym v Zheneve Administrativnym sovetom Mezhdunarodnogo byuro truda i sobravshimsya 31 maya 2006 g. na svoyu 95-yu sessiyu [ILO Recommendation N 197 of 2006 "On the Promotional Framework for Occupational Safety and Health"]. Adopted on Yuly 08, 1964, by the Governing Body of the International Labor Office convened in Geneva and convened on May 31, 2006 for its 95th session]. Geneva, ILO Publ., 2006, 81 p. (In Russian)
4. *Deklaratsiya o sotsial'noy spravedlivosti i spravedlivoy globalizatsii* [Declaration on Social Justice and Fair Globalization]. Geneva, ILO Publ., 2008, 144 p. (In Russian)
5. *Konstitutsiya Rossiyskoy Federatsii*. Prinyata vsem narodnym golosovaniyem 12 dekabrya 1993 g. [The Constitution of the Russian Federation. Adopted by popular vote December 12, 1993]. Moscow, 1993, 134 p. (In Russian)
6. *Trudovoy kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 30 dekabrya 2001 g. no. 197-FZ* [Labor Code of the Russian Federation of December 30, 2001 N 197-FZ]. *Rossiyskaya gazeta* [Russian newspaper], 2001, no. 256. (In Russian)
7. *Konstitutsiya KNR*. Prinyata na 5-y sessii Vsekitayskogo sobraniya narodnykh predstaviteley pyatogo sozyva 4 dekabrya 1982 g. [The Constitution of the People's Republic of China. Adopted at the 5th session of the Fifth National People's Congress on December 04, 1982]. Available at: <https://www.doc88.com/p-0384520431249.html?s=rel&id=1> (accessed: March 14, 2004). (In Russian)
8. *Zakon KNR "O trude"*. Prinyata na 8-m zasedanii Postoyannogo komiteta Vsekitayskogo sobraniya narodnykh predstaviteley vos'mogo sozyva 5 iyulya 1994 g. Vveden v deystviye s 1 yanvarya 1995 g. [Law of the PRC "On Labor". Adopted at the 8th meeting of the Standing Committee of the Eighth National People's Congress on July 5, 1994. Entered into force on January 01, 1995], 8 p. (In Russian)
9. *Zakon KNR "O bezopasnosti na proizvodstve"*. Prinyata na 28-m zasedanii Poatoyannogo komiteta Vsekitayskogo sobraniya narodnykh predstaviteley 9-go sozyva 29 iyulya 2002 g. Vveden v deystviye s 1 yanvarya 2003 g. [Law of the People's Republic of China "On safety at work". Adopted at the 28th meeting of the 9th meeting of the Standing Committee of the National People's Congress on July 29, 2002. Entered into force on January 01, 2003], 7 p. (In Russian)
10. *Osnovy zakonodatel'stva Rossiyskoy Federatsii ob okhrane truda* [Fundamentals of the legislation of the Russian Federation on labor protection]. *Rossiyskaya gazeta* [Russian newspaper], 1993, no. 168, September 01. (In Russian)

11. Federal'nyy zakon "Ob osnovakh okhrany truda v Rossiyskoy Federatsii" ot 17 iyule 1999 g. no. 181-FZ [Federal Law "On the Fundamentals of Labor Protection in the Russian Federation" dated July 17, 1999 N 181-FZ]. *Rossiyskaya gazeta* [Russian newspaper], 1999, no. 143, Yuly 24. (In Russian)

12. Federal'nyy zakon "O spetsial'noy otsenke usloviy truda" ot 28 dekabrya 2013 g. no. 426-FZ [Federal Law "On Special Assessment of Working Conditions" dated December 28, 2013 N 426-FZ]. *Rossiyskaya gazeta* [Russian newspaper], 2013, no. 295, December 30. (In Russian)

13. Valticos and Potobsky. *International Labour Law*. y Nicolas Valticos and Geraldo von Potobsky. Deventer, Boston, Kluwer Law and Taxation Publ., 1995, pp. 272–280.

Received: June 04, 2020

Accepted: June 24, 2020

Author's information:

Zhongsheng TAN – Graduate Student;
xy809685543thcy@gmail.com

СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИЗВЕСТИЯ ПГУПС» ЗА 2020 ГОД

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

<i>Бороненко Ю. П., Рахимов Р. В., Белянкин А. В.</i> Разработка новых методов измерения вертикальных сил, действующих на боковую раму тележки от колесной пары при движении вагона	17, 1	7–22
<i>Ким К. К., Иванов С. Н., Хисматулин М. И.</i> Гидродинамическое моделирование гибридных энергетических устройств с использованием CFD-технологий	17, 2	161–169
<i>Kim K. K., Ivanov S. N., Khismatulin M. I.</i> Hydrodynamic modeling of hybrid energy devices using CFD technologies	17, 2	170–176
<i>Кононов Д. П., Гомонец Ю. В.</i> Методика контроля дефектов колесных пар железнодорожного подвижного состава при их обработке на колесотокарных станках	17, 3	275–281
<i>Марков Д. С., Наседкин О. А.</i> Инструментальное средство оценки вероятностных показателей надежности и безопасности систем железнодорожной автоматики	17, 1	23–34
<i>Никифорова Г. И.</i> Исследование эксплуатации вагонного парка операторских компаний	17, 3	282–287
<i>Обухов М. Ю., Калинин Н. П.</i> Повышение энергоэффективности электропоезда за счет установки накопителей электрической энергии	17, 4	449–464
<i>Панов Г. О., Толстов С. М., Цыганская Л. В., Морозова И. О.</i> Особенности проектирования и испытаний сменных кузовов	17, 4	465–476
<i>Песляк А. В., Битюцкий Н. А., Сувернев М. Н., Фомин А. Н.</i> Повышение универсальности вагонов-цистерн для перевозки нефтехимических грузов	17, 4	477–489
<i>Покровская О. Д., Заболоцкая К. А., Новикова И. Д.</i> Решение «Built-to-suit» в сегменте терминально-логистического сервиса	17, 1	35–43
<i>Покровская О. Д.</i> Терминалистика – новая дисциплина в высшем транспортном образовании	17, 2	177–197
<i>Покровская О. Д.</i> Принципы реализации комплексных транспортно-логистических услуг на железнодорожном транспорте и требования к ним	17, 3	288–303

Тан Чжуншэн. Сравнительный анализ нормативно-правовой документации России и Китая в области охраны труда при работах на строительной технике 17, 3 304–310

Тлявлин Р. М. Оценка технического состояния волногасящих сооружений инженерной защиты земляного полотна от волнового воздействия 17, 2 198–209

Третьяков М. В., Брызгалов В. А., Румянцев Е. В. Устьевые участки рек как индикаторы антропогенных изменений геоэкологического состояния устьевых областей рек Арктической зоны Российской Федерации 17, 3 311–323

Федоров И. В., Воробьев А. А., Конограй О. А. Модернизация осей типа РУ1 с целью обеспечения их дальнейшего использования 17, 4 490–497

Хамидов О. Р. Моделирование и экспериментальное исследование асинхронного тягового электродвигателя локомотивов при аварийных режимах работы 17, 1 44–54

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

Богомоллова Н. Н., Журавлев И. Н. Методическое сопровождение штамповых испытаний армогрунтовых конструкций 17, 1 55–61

Бороненко Ю. П., Абдуллаев Б. А. Экспериментальные исследования новых конструктивных решений ограждения кузовов рефрижераторных вагонов и контейнеров 17, 4 498–513

Бороненко Ю. П., Рахимов Р. В., Григорьев Р. Ю., Попов В. В. Анализ методов измерений силового воздействия подвижного состава на путь и систем технического контроля колес при движении поезда 17, 3 324–344

Воробьев А. А., Будюкин А. М., Кондратенко В. З., Каримов Д. Д. Эволюция конструкции подвижного состава легкорельсового транспорта в Санкт-Петербурге 17, 1 62–70

Воробьев А. А., Кулик В. И., Нилов А. С., Спирюгова М. А. Перспективные технологии производства тормозных дисков из керамоматричных композитов на основе SiC-матрицы систем торможения высокоскоростного железнодорожного транспорта 17, 2 210–220

Грищенко А. В., Хамидов О. Р. Мониторинг и диагностика технического состояния асинхронного тягового электродвигателя локомотивов с применением искусственных нейронных сетей на железных дорогах Республики Узбекистан 17, 4 514–524

<i>Журавлев И. Н.</i> Методологические аспекты исследования деформативности армогрунтовых конструкций	17, 1	71–76
<i>Загорский Д. И., Мяделец М. Г.</i> Сравнительная оценка динамической нагруженности длиннобазных вагонов-платформ	17, 4	525–533
<i>Зайцев А. А., Троицкий П. С.</i> Анализ снижения рисков на железнодорожной инфраструктуре при внедрении моторвагонных грузовых электропоездов	17, 3	345–352
<i>Кобозева Н. Г.</i> Анализ показателей эффективности использования железнодорожного подвижного состава	17, 1	77–83
<i>Кочунов Ю. А., Волгин Е. С.</i> Основные направления и методы совершенствования поддерживающих конструкций контактной сети железных дорог	17, 1	84–95
<i>Кручек В. А., Хамидов О. Р.</i> Возможности, перспективы и особенности модульной конструкции грузового электровоза в современных эксплуатационных условиях	17, 1	96–107
<i>Лобыцин И. О.</i> Использование инфракрасного излучения при упрочнении изоляционных конструкций электрооборудования тягового подвижного состава	17, 1	108–116
<i>Марикин А. Н., Мироценко В. А.</i> Исследование энергетических характеристик устройства компенсации реактивной мощности с регулируемой индуктивностью в электротяговой сети на экспериментальной установке	17, 4	534–544
<i>Нерадовский Л. Г., Фёдорова Л. Л., Соколов К. О.</i> Опыт изучения структуры и петрофизики мерзлых грунтов участка автодороги «Вилюй» в г. Якутске методом георадиолокации	17, 3	353–365
<i>Никифорова Г. И.</i> Построение дескриптивной модели логистической цепи доставки грузов при взаимодействии железнодорожного и морского транспорта	17, 4	545–551
<i>Орлова А. М., Рудакова Е. А., Шевченко Д. В., Гусев А. В., Шалтегин Г. С.</i> Подходы к оценке напряженно-деформированного состояния пружин рессорного подвешивания грузовых вагонов	17, 2	221–232
<i>Плеханов П. А.</i> Обеспечение комплексной безопасности на железнодорожном транспорте в контексте стратегического развития	17, 4	552–565
<i>Слепцов М. А., Васильев И. П., Старовойтов С. А., Мартынюк И. Ю.</i> Оптимизация алгоритмов системы управления электровозов ЗЭС5К с поосным регулированием силы тяги	17, 3	366–377

Таничева Н. А., Федоров И. В., Филиппова И. О. Съёмное оборудование для перевозки лесоматериалов: новые технические решения и применение высокопрочных сталей 17, 1 117–128

Чернышева Ю. В., Дубинский В. А. Влияние пространственных колебаний грузовых вагонов на движение состава и затраты энергетических ресурсов 17, 2 233–243

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Боденко Е. М., Шершнев М. В. Утилизация продуктов сноса зданий и сооружений при рекультивации гранитных карьеров с использованием мультимодальной логистики 17, 2 244–251

Воробьев А. А., Кулик В. И., Нилов А. С., Жуков Д. А. Анализ фрикционных материалов тормозных колодок в парах трения с тормозными дисками из керамического композита с SiC-матрицей для высоконагруженного железнодорожного транспорта 17, 3 378–386

Зайнитдинов О. И., Абдуллаев Б. А. Конструирование пневмомеханического кантователя для ремонта боковых рам грузовых вагонов 17, 2 252–262

Истомин С. Г., Перестенко А. Е. Оценка составляющих потерь электроэнергии электроподвижным составом и устройствами электроснабжения 17, 3 387–396

Ким К. К., Рыжова Е. Л. Использование интеллектуальных цифровых технологий при эксплуатации электроподвижного состава с позиции электробезопасности 17, 1 129–135

Ким К. К., Иванов С. Н., Хисматулин М. И. Электромеханическая система отопления пассажирского вагона 17, 4 566–574

Котенко А. Г., Соляник В. В. Оценка качества переработки вагонопотока в условиях неравномерности прибытия поездов на сортировочную станцию 17, 3 397–406

Мухаммадиев Н. Р. Результаты исследования вибрации в зоне рельсового стыка при рельсовых скреплениях различной упругости 17, 3 407–415

Назирхонов Т. М., Якушев А. Я. Компьютерная модель тягового трансформатора электровоза переменного тока серии «O'Z-ELR» 17, 3 416–427

Попадюк А. Ю., Коровяковский Е. К., Титова Т. С. Экологические аспекты технологии распределенного реестра на примере алгоритма консенсуса Proof-of-Work 17, 1 136–143

<i>Сергеева Т. Г., Никифорова Г. И.</i> Повышение конкурентоспособности транспортно-логистических компаний в условиях цифровизации	17, 3	428–436
<i>Сахаров Р. А., Ким К. К., Урушев С. В.</i> Анализ остаточного технического ресурса железнодорожных колес	17, 3	437–442
<i>Смирнов В. И., Видюшенков С. А.</i> О равновесном уклоне станционного профиля	17, 4	575–582
<i>Тан Чжуншэн.</i> Сравнительный анализ законодательства в области охраны труда в России и Китае	17, 4	583–590
<i>Шершнева М. В., Бобровник А. Б.</i> Применение природных растворов для обезвреживания ионов свинца	17, 2	263–268
<i>Штыков В. И., Пономарёв А. Б.</i> Гидравлический расчет бесполостных дрен треугольного профиля, усиленных дренажной трубой	17, 1	144–153